

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.038

CSTR:32310.14.stbxb.2025.03.038

毛燕俊, 颜科宇, 陈正发, 等. 耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失过程的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 15-26.

MAO Yanjun, YAN Keyu, CHEN Zhengfa, et al. Effects of tillage practices on soil organic carbon loss/leaching process in red soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 15-26.

耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失过程的影响

毛燕俊^{1,2}, 颜科宇^{1,2}, 陈正发^{1,2,3}, 段青松^{1,2,3}, 胡燕梅^{1,2},

王道祥^{1,2}, 杨晓峰^{1,2}, 董辰晨^{1,2}

(1. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201; 2. 云南省高校绿色智慧农田与碳减排工程研究中心, 昆明 650201;
3. 陆良山间盆地土地利用云南省野外科学观测研究站, 昆明 650201)

摘要: [目的] 探究耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失过程的影响及耦合协同机制, 为红壤坡耕地通过优化耕作措施调控土壤有机碳流失/淋失提供科学依据。[方法] 通过布设覆膜耕作(PM)、横坡垄作(RT)、顺坡垄作(DT)和传统耕作(CT)4种耕作措施试验小区, 采用精细化室内人工模拟降雨的研究手段, 并结合结构方程模型(SEM), 探析降雨侵蚀过程不同耕作措施对红壤坡耕地有机碳流失/淋失的影响机制。[结果] 地表径流和壤中流量大小关系分别为 PM>DT>CT>RT、RT>CT>DT>PM, 其中, PM、RT、DT 和 CT 小区地表径流分别占总径流量的 60.6%、34.9%、53.4%、45.8%, PM、DT 产流形式以地表径流为主, RT、CT 以壤中流为主。降雨过程产流产沙及有机碳流失/淋失均受耕作措施、生育期和降雨强度三者交互作用的显著影响($p<0.01$), 其中, DT 侵蚀产沙总量最大, 较其他耕作措施增大 2.00~8.28 倍($p<0.05$), 不同耕作措施和生育期的土壤有机碳流失/淋失总量关系分别为 DT>CT>PM>RT, 穗期>花粒期>苗期, RT 可显著抑制有机碳流失/淋失, 较其他耕作措施减少 4.9%~52.8% ($p<0.05$)。地表径流、壤中流和侵蚀泥沙中有机碳流失/淋失量分别为总损失量的 56.1%、18.1% 和 25.8%。SEM 分析表明, 耕作措施和降雨强度均可通过影响地表径流量、壤中流量及侵蚀泥沙量进而对土壤有机碳流失/淋失过程产生间接影响, 其中通过地表径流量对土壤有机碳流失/淋失的影响系数最大, 其次为侵蚀泥沙量和壤中流量。[结论] 地表径流和侵蚀泥沙是红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失的主要途径, RT 在减少红壤坡耕地地表径流量、侵蚀泥沙量及阻控土壤有机碳的流失/淋失方面表现出显著优势, 可作为红壤坡耕地耕作管理中的优先推广措施。

关键词: 土壤有机碳; 水土流失/淋失; 红壤坡耕地; 耕作措施; 地表径流; 壤中流; 降雨侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0015-12

Effects of Tillage Practices on Soil Organic Carbon Loss/Leaching Process in Red Soil Slope Farmland

MAO Yanjun^{1,2}, YAN Keyu^{1,2}, CHEN Zhengfa^{1,2,3}, DUAN Qingsong^{1,2,3}, HU Yanmei^{1,2},

WANG Daoxiang^{1,2}, YANG Xiaofeng^{1,2}, DONG Chenchen^{1,2}

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, 650201, China; 2. Research Center of Green Smart Farmland and Carbon Emission Reduction Engineering in Colleges and Universities of Yunnan Province, Kunming, 650201, China;
3. Land Use in Luliang Intermountain Basin Yunnan Field Scientific Observation and Research Station, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the effects of tillage practices on soil organic carbon loss/leaching process and their coupled synergistic mechanism in red soil slope farmland, and to provide a scientific basis for regulating soil organic carbon loss/leaching by optimizing tillage practices in red soil slope farmland. [Methods] Four tillage practices were established, including plastic film mulching (PM), cross-slope ridge

收稿日期: 2024-12-31

修回日期: 2025-02-25

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-04-21

资助项目: 云南省基础研究计划面上项目(202201AT070272); 国家自然科学基金项目(42167046); 云南省农业基础研究联合专项面上项目(202301BD070001-033, 202301BD070001-180); 云南省水利科技项目(2023BG204001)

第一作者: 毛燕俊(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土生态工程研究。E-mail: 1477968019@qq.com

通信作者: 陈正发(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土生态工程、农业水土资源利用与保护研究。E-mail: chenzhengfa2013@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

tillage (RT), downslope ridge tillage (DT) and conventional tillage (CT). A refined indoor rainfall simulation experiment was conducted, and structural equation model (SEM) was employed to analyze the mechanism by which different tillage practices influence the process of soil organic carbon loss/leaching of the red soil slope farmland under the effect of rainfall erosion. [Results] The surface runoff and interflow under different tillage practices were ranked as PM>DT>CT>RT, and RT>CT>DT>PM, respectively. Among them, surface runoff accounted for 60.6%, 34.9%, 53.4% and 45.8% of the total runoff in PM, RT, DT and CT plots. The runoff form of PM and DT was mainly surface runoff, while the runoff form of RT and CT was mainly interflow. The runoff, sediment yield, and organic carbon loss/leaching were significantly affected by the interaction of tillage practices, crop growth stage, and rainfall intensity ($p<0.01$). Among them, the total sediment yield of DT was the largest, which was 2.00-8.28 times higher than those of other tillage practices ($p<0.05$). The soil organic carbon loss/leaching under different tillage practices and growth stages followed the order of DT>CT>PM>RT, and heading stage>flowering-grain stage>seedling stage. RT significantly reduced organic carbon loss/leaching by 4.9% to 52.8% compared to other tillage practices ($p<0.05$). The loss/leaching of organic carbon through surface runoff, interflow, and eroded sediment accounted for 56.1%, 18.1% and 25.8% of the total loss, respectively. SEM analysis showed that tillage practice and rainfall intensity indirectly affected soil organic carbon loss/leaching process by affecting surface runoff, interflow, and sediment yield. Among them, the influence of surface runoff was the greatest, followed by sediment yield and interflow. [Conclusion] Surface runoff and erosion sediment are the main ways of soil organic carbon loss/leaching in red soil slope farmland. RT has significant advantages in reducing surface runoff, sediment yield, and controlling soil organic carbon loss/leaching in red soil slope farmland, making it a preferable tillage practice for sustainable management of red soil slope farmland.

