水力侵蚀条件下红壤和堎土有机碳的流失特征

柯明成[1], 乔务通[1], 丁腾飞[1], 文 艳[2], 孙贯芳[1], 李永红[1], 陈庆伟[2], 高照良[1]
(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院 水土保持与荒漠化整治全国
重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘 要: [目的] 探究不同土壤类型和冲刷流量对土壤有机碳流失特征的影响,明确其变化规律与作用机制,为不同土壤类型区水土流失防控及土壤有机碳库保护提供科学依据和实践参考。[方法] 以红壤和堎土为研究对象,采用人工模拟放水冲刷试验,设计2,3,4和5 L/min共4个流量梯度,系统分析水力侵蚀过程中泥沙有机碳含量、富集比及流失速率的变化特征。[结果] ①冲刷过程中泥沙有机碳含量随冲刷历时呈现先上升后下降趋势,泥沙有机碳富集比随冲刷流量的增加而降低,并与土壤侵蚀强度呈现显著对数函数递减关系($p<0.05$)。低流量下(2 L/min),红壤与堎土泥沙有机碳富集比全时段均大于1,均值分别为1.13和1.09,表现为富集效应;高流量下(5 L/min),两者泥沙有机碳富集比在各时间段均小于1,均值分别为0.92和0.95,表现为稀释效应。②红壤与堎土的有机碳流失速率均随冲刷流量增大而增大,5 L/min流量下,红壤、堎土有机碳平均流失速率分别为其他流量条件的1.88~4.70倍和1.98~7.62倍。各冲刷流量下堎土平均有机碳流失速率均高于红壤,为红壤的1.05~1.70倍。两种土壤泥沙有机碳流失速率随冲刷历时整体呈现多峰多谷交替的变化特征。③红壤和堎土有机碳流失强度均随着土壤侵蚀强度的增加而增加,呈现显著线性正相关关系($p<0.05$)。[结论] 冲刷流量和土壤类型显著影响土壤有机碳流失,土壤侵蚀强度与有机碳流失强度密切相关。

关键词: 水力侵蚀; 泥沙有机碳; 有机碳流失速率; 红壤; 堎土
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0240-10 **中图分类号:** S157.1, S153.6

文献参数: 柯明成, 乔务通, 丁腾飞, 等.水力侵蚀条件下红壤和堎土有机碳的流失特征[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 240-249. Ke Mingcheng, Qiao Wutong, Ding Tengfei, et al. Organic carbon loss characteristics of red soil and Lou soil under hydraulic erosion conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 240-249.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.034 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.034**

Organic carbon loss characteristics of red soil and Lou soil under hydraulic erosion conditions

Ke Mingcheng[1], Qiao Wutong[1], Ding Tengfei[1], Wen Yan[2],
Sun Guanfang[1], Li Yonghong[1], Chen Qingwei[2], Gao Zhaoliang[1]
(1.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2.*Economic & Technology Research Institute of StateGrid Shandong Electric Power Company, Jinan, Shandong* 250021, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of different soil types and scouring flow rates on the characteristics of soil organic carbon loss were investigated, and the corresponding variation patterns and mechanisms were clarified, in order to provide a scientific basis and practical reference for soil and water loss control and soil organic carbon pool conservation in regions with different soil types. [Methods] Taking red soil and Lou soil as research objects, artificial simulated runoff scouring experiments were conducted with four flow rate gradients of 2, 3, 4 and 5 L/min to systematically analyze the variation characteristics of sediment organic carbon content, enrichment ratio and loss rate during hydraulic erosion. [Results] ① During the scouring process, the sediment organic carbon content

收稿日期:2026-02-03 **修回日期:**2026-03-31 **采用日期:**2026-04-11
资助项目:国家电网有限公司总部管理科技项目"输变电工程水土保持措施碳汇途径及其固碳能力研究"(5200-202416091A-1-1-ZN)
第一作者:柯明成(2001—),男(汉族),湖北省黄冈市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与有机碳流失。Email:bxmkmc0622@163.com。
通信作者:高照良(1969—),男(汉族),河南省灵宝市人,博士,研究员,主要从事水土保持方向研究。Email:gzl@ms.iswc.ac.cn。

showed a trend of first increasing and then decreasing with scouring duration. The enrichment ratio of sediment organic carbon decreased with increasing scouring flow rate, and presented a significant logarithmic decreasing relationship with soil erosion intensity ($p<0.05$). Under low flow rate (2 L/min), the sediment organic carbon enrichment ratios of red soil and Lou soil were all greater than 1 throughout the entire scouring period, with average values of 1.13 and 1.09, respectively, showing a significant enrichment effect. Under high flow rate (5 L/min), the enrichment ratios of sediment organic carbon of both soils were less than 1 during all time periods, with average values of 0.92 and 0.95, respectively, showing a dilution effect. ② The organic carbon loss rates of both red soil and Lou soil increased with increasing scouring flow rate. Under the flow rate of 5 L/min, the average organic carbon loss rates of red soil and Lou soil were 1.88—4.70 times and 1.98—7.62 times of those under other flow conditions, respectively. The average organic carbon loss rate of Lou soil was higher than that of red soil under each scouring flow rate, which was 1.05—1.70 times of that of red soil. The sediment organic carbon loss rates of the two soils exhibited an overall alternating pattern of multiple peaks and valleys with scouring duration. ③ The organic carbon loss intensity of both red soil and Lou soil increased with the increase of soil erosion intensity, showing a significant positive linear correlation ($p<0.05$). [Conclusion] Scouring flow rate and soil type have significant effects on soil organic carbon loss, and soil erosion intensity is closely related to organic carbon loss intensity.