Keywords: soil organic carbon; soil erosion/leaching; red soil slope farmland; tillage practices; surface runoff; interflow; rainfall erosion

Received: 2024-12-31

Revised: 2025-02-25

Accepted: 2025-03-01

Online(www.cnki.net): 2025-04-21

土壤有机碳作为土壤活性碳的主要组成部分,与土壤团粒结构的形成、结构稳定性、养分供给能力及微生物活性密切相关,是表征土壤质量状况的重要指标^[1-2]。耕作措施对坡耕地土壤侵蚀和水分流失/淋失过程具有显著影响,尤其是不合理的耕作实践往往加剧有机碳的流失与淋失,进而削弱土地生产力的有效发挥^[3]。因此,开展不同耕作措施条件下土壤有机碳流失/淋失规律研究,优选出合理的耕作措施并加以推广应用,对减少土壤有机碳的流失/淋失,提高坡耕地土地生产力水平及促进山地丘陵区旱作农业可持续发展具有重要意义。

红壤坡耕地在我国南方地区分布广泛,是重要的粮食生产基地和农业生产载体。受西南季风和东南季风交汇影响,该区域具有雨热同期的气候特征,面临降雨集中且侵蚀力强的威胁,加之土壤抗侵蚀能力较弱和地形条件复杂,导致坡耕地水土流失问题尤为突出^[4-5]。同时,在水土流失过程中,降雨入渗动力还会驱动土壤中溶解有机碳的流失与

淋失^[6],对区域粮食安全造成严重威胁,还可能潜在地影响全球碳循环^[7-8]。近年来,降雨侵蚀下坡耕地有机碳流失过程及其影响机制已成为学术界关注的热点问题。已有研究^[9]表明,降雨侵蚀和水分入渗是坡耕地土壤有机碳流失/淋失的主要驱动因素。地表径流加剧土壤侵蚀,加速有机碳流失及流域面源污染,对农业生态环境构成严重威胁^[10-11]。费凯等^[12]指出,坡面径流和有机碳流失受降雨强度和耕作措施的显著影响,且有机碳流失量随降雨强度增大显著增加^[13]。然而,耕作措施作为调控坡耕地产流产沙和水分入渗的关键因素,不同耕作措施下地表径流、壤中流及产沙量存在显著差异,导致红壤坡耕地有机碳流失/淋失规律及其影响机制仍不明确。

针对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失的问题,近年来学者们通过工程措施和农艺措施等途径探索一系列防治方案,以缓解降雨侵蚀导致的有机碳流失/淋失。然而,工程措施在红壤坡耕地复杂地形条件下往往对土地破坏较大且成本较高,而农艺措施

则更具可行性和推广潜力。例如,玉米作为红壤坡耕地主栽农作物,能够在降雨集中期提高地表覆盖率,抑制雨水对地表冲刷,从而降低土壤有机碳的流失量^[14]。其次,耕作措施作为农艺措施的重要组成部分,合理的耕作措施不仅能显著减少坡耕地土壤侵蚀,还有效减少有机碳流失^[15]。已有研究^[16-17]表明,横坡垄作作为保护性耕作措施,其垄台和坡面夹角对地表径流有良好的拦截效果,从而降低土壤侵蚀和有机碳流失/淋失。覆膜耕作可隔绝地表,提高土壤水分的利用率,表现出良好的保水性能和碳氮等养分固持性能^[18]。相比之下,顺坡垄作因垄沟易于汇集地表径流,其固土效果和养分固持能力较差^[19-20]。此外,耕作措施通过改变坡面粗糙度,影响地表径流与土壤的接触面积,进而不同程度地影响土壤有机碳的流失,也是不同耕作措施下有机碳流失量差异的主要原因^[14]。总体而言,尽管当前有关耕作措施对坡耕地土壤侵蚀及有机碳流失过程影响的研究较多,但大多只关注坡面水土流失引发的土壤有机碳损失,而对水分垂直运移(土壤入渗)导致的溶解态有机碳淋失关注较少,导致降雨侵蚀条件下坡耕地有机碳流失/淋失过程及定量化表征方面还存在诸多困难,特别是红壤坡耕地利用过程中不同耕作措施对土壤有机碳流失/淋失的阻控效果及其耦合协同机制尚不明确。

鉴于此,本研究以红壤坡耕地为研究对象,通过设置覆膜耕作(PM)、横坡垄作(RT)、顺坡垄作(DT)、传统耕作(CT)4种试验小区,在不同作物生育期进行精细化人工模拟降雨试验,探讨红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失规律、耦合特征及影响机制,并优选出土壤有机碳流失/淋失阻控效果最佳的耕作措施,以期为红壤坡耕地通过优化耕作措施调控土壤有机碳流失/淋失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在云南省昆明市云南农业大学节水灌溉试验中心(25°07'56"N,102°44'51"E)进行。试验区海拔1 930 m,属于亚热带高原季风气候,雨量集中在5—10月,降雨量占全年的85.0%。试验区内多年平均降水量1 000.5 mm,年平均气温14.8℃,年平均日照时间约2 327.5 h,全年无霜时间约308 d,耕层土壤以红壤土为主,独特的气候条件为农作物生长提供良好的自然基础。本研究供试土壤采自云南农业大学后山教学用地,为典型的坡耕地红壤,土壤基本理

化性质:pH为5.00,黏土颗粒(<0.01 mm)、砂粒(>0.01 mm)分别为79.7%、20.3%,土壤平均田间持水量为27.4%,土壤有机碳、全氮、有效磷、速效钾和土壤体积质量分别为13.01 g/kg、0.69 g/kg、3.50 mg/kg、73.21 mg/kg、1.10 g/cm³。

1.2 试验设计

为模拟红壤坡耕地利用过程中的典型耕作措施,分别设置传统平作(CT,沿地块坡度方向不起垄种植作物)、覆膜耕作(PM,在传统平作的基础上,分地块在坡耕地表面覆膜)、横坡垄作(RT,作物垄的方向和地块坡向垂直,垄宽30 cm、垄高10 cm)、顺坡垄作(DT,作物垄的方向和地块坡向平行,垄宽20 cm、垄高10 cm)4种处理试验小区(图1),采用随机区组设计,各处理重复3次。试验小区外壳采用不锈钢材质制造,尺寸为160 cm(长)×80 cm(宽)×30 cm(深),小区面积1.28 m²。依据我国南方红壤坡耕地区域特点,试验小区坡度均设置为10°,每个试验小区填充30 cm厚原状耕层土壤(红壤坡耕地耕层厚度一般为20~35 cm,故试验小区填土厚度设置为30 cm),为使试验小区土壤自然沉降后土壤体积质量与自然状态下的红壤坡耕地基本保持一致,试验小区在种植作物前需进行灌水处理。

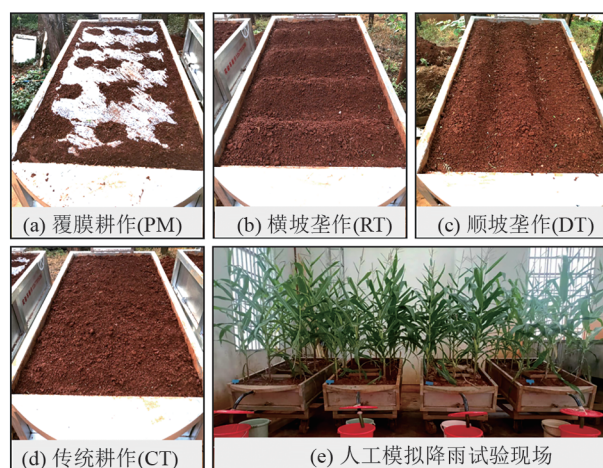


图1 试验径流小区耕作处理及人工模拟降雨试验

Fig.1 Tillage treatment and artificial simulated rainfall test site in the test runoff plots

为模拟红壤坡耕地典型作物模式,试验小区内种植当地主栽玉米品种,采用传统穴播的方式种植,种植密度为9万株/hm²,植株行间距为横向30 cm,纵向40 cm。玉米播种时间为2023年6月21日,在玉米生育过程中,根据玉米生长特点划分为苗期、花粒期和穗期3个生育阶段,其生长过程中严格参照当地的耕作管理模式进行,分别于7月28日和9月6日追加

150 kg/hm²的氮肥,保证玉米的正常生长。为探究降雨侵蚀条件下红壤坡耕地有机碳流失/淋失规律,在玉米各生育期内考虑研究区侵蚀性降雨特征,进行2次不同降雨强度(*i*)的人工模拟降雨试验(中雨强和大雨强各1次),每次历时均为60 min,共计6次模拟降雨。苗期分别在7月21、25日进行降雨试验(*i*分别为1.26、2.47 mm/min),花粒期在8月18、22日进行降雨试验(*i*分别为1.33、2.62 mm/min),穗期在9月19、23日进行降雨试验(*i*分别为1.30、2.79 mm/min)。降雨试验均按照先中雨强度后大雨强度的顺序进行。

1.3 人工模拟降雨试验

人工模拟降雨试验在云南农业大学节水灌溉中心人工模拟降雨大厅进行,人工模拟降雨设备为南京林业大学研制的NLJY-10-03型室内人工模拟降雨系统,该设备在进行模拟降雨时可根据试验需求调节降雨强度和降雨历时,降雨强度可调节范围为15~180 mm/h,降雨设备喷头高度为9 m,降雨均匀系数在85.0%以上。在每次进行人工降雨时,保证试验小区内土壤充分湿润(即土壤含水量为42.0%)。不同强度降雨历时均为60 min,降雨过程中每隔5 min测定地表径流量和壤中流量,并采集地表径流、壤中流水样各500 mL,用于测定侵蚀泥沙及有机碳含量。同时,为校准降雨过程雨强大小,在降雨大厅不同位置放置3个雨量筒,由此测定模拟降雨的实际降雨量^[21]。降雨结束后继续用收集桶收集壤中流直到不再产生壤中流为止,采集的壤中流样品直接用于测定壤中流中的溶解有机碳含量;而地表径流样品在放置3 h待其澄清后,将上部清液转移到另外的采样瓶,用于测定地表径流中的溶解有机碳含量,下部泥沙样品全部转移至烧杯,放入烘箱烘干后采用称重法测定每份水样中的侵蚀泥沙含量。地表径流中的侵蚀泥沙烘干称重后进行混合处理,除去植物根系及石块等杂物后过100目筛网,用于测定侵蚀泥沙中的有机碳含量。其中,试验过程地表径流量和壤中流量采用量筒测定^[22],径流泥沙含量采用烘干法^[21]测定,地表径流、壤中流中的溶解性有机碳采用非色散红外线吸收法^[23]测定,侵蚀泥沙中的有机碳含量采用重铬酸钾容量法—稀释加热法^[23]测定。

降雨侵蚀条件下土壤有机碳主要通过地表径流、侵蚀泥沙和垂直入渗水流发生流失/淋失(也即土壤有机碳损失),依据质量守恒原理,土壤有机碳流失/淋失总量(*Q*)的计算公式为:

$$Q = C_1 q_1 + C_2 q_2 + C_3 q_3$$

式中:*Q*为降雨侵蚀条件下土壤有机碳流失/淋失总

量,g;*C*₁、*C*₂、*C*₃分别为溶解于地表径流、壤中流有机碳浓度,g/L和侵蚀泥沙中的土壤有机碳质量分数,g/kg;*q*₁为地表径流总量,L;*q*₂为壤中流总量,L;*q*₃为泥沙总量,kg。

1.4 数据处理与分析方法

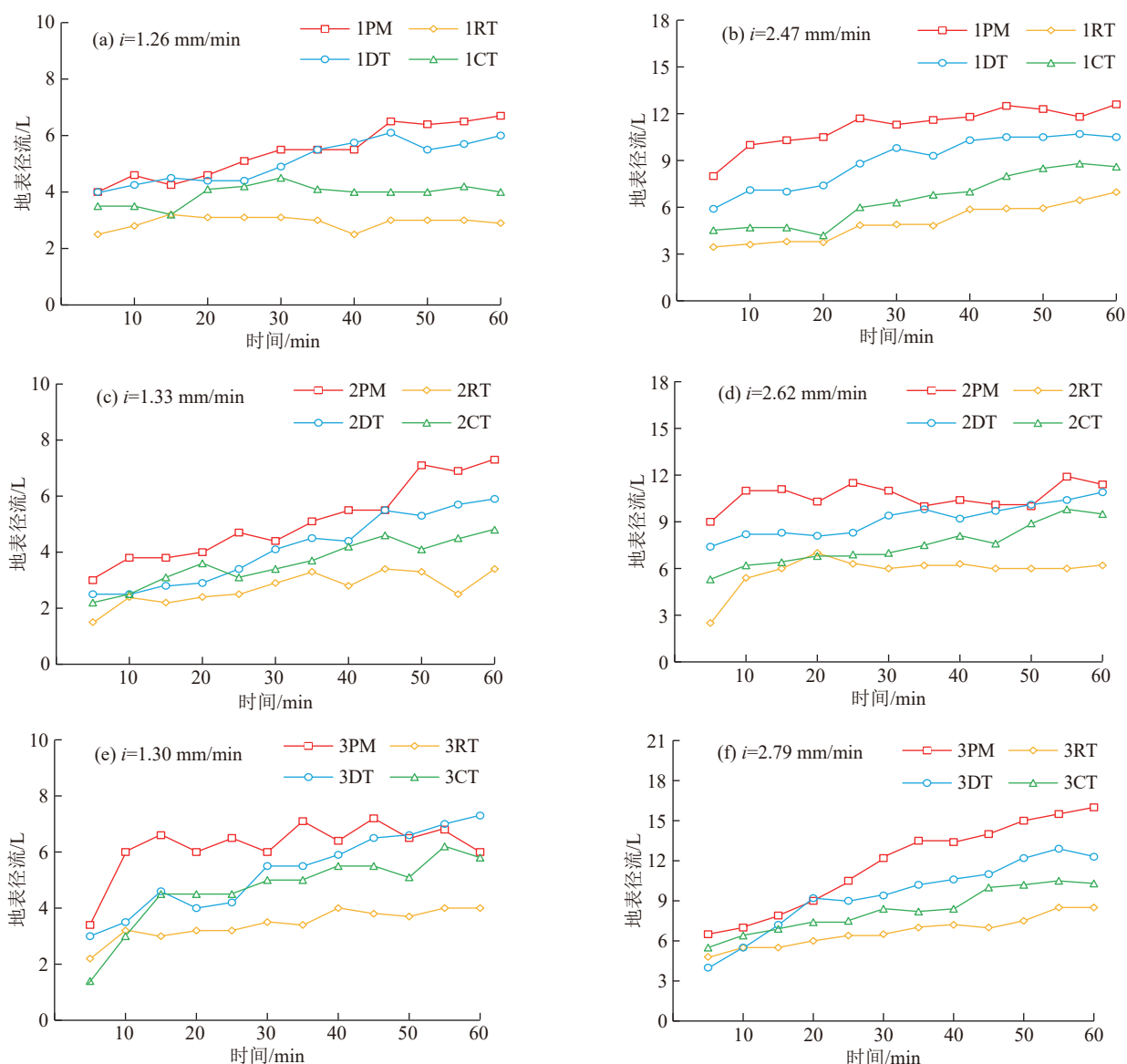
本研究基础数据处理采用Excel 2019软件进行,统计分析采用SPSS 19.0软件进行。进行数据分析前,对所有数据的方差性和正态性进行检验。采用多因素方差分析(ANOVA)量化作物生长季、耕作措施和降雨强度及其交互作用对土壤产流产沙和有机碳流失/淋失总量的影响,若平均值差异显著,则进一步采用最小显著差异检验(LSD)进行多重比较,显著性水平设定为 $p < 0.05$ ^[24]。结构方程模型的构建与分析采用Amos Graphics软件完成,图形绘制使用Origin 2021软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施地表/壤中流变化

2.1.1 地表径流过程 图2为3个玉米生育期不同耕作措施试验小区在降雨侵蚀条件下地表径流变化过程。从图2可看出,地表径流随降雨历时的变化大致可分为急剧增大阶段、缓慢增大阶段和稳定阶段3个阶段。其中,地表径流急剧增长阶段主要集中在产流前10 min,缓慢增长阶段在10~35 min,而稳定阶段在不同降雨强度下则表现出一定差异。具体而言,在中雨强度条件下达到径流稳定阶段的临界时刻总体趋于50 min,大雨强度条件下趋于35~40 min。由此表明,在相同的降雨历时条件下,降雨强度越大,地表径流达到稳定产流状态所需的降雨历时就越短。从地表径流过程曲线也可看出,除个别时段外PM地表径流过程曲线均位于其他耕作措施的上方,其次为DT、CT,而RT则位于最下方,表明在整个降雨过程中,PM地表产流量均最大,RT反之。