Keywords: hydraulic erosion; sediment organic carbon; organic carbon loss rate; red soil; Lou soil

土壤有机碳库是陆地生态系统中规模最大的有机碳储库,其碳储量占陆域碳循环总碳量的80%,对维系全球碳循环的稳定性,调控大气CO_2浓度平衡具有不可替代的关键作用。水力侵蚀可通过改变有机碳的输入、输出过程与空间再分布格局造成土壤有机碳的流失[1-2],还能显著影响有机碳的矿化速率与稳定性特征,进而对全球碳收支平衡产生重要影响[3]。目前,土壤侵蚀所引发的有机碳流失是全球碳循环的研究重点,同时也是侵蚀机理研究中相对薄弱的环节[4]。

黄土区和红壤地区作为中国水土流失面积最广、程度最严重的区域之一,是土壤侵蚀防治和水土保持工作的重点区域[5-6]。中国是全球黄土分布最广泛、沉积最厚的区域,其中黄河中游地区黄土覆盖面积最广,构成了独特的黄土高原地貌。黄土是第四纪以来以风积作用为主要作用形成的沉积产物,其颜色呈黄至红黄色,结构疏松且孔隙发育,物质组成以粉砂为主,质地均匀,层理结构不显著,富含碳酸盐,碳酸钙常以胶膜形式包裹于粉尘颗粒表面,使松散堆积物具备一定胶结能力,并促进垂直节理的形成。黄土高原由于长期的过度砍伐、开垦和放牧活动,严重破坏了天然植被[7]。大部分土壤被侵蚀和流失,暴露出来的黄土层显示出较高的侵蚀敏感性,导致该地区由土壤侵蚀引发的土壤有机碳流失问题十分突出。南方红壤区以低山丘陵地貌为主,受地形陡峭及降水频繁等因素影响,尤其在暴雨频发的环境下,地表植被一旦受损,极易引发较强的水土流失,导致有机碳流失问题十分严重[8]。近年来,随着社会经济的持续增长,生产建设项目大规模发展,工程开挖、表土剥离等工程措施造成地面裸露,导致了土壤侵蚀的加重、生态环境的恶化[9],有机碳的流失问题变得越来越明显。在此背景下,深入探究黄土区和红壤区土壤水蚀作用下有机碳的流失机制,对推进水土保持与生态修复实践具有重要的科学价值。

以往的研究[10-11]表明,降雨特征、地形地貌、植被破坏等因素是引起土壤侵蚀的重要原因。土壤侵蚀是一个复杂的物理过程,主要受地形地貌[12-13]、土壤质地[14]、土地利用方式[15]、农田耕作方式[16]、植被覆盖度[17]、降雨和径流特征等[18-19]众多因子的影响。水力侵蚀所导致的有机碳迁移主要以泥沙作为输移载体。因此,影响土壤侵蚀过程的各类因子,同样对有机碳的流失动态产生显著影响。王文欣等[20]通过室内人工降雨模拟试验发现,降雨强度增加可显著加快泥沙有机碳流失速率并导致有机碳流失总量的增加。贾松伟等[21]发现,土壤有机碳流失程度与坡度呈明显的指数函数关系,有机碳流失程度随着坡度的增加而增加。郭太龙[4]针对水蚀环境下有机碳流失强度与土壤侵蚀强度的关联研究表明,二者存在显著线性正相关特征。总体而言,各类影响因素主要通过调控坡面土壤侵蚀强度,间接作用于有机碳流失强度。但是土壤有机质不同组分间密度存在差异,这使得有机碳在侵蚀过程中发生选择性迁移。这一特性导致各类影响因素对有机碳流失过程的作

用机制及表现特征并非完全一致。而以往研究往往仅针对某一种土壤进行分析，缺乏对不同土壤类型间有机碳流失特征的对比分析，限制了研究结果的适用性。因此，深入探究不同土壤坡面下有机碳的侵蚀过程与特征具有重要研究意义。基于上述背景，本文以南方红壤区红壤和黄土区垈土为研究对象，采用放水冲刷试验，分析水力侵蚀作用下有机碳的动态变化，探究冲刷流量对土壤有机碳富集比的影响，阐明土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度的关系。该研究有利于深入了解侵蚀作用对陆地生态系统碳循环过程的影响，同时对于合理布设水土保持措施和土地资源管理具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤样品分别采集自中国南北不同典型区域。红壤样品来源于江西省鄱阳县的自然坡面，位于东经116°23′45″—117°06′15″，北纬28°46′26″—29°42′03″。该地区属亚热带湿润气候，年平均降雨量为1 300～1 700 mm，降水主要集中在4—6月，其降雨量可占全年总量的50%以上。垈土样品采自陕西省杨凌示范区韦水河水土保持示范园的自然坡面，地处东经108°04′—108°07′，北纬34°12′—34°20′。该区域为大陆性季风气候，年均降水量为610.2 mm，蒸发量达1 505.3 mm，冬季最大积雪深度为23 cm。试验所用土壤基本性质详见表1。

表1 试验土壤基本性质

Table 1 Basic properties of test soils

土壤类型	土壤粒径组成及质量百分数/%			容重/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤有机碳含量/($g \cdot kg^{-1}$)
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002～0.050 mm)	砂粒(>0.050 mm)		
红壤	16.94	66.68	16.38	1.30	5.54±0.25
垈土	10.76	81.87	7.37	1.30	7.49±0.86

1.2 试验设计及方法

基于陕西省杨凌示范区和江西省鄱阳县降雨发生频率，结合黄土高原及江西丘陵降雨特征，试验设置冲刷流量为2，3，4，5 L/min(对应的降雨强度分别为1，1.5，2，2.5 mm/min)，径流冲刷历时设计为产流后60 min。基于前期野外调查分析，自然非耕地坡面坡度一般大于15°，因此设计试验坡度为20°。试验于2025年6—9月在杨凌马超岭高陡边坡水力侵蚀观测站进行，试验土槽规格为2.5 m×0.8 m×0.4 m，铁槽底部打有小孔，以模拟自然土壤水流下渗，在装置下端预留出水口，用以采样。填土前为保证每次试验坡面土壤含水量及容重等初始条件保持一致，采用人工配置土壤含水率。试验铁槽填土时，用土工布填充排水口后，在土槽底部铺设10 cm的细沙保证试验铁槽透水良好。为了保证填土的均匀性，在试验铁槽填土时，细沙之上采用分层填土，以每层10 cm填充试验铁槽，设计填土厚度为30 cm。在装填的同时对土壤表面进行打毛，使其接触面粗糙以防止试验过程中坡面存在软弱接触面，装填完成后对坡面进行整体修正。控制土壤容重与野外原始条件保持一致。

试验开始前，采用100 cm^3体积环刀分别在坡面坡上、坡中、坡下3个位置采集土样，用于测量土壤容重、含水率和有机碳含量。为保证冲刷流量一致性，每次试验前对设计的冲刷流量进行3次率定，当误差小于5%时开始试验。试验开始后，待坡面产流，记录产流时间，冲刷时间控制为产流后60 min。试验设置3个断面用以测定流宽、沟宽和流深，坡面流速用高锰酸钾示踪法测定，测速区间为0.5 m，用温度计测量水温，每组试验重复两次。在冲刷试验过程中，前6 min每隔1 min用精度为10 ml的1 000 ml取样瓶收集1次浑水样品，并用秒表记录取样时间；第6—45 min，每隔3 min收集1次；第45—60 min，每隔5 min收集1次。

1.3 样品处理及数据处理

原状土样：将坡面采集的土壤样品进行室内风干，然后碾磨过0.15 mm筛，采用重铬酸钾加热法测定土壤有机碳含量，用作坡面土壤有机碳背景值。

径流泥沙样：将接取的径流泥沙样先称重，待径流泥沙样中的泥沙沉淀后，将上清液缓慢倒出，然后将泥沙样品进行室内风干，风干后再次称取其质量，用于计算土壤侵蚀量。将风干后的土壤碾磨过0.15 mm筛，采用重铬酸钾加热法测定土壤有机碳含量，用于分析泥沙有机碳含量变化。

有机碳流失速率计算公式为

$$Vsoc = \frac{SOC * M}{T} \tag{1}$$

式中：$Vsoc$为有机碳流失速率(g/min)；SOC为泥沙中有机碳含量(g/kg)；M为径流泥沙的干重(kg)；T为接样时间(min)。

有机碳富集比计算公式[22]为

$$ER = \frac{C}{C_b} \tag{2}$$

式中：ER为有机碳富集比；C为泥沙中有机碳含量(g/kg)；C_b为试验土壤的有机碳含量(g/kg)。

1.4　数据处理

本文利用 Excel 2019 软件进行数据统计,利用 Origin 2025 和 SPSS 26.0 软件进行数据分析、处理和图形绘制。

2　结果与分析

2.1　侵蚀产泥有机碳含量及富集比变化特征

2.1.1　侵蚀过程中泥沙有机碳含量变化特征

由图 1 可知,泥沙有机碳含量随着冲刷时间呈现一定的规律,泥沙有机碳含量呈现先快速增加后随着冲刷历时总体下降的趋势,冲刷前期的泥沙有机碳含量较高,且大于后期泥沙有机碳含量。在低侵蚀强度下(2 L/min 冲刷流量),红壤和垄土有机碳含量变化范围分别为 5.56～7.30 g/kg 和 8.00～9.36 g/kg,各时间段泥沙有机碳含量均高于坡面土壤有机碳含量,表现为有机碳的富集。在高侵蚀强度下(5 L/min 冲刷流量),红壤和垄土有机碳含量变化范围分别为 4.71～5.74 g/kg 和 7.73～8.36 g/kg,各时间段泥沙有机碳含量均低于坡面土壤有机碳含量,表现为有机碳的稀释。

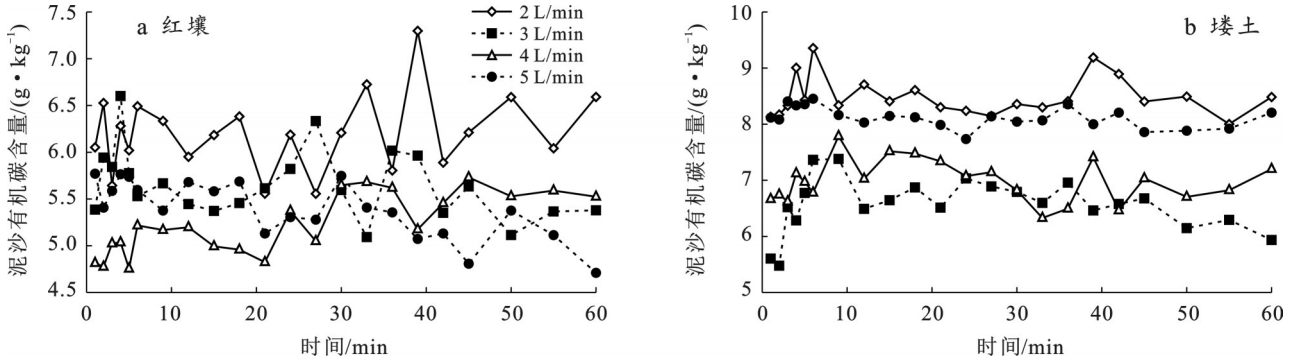

图 1　泥沙有机碳含量随冲刷历时的变化

Fig.1　Variation of sediment organic carbon content with scouring duration

将不同冲刷流量下泥沙有机碳含量和土壤流失速率进行拟合,得到泥沙有机碳含量与土壤流失速率之间的关系(图 2)。除在红壤 3 与 5 L/min 流量条件下有机碳含量变化规律不显著外,其余条件下泥沙有机碳含量均随着土壤流失速率的增加而下降,最后趋于稳定。这表明土壤侵蚀强度是影响泥沙有机碳含量的重要因子。这种变化趋势可归因于侵蚀过程中的颗粒分选机制:在低侵蚀强度下,土壤最先被冲刷的是高有机碳含量的细颗粒,导致泥沙有机碳含量呈现富集状态,泥沙有机碳含量较高;随着侵蚀程度的增加,迁移的颗粒粒径逐步增大,低有机碳含量的粗颗粒和细颗粒一起被冲刷,导致泥沙有机碳含量降低,呈现稀释状态。