在降雨侵蚀过程中,不同耕作措施地表径流的稳定产流量表现出显著差异。4种耕作措施中PM的地表径流稳定产流量最大,相比RT、DT和CT分别增加85.7%~96.7%、12.0%~18.2%、44.4%~73.5%,不同耕作措施稳定产流量大小关系表现为PM>DT>CT>RT。其次,不同作物生育期地表径流稳定产流量存在显著差异,不同作物生育期稳定产流大小关系表现为穗期>苗期>花粒期,穗期的地表径流稳定产流量相比苗期和花粒期分别增大1.11~1.20、1.13~1.26倍。表明PM和DT的地表径流较大,而RT则因能有效控制地表径流,减少降雨对地表的冲刷,在4种耕作措施中地表径流量相对最小。



注:图例中1、2、3分别表示作物在生育苗期、花粒期和穗期经历中雨及大雨强度的降雨。下同。

图2 不同耕作措施作物各生育期地表径流过程

Fig. 2 The dynamic processes of surface runoff across different crop growth stages under various tillage practices

2.1.2 壤中流过程 图3为降雨侵蚀条件下不同耕作措施试验小区在3个作物生育期壤中流变化过程。从图3可以看出,降雨过程壤中流变化存在一定波动性,降雨初期壤中流均较小,随降雨的持续进行,壤中流逐步增大,当降雨历时达到某一临界时刻后,壤中流量均呈现相对稳定的变化趋势。在中雨强度条件下达到径流稳定的临界时刻大致为35~45 min;大雨强度下则为20~35 min。表明壤中流达到稳定产流状态下的降雨历时随雨强的响应同地表径流一致,降雨强度越大,壤中流达到稳定产流状态的降雨历时也越短。从壤中流过程曲线也可看出,除个别时段外,RT壤中流过程曲线均位于其他耕作措施的上方,其次为CT、DT,而PM则位于最下方,该变化

过程趋势与地表径流量过程曲线正好相反。4种耕作措施中RT的壤中流稳定产流量最大,相比PM、DT和CT分别增加44.41%~46.2%、58.3%~62.5%、18.2%~26.7%,壤中流稳定产流量大小关系为RT>CT>DT>PM。其次,不同生育期试验小区的壤中流具有一定的差异性,穗期的壤中流稳定产流量相比苗期和花粒期分别增大0.71~1.63、1.02~1.60倍。不同作物生育期间大雨强度下的壤中流稳定产流量分别是中雨强度下的1.17、2.11、1.61倍,壤中流稳定产流量总体表现为穗期>苗期>花粒期。综合分析表明,4种耕作措施中,RT在减缓地表径流的同时,显著增加壤中流产流量,在4种耕作措施中壤中流稳定产流量最大。

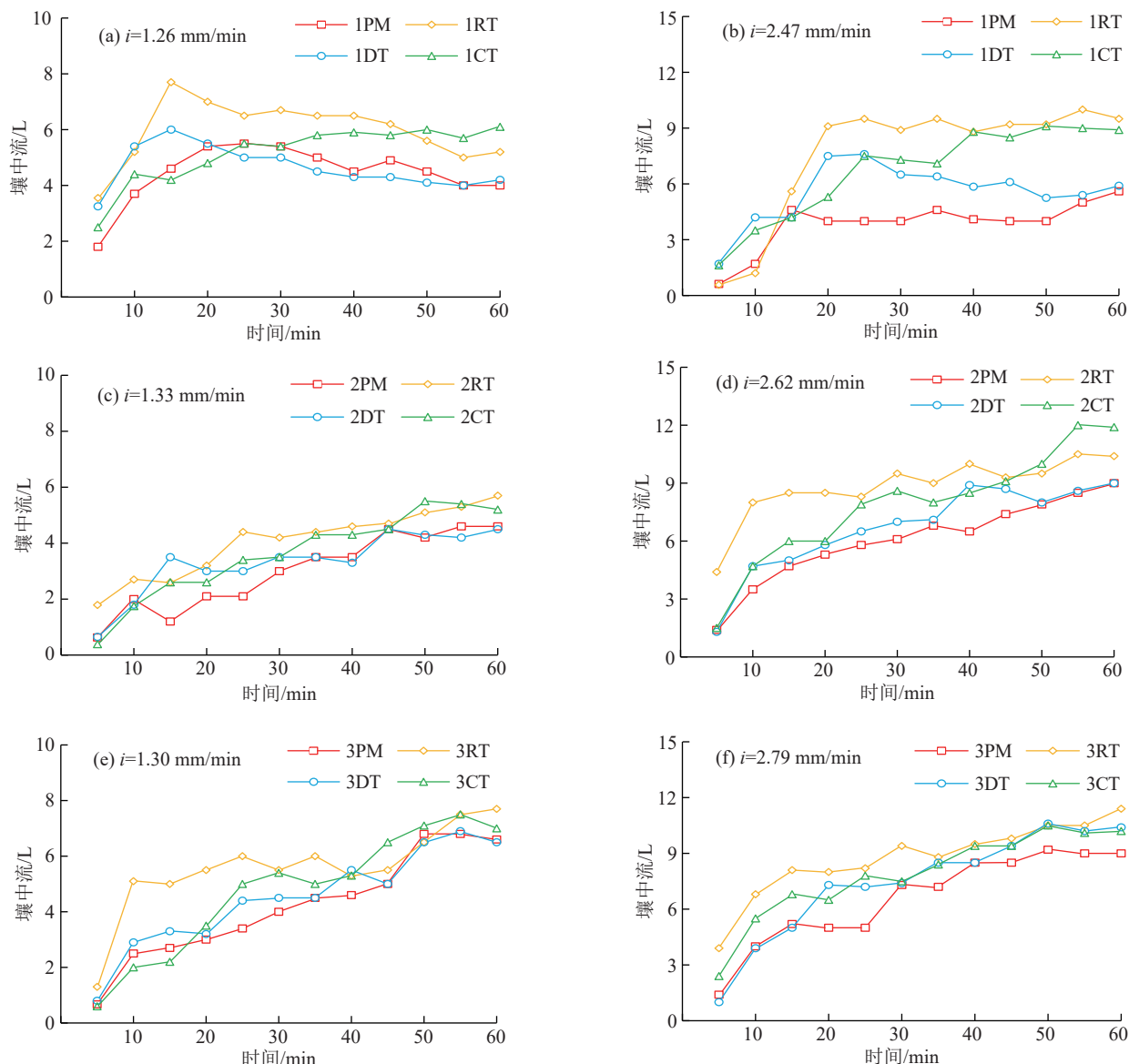


图3 不同耕作措施作物各生育期壤中流变化过程

Fig. 3 The dynamic processes of interflow across different crop growth stages under various tillage practices

2.2 不同耕作措施坡面侵蚀过程变化

降雨强度是影响坡面侵蚀产沙量的重要因素之一,在不同降雨强度下,产沙量随降雨历时的变化均存在较大波动性,总体表现为随降雨强度的增加侵蚀泥沙的波动性和产沙量也越大。图4为降雨侵蚀条件下不同耕作措施试验小区在作物生育期产沙量变化过程。从图4可看出,坡面侵蚀产沙量波动性最大的是DT,其次为CT,波动性相对较小的是PM和RT。在降雨侵蚀过程中,除个别时段外,DT侵蚀产沙量过程曲线均位于其他耕作措施的上方,表明在整个侵蚀产沙过程中,DT侵蚀产沙量均较大。降雨侵蚀过程不同耕作措施间产沙量峰值表现出较大差异。具体来看,在不同作物生育期中雨条件下DT的产沙量峰值为15.52 g,相比PM、RT、CT分别增大9.09、3.55、1.94倍,在大雨条件下DT