2.1.2　侵蚀过程中泥沙有机碳富集比变化特征

不同冲刷流量条件下泥沙有机碳富集比随时间变化范围存在差异(图 3)。在 2,3,4 和 5 L/min 条件下,红壤泥沙有机碳富集比变化范围分别为 1.01～1.32,0.96～1.25,0.87～1.04 和 0.80～0.98,垄土泥沙有机碳富集比变化范围分别为 1.02～1.20,0.84～1.14,0.89～1.09,0.91～0.99。其中红壤、垄土在 2 L/min 冲刷流量下,整个冲刷时段泥沙富集比均大于 1,表明放水冲刷下泥沙存在明显的有机碳优先迁移和富集。相反,红壤和垄土在 5 L/min 冲刷流量下,整个冲刷时段富集比均小于 1,表现出明显的非选择性。而 3 和 4 L/min 条件下,径流泥沙有机碳富集比随冲刷时间在 1 上下波动变化。因此,放水冲刷条件下,泥沙有机碳的选择性迁移有 3 种迁移模式:高度选择性迁移(富集比均大于 1),一般选择性迁移(部分富集比大于 1),非选择性迁移(富集比均小于 1)。

2.2　侵蚀过程中泥沙有机碳富集比影响因素

2.2.1　泥沙有机碳富集比与冲刷流量的关系

红壤和垄土在不同冲刷流量下泥沙有机碳富集比变化规律基本一致,泥沙有机碳平均富集比随着冲刷流量的增加而降低(图 4)。在 2,3,4 和 5 L/min 条件下,红壤泥沙有机碳平均富集比分别为 1.13,1.07,0.95 和 0.92,垄土泥沙有机碳平均富集比分别为 1.09,1.01,0.97,0.95。其中红壤和垄土 2 和 3 L/min 条件下有机碳富集比平均值大于 1。这是因为在低冲刷流量下,发生迁移的大多为土壤表层富含有机碳的细颗粒,有机碳发生选择性迁移,泥沙中有机碳含量高于坡面有机碳含量,富集效果更明显。相反,在 4 和 5 L/min 条件下红壤和垄土有机碳富集比平均值小于 1,表明在高流量条件下,土壤细颗粒和粗颗粒一起发生迁移,导致有机碳较少发生选择性迁移,泥沙有机碳含量低于坡面有机碳含量,泥沙有机碳富集效果降低。

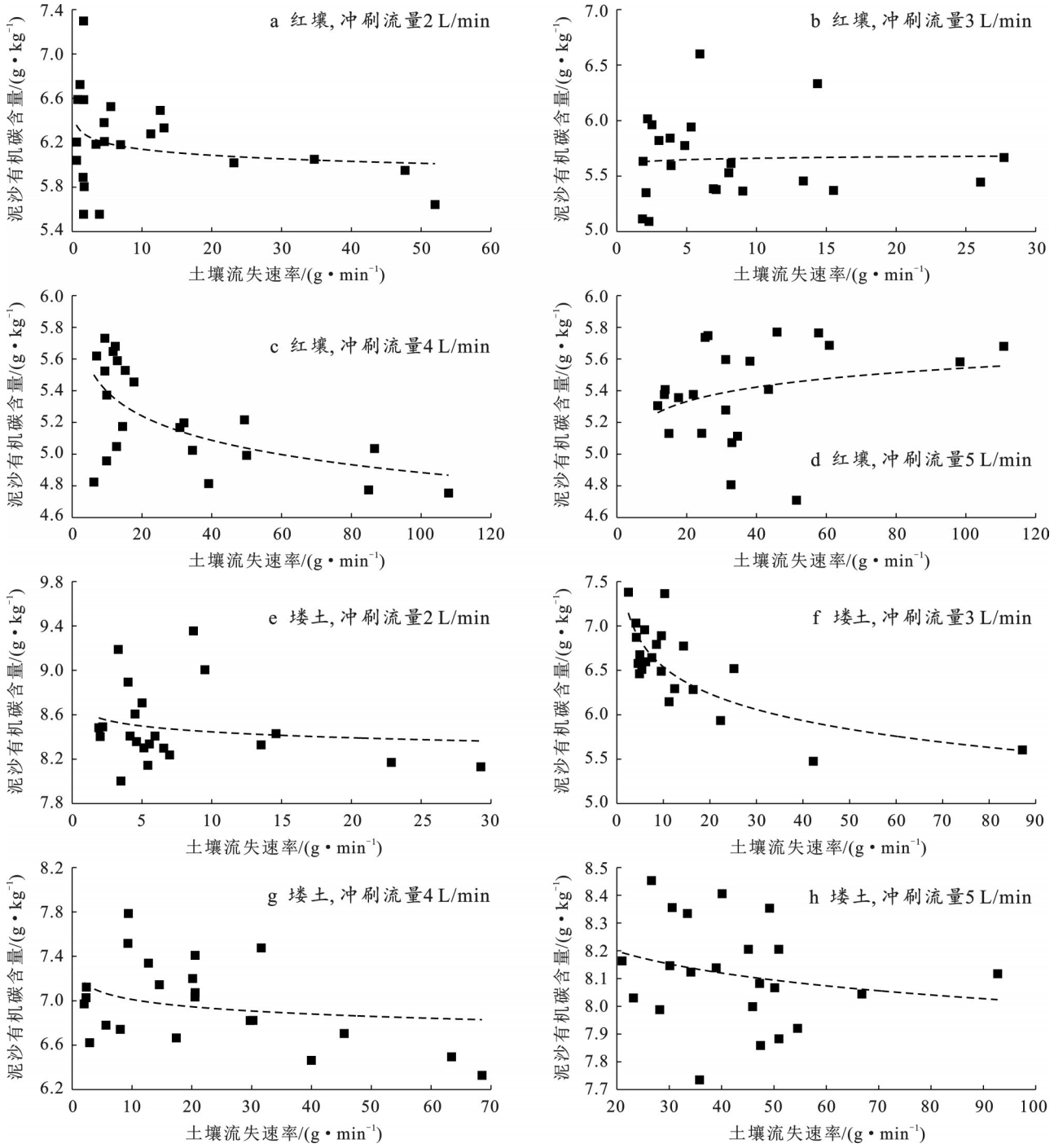

图2 泥沙有机碳含量随土壤流失速率的变化

Fig.2 Variation of sediment organic carbon content with soil loss rate

2.2.2 泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度的关系

为探究泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度的关系,将红壤和垄土所有冲刷场次的泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度进行拟合,得出泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度相关关系(图5)。两者的拟合公式为红壤:$y=0.75-0.05\ln(x)$($R^2=0.37$,$p<0.05$);垄土:$y=0.79-0.04\ln(x)$($R^2=0.41$,$p<0.05$)。拟合公式表明泥沙有机碳富集比随土壤侵蚀强度的增加呈现对数函数递减变化,两者存在显著负相关关系。

2.3 土壤有机碳流失速率变化特征

土壤有机碳流失过程较为复杂,流失速率曲线变化较大。由于不同下垫面土壤理化性质存在差异,各下垫面土壤有机碳流失速率有着不同的变化规律。由图6可知,在2,3和4 L/min流量下,红壤泥沙有机碳流失速率在冲刷初期迅速增大,分别在5和10 min附近达到最大值后(为0.293,0.157和0.512 g/min),泥沙有机碳流失速率开始波动减小,并持续至冲刷结束,呈现出明显的单峰分布。

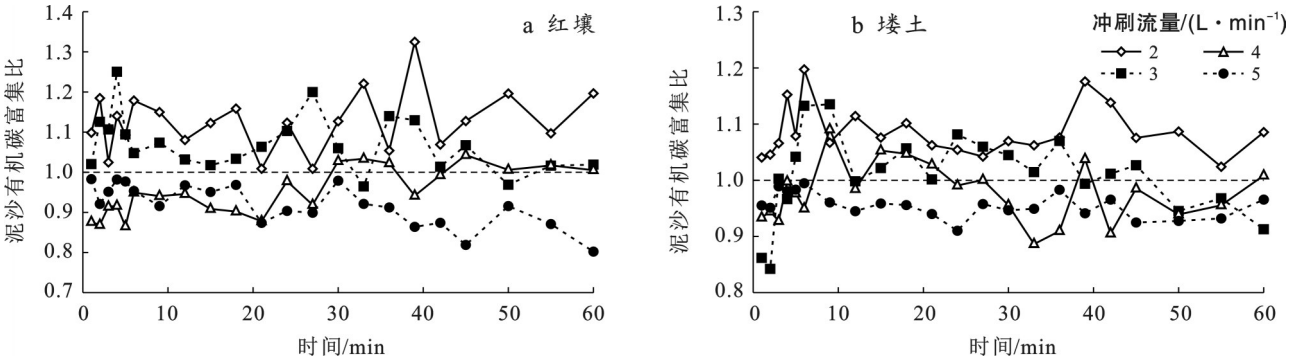

图 3　泥沙有机碳富集比随冲刷历时的变化

Fig.3　Variation of enrichment ratio of sediment organic carbon with scouring duration

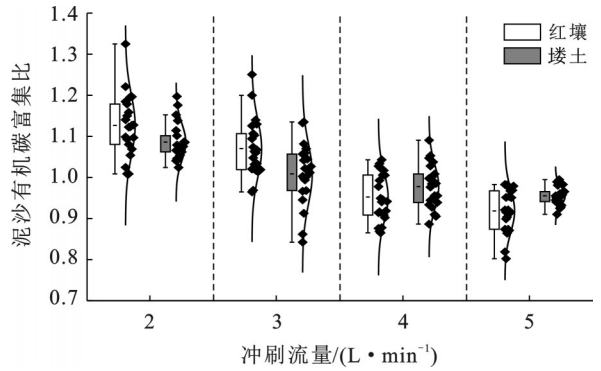

图 4　泥沙有机碳富集比随冲刷流量的变化

Fig.4　Variation of sediment organic carbon enrichment ratio with scouring flow rate

在 5 L/min 流量时有机碳流失速率在产流初期迅速上升,在 5 min 附近达到一个小峰值为 0.333 g/min,后快速上升,在 10 min 附近达到最大峰值 0.629 g/min 后缓慢下降再上升,并在 20 min 后出现若干个小峰值,在冲刷后期表现为持续上升趋势。与红壤相比,垄土坡面的有机碳流失速率动态在冲刷过程中表现出更为复杂的变化趋势。2 和 3 L/min 冲刷流量的有机碳流失速率的变化规律基本一致,泥沙有机碳流失速率最大值分别为 0.238 和 0.488 g/min,均出现在产流第一时间的片蚀阶段,然后持续下降直至稳定。在 4 和 5 L/min 冲刷流量下,有机碳流失速率呈现非稳态波动特征,冲刷初期,流失速率迅速达到首个峰值(分别为 0.115 和 0.752 g/min)后下降;至 10 min 左右速率开始上升,并于 18 min 附近形成次级波峰(0.236 和 0.277 g/min)。随后,流失速率总体呈上升趋势,在 30 min 附近再次达到波峰(0.433 和 0.537 g/min)。进入冲刷后期,曲线表现为多峰多谷的持续波动变化状态,直至冲刷结束仍未达到稳定状态。红壤和垄土的有机碳平均流失速率均随着冲刷流量的增加而增加,在 5 L/min 条件下,红壤的有机碳平均流失速率分别为 2,3 和 4 L/min 的 4.70,4.45,1.88 倍;垄土有机碳流失速率分别为 2,3 和 4 L/min 的 7.62,5.07,1.98 倍。垄土的平均有机碳流失速率在各冲刷流量下均大于红壤有机碳平均流失速率,垄土的平均有机碳流失速率在 2,3,4 和 5 L/min 条件下分别是红壤的平均有机碳流失速率的 1.05,1.49,1.62 和 1.70 倍,两种土壤有机碳流失速率差异随着冲刷流量的增大而增大。