的产沙量峰值则为49.46 g,相比其余耕作措施分别增大8.47、7.29、1.33倍。同时,作物不同生育期间的产沙量也存在显著差异,在穗期的产沙量最大,相比苗期和花粒期分别增大1.03、2.12倍。综合分析来看,PM和RT对红壤坡耕地的减蚀效应最好,而CT和DT的减蚀效应相对较差,作物生育期中,穗期的侵蚀产沙量最大,是红壤坡耕地水土流失防控的关键时期。

2.3 不同耕作措施地表/壤中流产流及产沙总量

表1为作物生育期间不同耕作措施下产流产沙总量及地表径流和壤中流占总径流量的比例。由表1可知,耕作措施、作物生育期和降雨强度及其三者的交互作用对红壤坡耕地产流产沙总量均存在显著影响($p < 0.05$)。在整个降雨侵蚀过程中,地表径流总量大小关系为PM>DT>CT>RT,而壤中流总

量则为 $RT>CT>DT>PM$ 。作物全生育期内PM、RT、DT和CT的地表径流量相比壤中流量分别增大1.04~1.80、0.45~0.62、0.96~1.27、0.76~0.90倍,且随降雨强度的增加,地表径流、壤中流均呈增大趋势($p<0.05$)。其次,不同耕作措施处理的地表径流和壤中流分配存在显著差异性($p<0.05$),具体来说,PM、RT、DT和CT的地表径流分别占总径流量的60.6%、34.9%、53.4%、45.8%。在6次降雨过程中,

不同耕作措施侵蚀产沙总量大小关系为 $DT>CT>RT>PM$,其中以DT为最大,相比PM、RT和CT分别增大8.28、6.09、2.00倍。综合分析结果表明,RT的抗侵蚀能力效果显著,在4种耕作措施中地表径流量最小,具有很好的保土性能;DT的抗侵蚀能力最差,PM虽然地表径流量最大,但通过覆膜耕作明显提高抗侵蚀能力,覆膜对土壤侵蚀起到抑制作用,由此降低侵蚀产沙量。

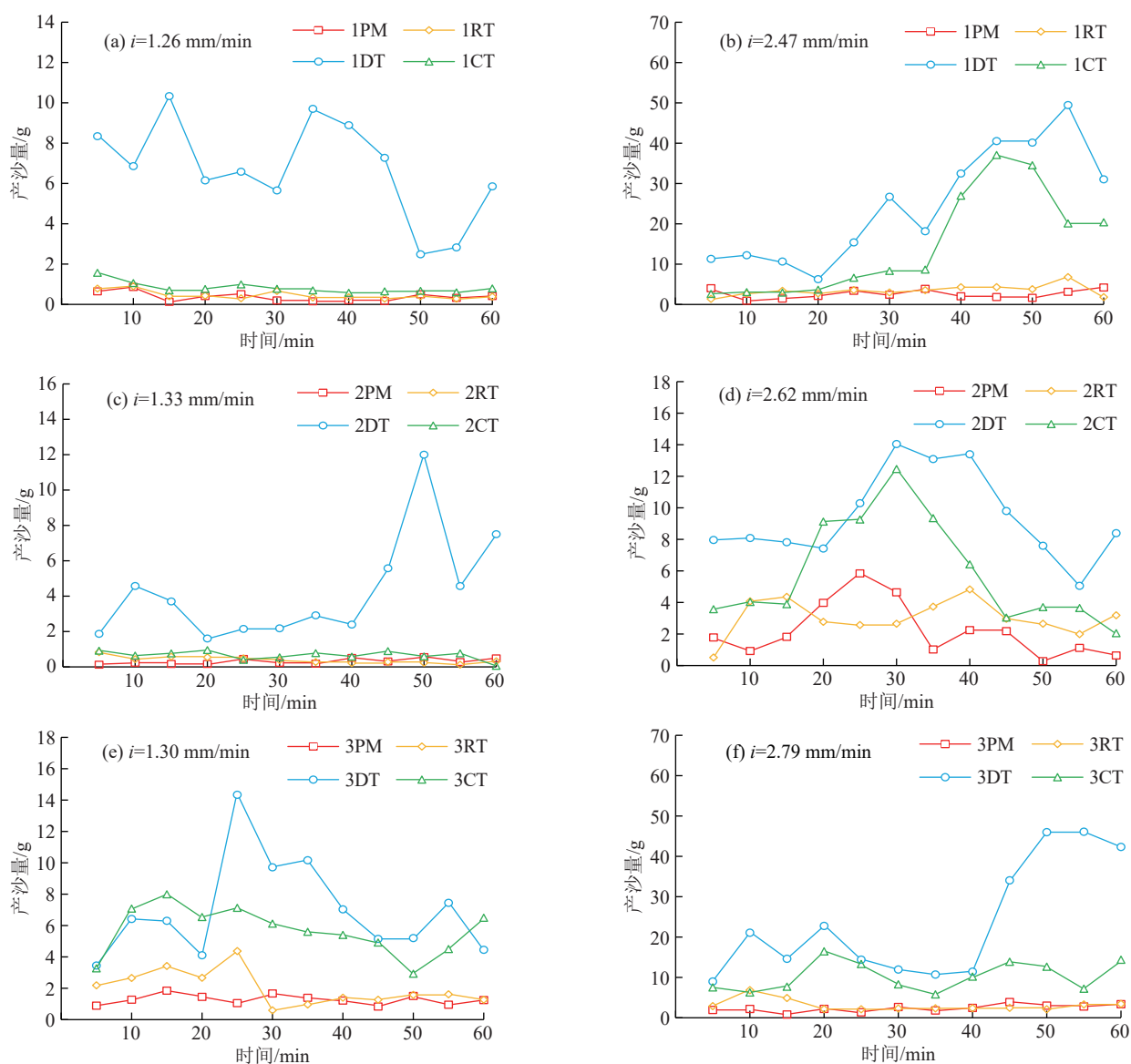


图4 不同耕作措施作物各生育期侵蚀产沙变化过程

Fig. 4 The dynamic processes of sediment yield across different crop growth stages under various tillage practices

2.4 不同耕作措施土壤有机碳流失/淋失特征

由表2可知,耕作措施、作物生育期和降雨强度及其三者的交互作用对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失均存在显著影响($p<0.05$)。从图5可以看出,随着降雨强度的增加,红壤坡耕地土壤中有机碳流失/淋失总量显著增加($p<0.05$),且流失/淋失总量在不同耕作措施下表现出显著性差异。具体而

言,在4种耕作措施中,RT能够有效抑制有机碳的流失/淋失,在作物全生育期下的有机碳流失/淋失总量相比PM、DT和CT分别减少23.3%、52.8%、32.2%($p<0.05$),耕作措施间有机碳流失总量从大小关系为 $DT>CT>PM>RT$ 。其次,在不同作物生育期间有机碳的流失/淋失总量也表现出一定的差异,以穗期的有机碳流失/淋失总量最大,相比花粒期和苗

期分别增大 45.5%、248.2%，生育期间有机碳流失/淋失总量大小关系为穗期>花粒期>苗期。对比各有机碳流失/淋失途径，在作物全生育期地表径流有机碳流失总量为 41.60 g，相比壤中流淋失总量和侵蚀泥沙中有机碳流失总量分别增加 209.3%、117.2%。由地表径流、泥沙和壤中流引发的有机碳流失/淋失量分别占总损失量的 56.1%、25.8%、18.1%，其中以地表途径导致有机碳流失的总量占总损失量的 81.9%，是红壤坡耕地有机碳损失的主要途径。表明在 4 种耕作措施中 RT 可有效阻控有机碳的损失，其次为 PM 和 CT，DT 的有机碳流失阻控效果最差。