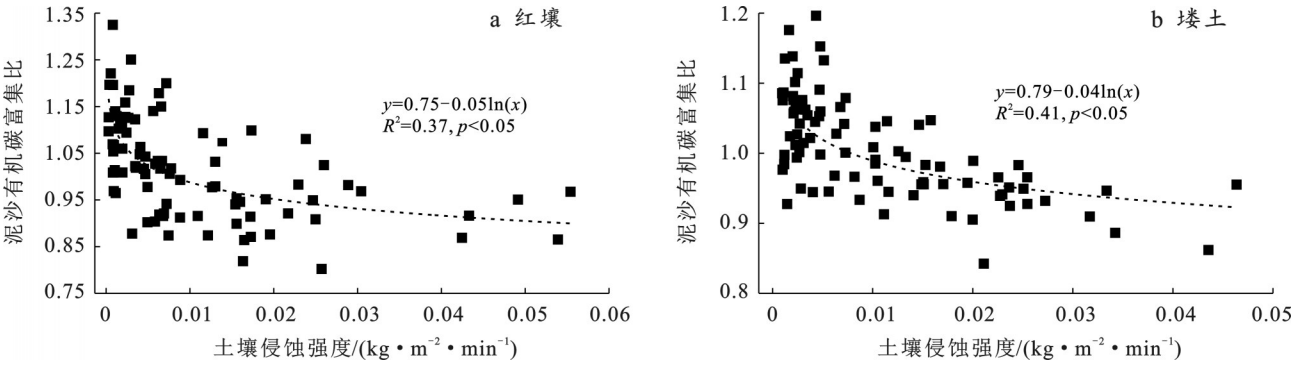

图 5　泥沙有机碳富集比随土壤侵蚀强度的变化

Fig.5　Variation of sediment organic carbon enrichment ratio with soil erosion intensity

2.4　坡面有机碳流失强度分析

将泥沙有机碳流失强度与土壤侵蚀强度进行拟合,得到在不同冲刷流量和土壤类型下土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度的拟合方程,拟合公式为

红壤：$y=5.24x+0.0017$（$R^2=0.98$，$p<0.05$），楼土：$y=7.34x+0.0016$（$R^2=0.96$，$p<0.05$）。结果显示，红壤和楼土土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度呈现正线性相关关系，土壤有机碳流失强度随着土壤侵蚀强度的增加而线性增加，说明泥沙是土壤有机碳流失的主要载体。此外，两种土壤的拟合斜率存在显著差异，楼土斜率高于红壤，表明相同条件下楼土有机碳流失风险更高。

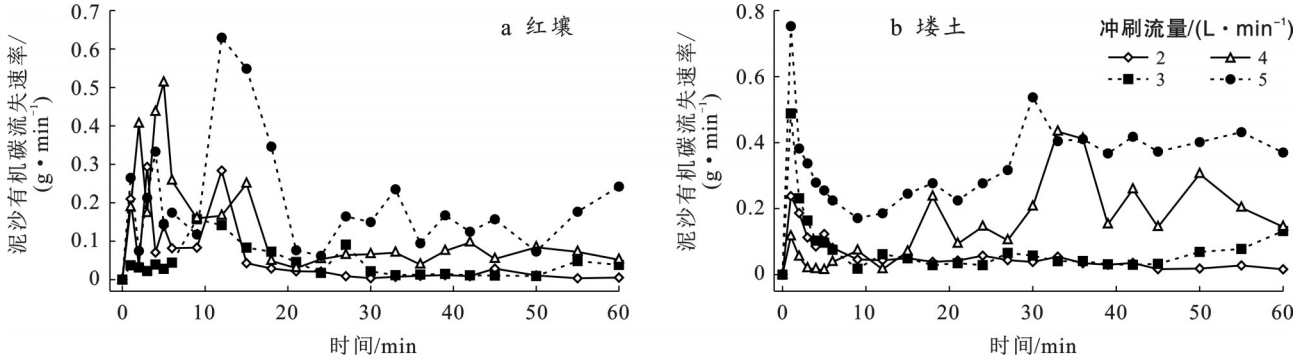

图6 泥沙有机碳流失速率随冲刷历时的变化

Fig.6 Variation of sediment organic carbon loss rate with scouring duration

3 讨 论

3.1 泥沙有机碳富集比的影响因素

冲刷历时是影响泥沙有机碳富集比的主要因素之一。试验结果表明，楼土和红壤在不同冲刷流量条件下，泥沙有机碳富集比随着冲刷历时呈现先增加后减小的趋势，泥沙有机碳富集比在产流前期较高，随着冲刷时长的增加逐渐下降（图3）。这表明在冲刷前期，主要发生面蚀，泥沙中富含有机碳的细颗粒优先侵蚀[23-24]，泥沙有机碳富集比开始上升，随着冲刷时间的增加，细颗粒被逐渐迁移出小区，此时泥沙有机碳富集比逐渐下降；当面蚀发展为细沟侵蚀时，低有机碳含量的粗颗粒会发生大规模迁移，导致泥沙有机碳富集比进一步下降。

通过分析各冲刷流量下泥沙有机碳富集比的变化发现，红壤和楼土泥沙有机碳富集比随着冲刷流量的增加而减小。在低冲刷流量下，泥沙有机碳更容易富集。因为在低流量下，坡面侵蚀主要以片蚀和面蚀为主，发生迁移的大部分为土壤表层富含有机碳的松散细颗粒，泥沙有机碳含量较高，呈现富集状态，平均富集比大于1。在高冲刷流量下，面蚀会逐渐发展为细沟侵蚀，坡面上有机碳含量降低的粗颗粒发生迁移，导致泥沙有机碳含量偏低，整体呈现稀释状态，平均有机碳富集比小于1。

3.2 坡面土壤有机碳流失速率的影响因素

冲刷流量是影响泥沙有机碳流失速率的主要因素之一，红壤和楼土的有机碳平均流失速率均随着冲刷流量的增加而增加。试验结果表明，红壤坡面有机碳流失速率在冲刷初期迅速增大，达到峰值，随后随着时间的持续，有机碳流失速率逐渐降低直至稳定，呈现单峰变化趋势，只有在5 L/min流量下，会出现多峰多谷现象。楼土坡面有机碳流失速率在2，3 L/min放水流量下与红壤变化趋势类似，但在4和5 L/min流量下，有机碳流失速率在冲刷前期先增加达到一定峰值后开始下降，在冲刷中期，开始有较大的增加，出现多个峰值，而且冲刷流量越大，曲线波动越明显（图6）。这一变化趋势与冲刷流量有关：在低冲刷流量条件下，坡面主要发生面蚀过程。表层结构疏松、富含有机碳的土壤细颗粒在径流作用下迅速随径流迁移输出，致使有机碳流失速率在初期达到最高水平。而随着冲刷时间延长，可被搬运的松散物质逐渐减少，径流所含泥沙浓度随之下降，有机碳流失速率亦相应降低。此外，由于冲刷能量有限，细沟难以形成。因此，有机碳流失速率在后期基本保持稳定，不会出现显著的峰值现象。在高冲刷流量下，冲刷前期主要以片蚀为主，随着径流的持续冲刷，在中期出现跌水状况，并出现细沟侵蚀和沟头的溯源侵蚀，导致有机碳流失速率持续增加并伴随着规律性的波动变化，出现波峰波谷交替现象，随着细沟的发育，有机碳流失速率在后期出现持续增长直至冲刷结束。

土壤类型也对水力侵蚀导致的有机碳流失具有重要影响[25]，土壤自身对有机碳的吸附性能是造成红壤和楼土有机碳流失差异的核心因素之一。红壤黏粒含量较高，质地黏重，土壤胶体对有机碳的吸附能力较强，能够将部分有机碳牢固吸附在土壤颗粒表面，减少其随径流迁移；同时红壤表层易形成土壤结皮，进一步提高了抵抗径流冲刷的能力，坡面基

本只发生面蚀和细沟间侵蚀,细沟侵蚀仅出现在高冲刷流量下,这也导致其有机碳流失速率后期趋于稳定。相比之下,垄土颗粒组成较为均一,以粉粒占优,土壤胶体对有机碳的吸附能力较弱,难以将有机碳稳定固持在土壤中,且其抗侵蚀能力较低[26],主要以细沟间侵蚀和细沟侵蚀为主。此外,由于垄土颗粒组成均匀,能够持续为径流提供可搬运的泥沙物质,且被吸附的有机碳易随泥沙迁移,导致其有机碳流失速率在整个冲刷过程中呈现波动趋势,并未达到稳定状态;同时,随着冲刷流量增加,细沟侵蚀加剧,进一步破坏土壤结构,降低有机碳吸附稳定性,导致有机碳流失速率波动增强,变化幅度更大。综上所述,垄土较红壤更容易产生细沟侵蚀,有机碳流失速率变化幅度更大,这既与水力侵蚀强度相关,也与两种土壤自身有机碳吸附性能及物理性质的差异密切相关。

3.3　坡面有机碳流失与径流泥沙的关系

本研究量化了红壤和垄土泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度的关系以及有机碳流失强度与土壤侵蚀强度的关联特征,结果表明,泥沙有机碳富集比与土壤侵蚀强度呈现显著的对数函数下降趋势(图 5),这一趋势印证了土壤侵蚀强度对有机碳含量的调控作用。

从侵蚀过程来看,低强度侵蚀阶段,土壤中高有机碳含量的细颗粒优先被冲刷迁移[27],导致泥沙有机碳呈现富集效应,含量维持在较高水平;随着侵蚀强度加剧,侵蚀形态从面蚀向沟蚀转化,粗颗粒土壤与细颗粒同步被剥离冲刷,泥沙中低有机碳含量的粗颗粒占比上升,有机碳含量随之降低,呈现稀释效应。同时红壤和垄土有机碳流失强度与土壤侵蚀强度存在极为显著的线性正相关关系,本质是土壤侵蚀过程对有机碳迁移的驱动效应:土壤侵蚀通过破坏土壤结构,剥离表层土壤,直接携带吸附于土壤颗粒的有机碳流失,且侵蚀强度越大,表层土壤剥离量越多,有机碳流失负荷同步增加。

红壤与垄土的拟合斜率差异进一步印证了土壤质地对该侵蚀过程的调控,一方面垄土质地、有机质吸附特性使其有机碳更易随侵蚀颗粒迁移,导致相同侵蚀强度下流失增速更高,而红壤的结构稳定性相对较强,有机碳流失速率较低;另一方面,垄土和红壤有机碳含量的差异也导致相同侵蚀强度下土壤有机碳流失强度的差异。并且冲刷流量未改变两者的相关模式,这与侵蚀过程的主导性有关,在本研究中,土壤侵蚀强度是导致有机碳流失的核心因子,冲刷流量仅影响侵蚀发生的速率,未改变土壤侵蚀与有机碳流失的相关关系,而土壤类型通过改变有机碳的吸附与赋存状态,成为差异化特征的关键因子。

4　结 论

(1) 水力侵蚀过程中,红壤与垄土泥沙有机碳含量均随冲刷历时呈现先快速上升后总体下降趋势。泥沙有机碳富集比随着冲刷流量的增大而降低,与土壤侵蚀强度呈现显著对数函数负相关关系($p<0.05$)。基于富集比变化特征,泥沙有机碳可划分为3种迁移模式:低冲刷流量下的高度选择性迁移(泥沙富集比均大于1);中冲刷流量下的一般选择性迁移(富集比部分大于1);高冲刷流量下的非选择性迁移(富集比均小于1)。

(2) 冲刷流量与土壤类型对土壤有机碳流失有显著影响:红壤和垄土有机碳流失速率均随着冲刷流量的增加而显著提升,5 L/min流量下,红壤和垄土平均有机碳流失速率分别为其他流量条件下的1.88～4.70倍,1.98～7.62倍;相同冲刷流量下垄土有机碳平均流失速率均高于红壤,为红壤的1.05～1.70倍。有机碳流失速率的动态变化受冲刷流量的调控,高流量下两种土壤的有机碳流失速率随冲刷历时整体呈现多峰多谷的波动变化,且冲刷流量越大,波动幅度越明显。

(3) 红壤和垄土泥沙有机碳流失强度均与土壤侵蚀强度呈现显著线性正相关关系。结果表明泥沙是水力侵蚀过程中有机碳流失的主要载体;同时两种土壤拟合斜率的差异证实,相同侵蚀强度条件下,垄土有机碳流失风险更高。

参考文献(References)

[1] Lal R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO_2 [J]. Soil and Tillage Research, 2019,188:35-40.