表 1 不同耕作措施下产流产沙总量及地表径流、壤中流占总径流量的比例

Table 1 Total amounts of runoff and sediment yield under different tillage practices, and the proportions of surface runoff and interflow in the total runoff

生育期	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	地表径流量/L				壤中流量/L				产沙量/g			
		PM	RT	DT	CT	PM	RT	DT	CT	PM	RT	DT	CT
苗期	1.26	65.15± 3.05c	35.20± 3.64a	61.00± 2.74c	47.30± 3.20b	64.80± 1.24b	93.35± 3.95d	68.75± 0.41a	73.50± 2.07c	4.53± 0.42a	5.54± 0.43d	80.96± 0.60b	9.83± 0.94c
	2.47	134.40± 1.81d	60.33± 4.56a	107.80± 6.60c	78.13± 7.73b	54.72± 5.48a	107.07± 3.91a	75.60± 3.49b	87.82± 7.67c	31.12± 0.93a	41.30± 1.01d	294.39± 0.53b	174.94± 2.03c
花粒期	1.33	61.10± 1.26c	32.60± 4.93a	49.50± 4.36b	43.80± 2.34b	44.93± 4.94a	63.69± 2.93c	48.75± 0.18a	54.44± 0.73b	3.69± 0.62c	4.71± 0.34a	51.05± 1.64d	7.87± 1.04b
	2.62	127.70± 5.76c	69.90± 5.81a	109.80± 8.66b	90.00± 3.27b	80.40± 2.97ab	123.90± 3.38c	87.00± 2.48b	106.70± 1.67a	26.47± 1.51b	36.29± 1.01a	112.95± 2.27d	70.54± 2.52c
穗期	1.30	74.50± 5.19c	41.20± 5.82a	63.60± 2.33b	56.00± 4.65b	58.47± 0.90ab	84.90± 0.47c	63.50± 1.62b	65.10± 1.49a	15.33± 1.04b	24.00± 1.73c	83.77± 1.35a	67.98± 2.60d
	2.79	140.50± 4.79d	80.40± 2.67a	113.50± 7.21c	99.70± 4.81b	89.10± 2.72a	122.30± 0.89d	97.90± 1.06b	104.40± 0.50c	28.42± 2.89c	37.15± 0.83a	284.42± 2.58b	123.35± 5.22d
占比/%		60.6	34.9	53.4	45.8	39.4	65.1	46.6	54.2	—	—	—	—
ANOVA 显著性 分析	P			**				**				**	
	T			**				**				**	
	I			**				**				**	
	P×T			**				**				**	
	P×I			**				**				**	
	T×I			**				**				**	
P×T×I				**				**				**	

注：P 为耕作措施；T 为作物生育期；I 为降雨强度；同行不同小写字母表示相同降雨强度条件下不同耕作措施间差异显著 ($p < 0.05$)；** 表示不同处理之间差异显著 ($p < 0.01$)。下同。

表 2 不同耕作措施、生育期和降雨强度对有机碳流失/淋失影响的显著性水平

Table 2 The significance levels of the impacts of different tillage practices, crop growth stages, and rainfall intensities on the loss/leaching of organic carbon

有机碳损失途径	P	T	I	P×T	P×I	T×I	P×T×I
地表径流有机碳流失	**	**	**	**	**	**	**
壤中流有机碳淋失	**	**	**	**	**	**	**
侵蚀泥沙中有机碳流失	**	**	**	**	**	**	**
有机碳流失/淋失总量	**	**	**	**	**	**	**

3 讨论

3.1 耕作措施对红壤坡耕地产流产沙过程的影响

红壤坡耕地属于典型的“雨养农业”区，土壤水分补给主要依赖自然降雨，导致降雨成为该区域产流产沙的主要驱动因素^[6,14]。本文研究表明，降雨初期地表径流量与壤中流量均较小，后随着降雨的持续进行，地表径流与壤中流产流量逐步增加，其中壤

中流的响应更为迅速。该现象是由于红壤坡耕地在降雨产流过程中，土壤的初始入渗率较大，降雨初期的雨量主要满足土壤入渗，此时入渗水量首先用于填充土壤孔隙，因此降雨初期地表径流和壤中流均相对较小；但随着降雨入渗过程的持续进行，土壤孔隙不断被水分填充至饱和状态，首先导致壤中流的快速增长。同时，随着降雨的持续进行，土壤中的

黏粒颗粒吸附水分和胀缩会填充原有孔隙,进一步降低土壤入渗率,地表径流量才开始逐渐增加。其次,本研究还发现,不同耕作措施在降雨过程径流的分配上存在显著差异。在4种耕作措施中,PM与DT在降雨过程中产流形式以地表径流为主,是由于PM耕作措施条件下地表较光滑,促进地表径流的形成,但地表覆膜对土壤形成良好的保护屏障,可以抑制坡耕地表层土壤的流失,这也是PM条件下产流量较大而产沙量较小的原因^[25];而DT的垄沟方向与坡面水流方向相同,不仅为地表径流的汇集和流动提供天然的通道,而且随着降雨的持续进行,垄沟内汇

集的地表径流量和水流功率均明显增加,集中的股流对土壤侵蚀的动力得到加强,由此导致径流对垄沟底及两侧的土壤冲刷强度变大,加剧垄沟内的土壤侵蚀过程^[26]。相比之下,RT的径流量则主要以壤中流为主,与LI等^[27]的研究结果一致。是由于RT的横向垄沟与坡面水流方向垂直,对坡耕地地表径流起到阻挡作用,径流在垄沟内汇集现象明显,有利于增加水分的竖向流动(土壤入渗过程),而地表的水力功率和侵蚀动力得到削减,从而增加壤中流量,由此显著减少红壤坡耕地地表土壤侵蚀过程^[28]。

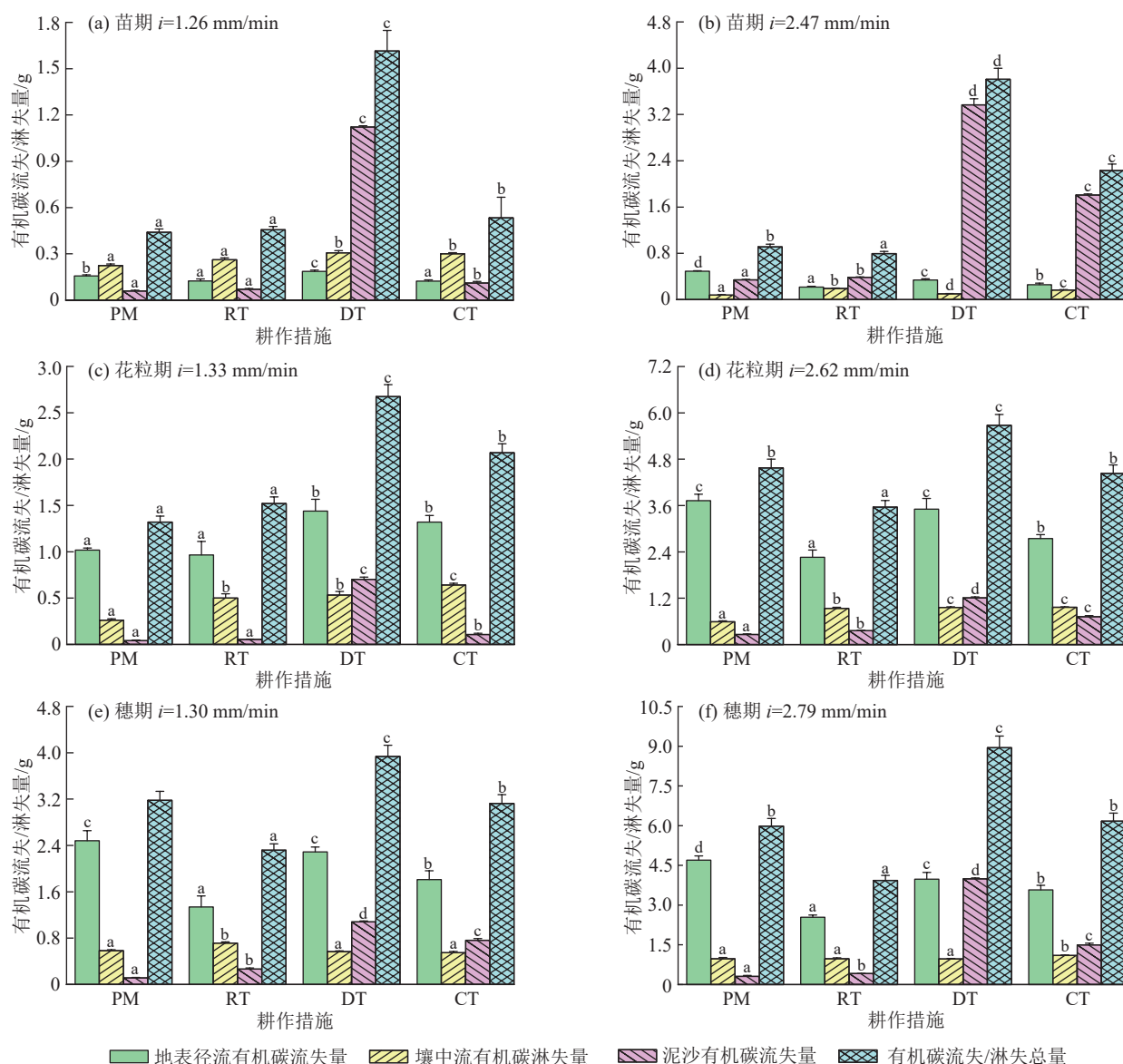


图5 不同耕作措施土壤有机碳流失/淋失量变化

Fig. 5 Changes in soil organic carbon loss/leaching under different farming practices

3.2 耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失的影响

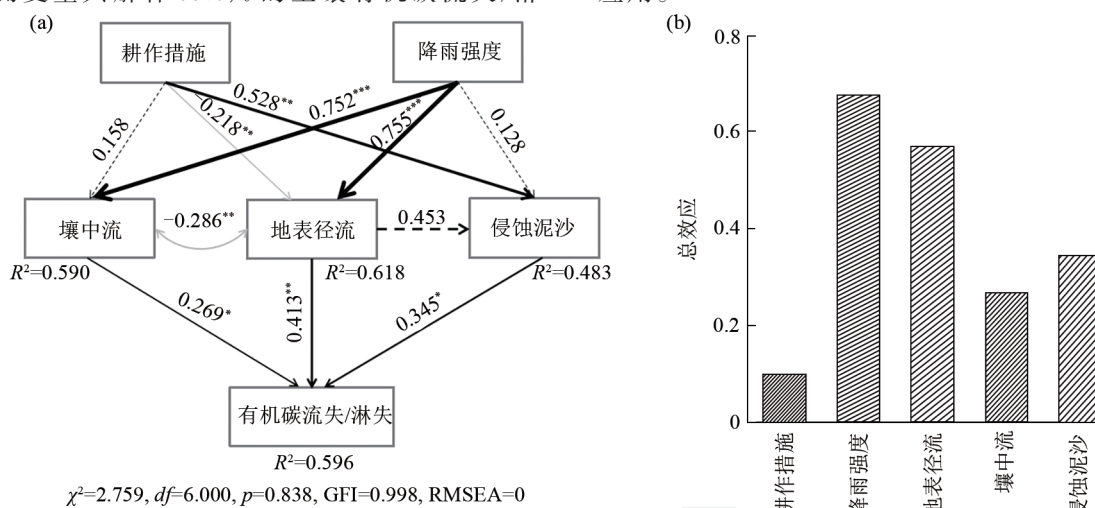
土壤有机碳作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分,其含量受到有机碳矿化速率及水土流失/淋

失过程的显著影响,其中土壤有机碳流失/淋失成为碳损失的重要途径,对农田碳汇过程和土地肥力的保持具有潜在的不利影响^[7]。红壤坡耕地其特殊的地形条件,耕作本身导致土壤结构破坏,改变地表粗

糙程度影响较显著,增加土壤中有机物氧化分解及改变土壤理化特性,影响水分下渗导致降雨侵蚀作用下土壤中有机碳发生流失/淋失。本研究结果表明,有机碳流失/淋失量随降雨强度的增大而增加,地表径流和侵蚀产沙是土壤有机碳损失的主要途径。一方面是由于土壤有机碳主要聚集于土壤表面,更容易在地表径流侵蚀作用下流失,从而壤中流中有机碳浓度较低;另一方面,是由于强降雨条件下,水力侵蚀强度加剧,大团聚体破碎,大孔隙流通道被土壤破碎产生的细颗粒阻塞,最终减少壤中流中有机碳的淋失迁移。

鉴于耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失过程的影响主要体现在对地表径流、壤中流和侵蚀泥沙量的调控效应上,为进一步揭示耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失影响的复杂耦合关系,本研究采用结构方程模型来量化耕作措施-降雨强度-坡面产流产沙-土壤有机碳流失/淋失量间的驱动与耦合关系。通过选取变量(耕作措施、降雨强度、壤中流、地表径流量、泥沙量、有机碳流失量)拟合得到结构方程模型。从图 6 可以看出,5 个观测变量共解释 59.6% 的土壤有机碳流失/淋

失量变化,影响总效应为 1.960。具体而言,地表径流、壤中流和侵蚀泥沙对有机碳淋失/淋失均呈显著直接影响($p < 0.05$),而降雨强度和耕作措施则通过对三者造成差异间接影响有机碳流失/淋失。在直接效应中,地表径流的影响系数最大,其次为侵蚀泥沙和壤中流。上述结果进一步表明,红壤坡耕地在降雨产流产沙过程中,地表径流量是影响土壤有机碳流失的主要因素,红壤坡耕地土壤有机碳主要通过地表径流和侵蚀泥沙产生损失。也是在 4 种耕作措施中 RT 的有机碳流失/淋失量显著小于其余耕作措施的主要原因,与安龙龙等^[14]研究结果一致。PM 减少有机碳流失的效果相比 DT 和 CT 更好,主要是由于 PM 相对于裸地面,地表形成物理屏障可抑制径流冲刷,控制有机碳赖以附着的物理载体,而有效防止土壤中有机碳的流失。相比之下,DT 因促进地表径流汇集,导致径流量增加,进而加剧有机碳流失。综上所述,RT 通过有效减少地表径流和泥沙侵蚀,显著降低有机碳流失,是红壤坡耕地提高农业生产力和实现可持续耕作的科学合理措施,可在红壤坡耕地耕作利用中优先推广应用。



注:***表示相关程度在 $p < 0.001$ 显著性水平(双侧);**表示相关程度在 $p < 0.01$ 显著性水平(双侧);*表示相关程度在 $p < 0.05$ 显著性水平(双侧);黑色和灰色箭头分别表示正向效应和负向效应;实线和虚线分别表示显著效应和不显著效应;数字表示标准路径系数;箭头宽度与关系强弱呈正比; R^2 表示通径解释度。

图 6 耕作措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失/淋失影响的结构方程

Fig. 6 Structural equation of the effect of tillage practices on soil organic carbon loss/leaching in red soil slope farmland

4 结论

1)在相同降雨历时下,降雨强度越大,达到稳定产流状态的历时越短。除个别时段外,PM地表径流过程曲线均位于其他耕作措施的上方,而RT则位于最下方。地表径流总量大小关系为 $PM > DT > CT > RT$,PM、RT、DT和CT小区地表径流分别占总径流量的60.6%、34.9%、53.4%、45.8%,PM、DT产流形

式以地表径流为主,RT、CT以壤中流为主。

2)降雨过程壤中流变化存在一定的波动性,除个别时段外,RT壤中流过程曲线均位于其他耕作措施的上方,而PM则位于最下方。不同耕作措施壤中流总量存在显著差异($p < 0.05$),其大小关系为 $RT > CT > DT > PM$,RT在减缓地表径流的同时,显著增加壤中流产流量。

3)降雨过程侵蚀产沙量存在明显的波动性,除个别时段外,DT的侵蚀产沙量过程曲线均位于其他耕作措施的上方。不同耕作措施侵蚀产沙总量大小关系为 $DT > CT > RT > PM$,其中以DT为最大,相比PM、RT和CT分别增大8.28、6.09、2.00倍,RT具有较好的抗侵蚀能力。

4)耕作措施、作物生育期和降雨强度及其三者的交互作用对土壤有机碳流失/淋失均存在显著影响($p < 0.05$)。不同耕作措施土壤有机碳流失/淋失总量大小关系为 $DT > CT > PM > RT$,RT可有效减少土壤有机碳损失,而DT对土壤有机碳流失的防控效果最差。地表径流、泥沙和壤中流引发的有机碳流失/淋失量分别占总损失量的56.1%、25.8%、18.1%,耕作措施和降雨强度均可通过影响地表径流量、壤中流量及侵蚀泥沙量进而对土壤有机碳流失/淋失过程产生间接影响。

参考文献:

- [1] 林洪羽,周明华,张博文,等.生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(1):96-103.
LIN H Y, ZHOU M H, ZHANG B W, et al. Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 96-103.
- [2] 梁超,朱雪峰.土壤微生物碳泵储碳机制概论[J].中国科学:地球科学,2021,51(5):680-695.
LIANG C, ZHU X F. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2021, 51(5): 680-695.
- [3] 熊子怡,郑杰炳,王丹,等.不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征[J].环境科学,2021,42(2):967-976.
XIONG Z Y, ZHENG J B, WANG D, et al. Characteristics of dissolved organic carbon loss in purple soil sloping fields with different fertilization treatments[J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 967-976.
- [4] AN L L, ZHENG Z C, LI T X, et al. Quantity and quality characteristics of DOM loss in sloping cropland under natural rainfall in southwestern China[J]. Catena, 2024, 240: e108000.
- [5] CHEN Z F, SHI D M. Spatial structure characteristics of slope farmland quality in plateau mountain area: A case study of Yunnan Province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(17): e7230.
- [6] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
PENG Y, ZHOU B B, CHEN X P, et al. Study on the mechanism of soil, water and nutrient loss on loess slope under interval rain events[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 54-60.
- [7] 周也琛,邵明安,魏孝荣,等.黄土高原土壤有机碳库对植被恢复的响应及其影响因素研究进展[J].水土保持研究,2024,31(6):395-405.
ZHOU Y, SHAO M A, WEI X R, et al. Response of soil organic carbon pool to vegetation restoration and its influencing factors in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 395-405.
- [8] 马文明,李忠武,丁克毅,等.水力侵蚀作用下土壤有机碳库稳定性机制研究进展[J].中国水土保持科学,2020,18(1):125-130.
MA W M, LI Z W, DING K Y, et al. Advances in the study of the stability of soil organic carbon storage affected by water erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 125-130.
- [9] SARKODIE S A, OWUSU P A, LEIRVIK T. Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(3): e034049.
- [10] 刘兵,刘煜,郝卓,等.自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对碳迁移及固碳的影响机制[J].水土保持学报,2025,39(1):229-238.
LIU B, LIU Y, HAO Z, et al. Mechanisms of the effects of carbon source addition on carbon transport and sequestration in purple soil sloping farmland under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 229-238.
- [11] 颜科宇,李靖,陈正发,等.耕作措施对红壤坡耕地土壤CO₂排放的影响[J].水土保持研究,2025,32(2):140-149.
YAN K Y, LI J, CHEN Z F, et al. Effects of tillage measures on soil CO₂ emission from sloping farmland in red soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 140-149.
- [12] 费凯,张丽萍,邓龙洲,等.极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征[J].土壤学报,2020,57(3):623-635.
FEI K, ZHANG L P, DENG L Z, et al. Carbon loss with slope surface runoff and interflow on bare slopes as affected by severe rainstorm[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 623-635.
- [13] WANG L H, YEN H, WANG X, et al. Deposition- and transport-dominated erosion regime effects on the loss of dissolved and sediment-bound organic carbon: Evaluation in a cultivated soil with laboratory rainfall simulations[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: e141717.
- [14] 安龙龙,郑子成,王永东,等.耕作措施对玉米生长期黄壤坡耕地径流及可溶性有机碳流失的影响[J].水土保持

- 持学报, 2022, 36(5): 75-81.
- AN L L, ZHENG Z C, WANG Y D, et al. Effects of tillage practices on runoff and dissolved organic carbon loss from yellow soil sloping farmland during maize growth periods[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 75-81.
- [15] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 728-736.
- WU J, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 728-736.
- [16] 王鹏飞, 郑子成, 张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 30-34.
- WANG P F, ZHENG Z C, ZHANG X Z. Changes of soil surface roughness and its effects on rill erosion in slope of cross ridge at seedling stage of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 30-34.
- [17] ZHENG H J, NIE X F, LIU Z, et al. Identifying optimal ridge practices under different rainfall types on runoff and soil loss from sloping farmland in a humid subtropical region of Southern China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: e107043.
- [18] LI C S, LI J G, TANG Y L, et al. Stand establishment, root development and yield of winter wheat as affected by tillage and straw mulch in the water deficit hilly region of southwestern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(7): 1480-1489.
- [19] 王小康, 谷举, 刘刚, 等. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 430-439.
- WANG X K, GU J, LIU G, et al. The influence of transverse and longitudinal ridge tillage on soil erosion and deposition cycles for mollisol slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 430-439.
- [20] 张杰豪, 梁心蓝, 黄洪粮, 等. 不同耕作措施对花生结荚期产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 71-78.
- ZHANG J H, LIANG X L, HUANG H L, et al. Effects of different tillage practices on the yield of runoff and sediment in peanut podding stage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 71-78.
- [21] YAN Y J, TU N, CEN L P, et al. Characteristics and dynamic mechanism of rill erosion driven by extreme rainfall on karst plateau slopes, SW China[J]. Catena, 2024, 238: e107890.
- [22] HE S Q, MA R, WANG N N, et al. Comparison of nitrogen losses by runoff from two different cultivating patterns in sloping farmland with yellow soil during maize growth in southwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(1): 222-234.
- [23] LI J Y, LIU S G, FU B J, et al. Dissolved carbon fluxes in a vegetation restoration area of an eroding landscape[J]. Water Research, 2019, 152: 106-116.
- [24] LIU J Y, LI T Y, HE B H, et al. Effects of quantitative fertilization and straw mulch on runoff nitrate- and ammonium-nitrogen losses under natural rainfall events in purple soil sloping croplands, southwest China[J]. Ecological Engineering, 2024, 201: e107196.
- [25] MA Y C, LI Z W, DENG C X, et al. Effects of tillage-induced soil surface roughness on the generation of surface-subsurface flow and soil loss in the red soil sloping farmland of southern China[J]. Catena, 2022, 213: e106230.
- [26] PARSONS A J, STONE P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion[J]. Catena, 2006, 67(1): 68-78.
- [27] LI J X, YAN K Y, DUAN Q S, et al. Effects of tillage practices on water storage and soil conservation in red soil slope farmland in southern China[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): e28781.
- [28] 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.
- 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.