[2] 滕秋梅,罗亚进,张德楠,等.^{137}Cs示踪南方红壤区主要用材林土壤侵蚀及其对有机碳的影响[J].生态学报,2025,45(23):11649-11660.
Teng Qiumei, Luo Yajin, Zhang Denan, et al. Soil erosion characteristics of major timber forest based on ^{137}Cs tracer and its effect on soil organic carbon in the southern red soil region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(23):11649-11660.

[3] Wang Yixia, Ran Lishan, Fang Nufang, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau [J]. Catena, 2018,167:257-265.

[4] 郭太龙,谢金波,孔朝晖,等.华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J].生态环境学报,2015,24(8):1266-1273.

Guo Tailong, Xie Jinbo, Kong Chaohui, et al. Experimental study on soil organic carbon loss in red soil erosion under different simulated rainfall intensity and slope gradient [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(8):1266-1273.

[5] 徐慧云,朱绪超,彭诚,等.南方典型第四纪红黏土物理结皮发育过程和结构特征[J].水土保持学报,2025,39(5):53-62.
Xu Huiyun, Zhu Xuchao, Peng Cheng, et al. Development process and structural characteristics of physical crusts in typical quaternary red clay in southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5):53-62.

[6] 朱启明,齐小倩,刘俊娥,等.黄土高原土壤细沟输沙能力对坡度和流量的响应[J].水土保持学报,2025,39(4):168-176.
Zhu Qiming, Qi Xiaoqian, Liu Jun'e, et al. Response of rill sediment transport capacity to slope gradient and flow rate for soils on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(4):168-176.

[7] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5):499-510.

[8] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
Qin Wei, Zuo Changqing, Yan Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):124-132.

[9] 张冠华,程冬兵,张平仓,等.工程开挖面水土流失特征试验研究[J].长江科学院院报,2015,32(3):27-30.
Zhang Guanhua, Cheng Dongbing, Zhang Pingcang, et al. Experimental study on soil erosion characteristics of engineering excavated slope [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2015,32(3):27-30.

[10] 车明轩,宫渊波,穆罕默德·纳伊姆·汉,等.人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):164-168.
Che Mingxuan, Gong Yuanbo, Muhammad N H, et al. Impacts of rainfall intensity, slope gradient on overland flow of purple soil under simulated rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(4):164-168.

[11] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
Liang Zhiquan, Zhang Siyi, Zhuo Muning, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion process in red soil hillslopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(2):1-6.

[12] Shen Yingli, Gu Ju, Liu Gang, et al. Predicting soil erosion and deposition on sloping farmland with different shapes in northeast China by using ^{137}Cs [J]. Catena, 2023,229:107238.

[13] Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2016,155:429-436.

[14] 徐燕,龙健.贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):157-159.
Xu Yan, Long Jian. Effect of soil physical properties on soil erosion in Guizhou Karst mountainous region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,19(1):157-159.

[15] Li Yawen, Duan Xingwu, Li Ya, et al. Interactive effects of land use and soil erosion on soil organic carbon in the dry-hot valley region of southern China [J]. Catena,2021,201:105187.

[16] 许其功,席北斗,沈珍瑶,等.耕作措施对三峡库区土壤侵蚀和养分流失的影响[J].生态与农村环境学报,2007,23(3):41-45.
Xu Qigong, Xi Beidou, Shen Zhenyao, et al. Effects of farming practices on soil erosion and nutrient loss in the Three George reservoir area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007,23(3):41-45.

[17] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
Xiao Jibing, Sun Zhanxiang, Liu Zhi, et al. Effects of rainfall erosion factor, vegetation type and coverage on soil erosion of sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22):159-166.

[18] Wang Lei, Li Yan, Wu Jiajun, et al. Effects of the rainfall intensity and slope gradient on soil erosion and nitrogen loss on the sloping fields of Miyun reservoir [J]. Plants,2023,12(3):423.

[19] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J].农业工程学报,2015,31(19):135-141.
Lu Yinmei, Li Zhongwu, Nie Xiaodong, et al. Effects of overland flow and soil erodibility on soil organic carbon loss in red soil sloping land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19):135-141.

[20] 王文欣,庄义琳,庄家尧,等.不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):62-66.
Wang Wenxin, Zhuang Yilin, Zhuang Jiayao, et al. Effects of downhill coverage on soil organic carbon loss

under different rainfall intensities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(4):62-66.

[21] 贾松伟.黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J].水土保持研究,2009,16(2):30-33.
Jia Songwei. Soil organic carbon loss under different slope gradients in loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(2):30-33.

[22] 许阳光,郭文召,刘韬远,等.浅层滑坡影响下草被沟坡有机碳流失试验研究[J].泥沙研究,2022,47(6):35-42.
Xu Yangguang, Guo Wenzhao, Liu Taoyuan, et al. Experimental study of organic carbon loss on grass slope under the influence of shallow landslide [J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(6):35-42.

[23] Zhang Xue, Li Zhongwu, Tang Zhenghong, et al. Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China [J]. Geomorphology, 2013,197:137-144.

[24] 肖胜生,汤崇军,王凌云,等.自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J].土壤学报,2017,54(4):874-884.
Xiao Shengsheng, Tang Chongjun, Wang Lingyun, et al. Soil erosion-induced selective transfer of organic carbon in red soil slope field under natural rainfall [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(4):874-884.

[25] 刘小岚,黄金权,齐瑜洁,等.有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素:基于 Meta 分析[J].环境科学,2023,44(9):5125-5134.
Liu Xiaolan, Huang Jinquan, Qi Yujie, et al. Response of organic carbon loss to soil erosion and its drivers: A Meta-analysis [J]. Environmental Science, 2023, 44(9):5125-5134.

[26] 朱启明,刘俊娥,周正朝.黄土高原土壤可蚀性因子空间分布特征及影响因素[J].水土保持学报,2023,37(6):50-56.
Zhu Qiming, Liu June, Zhou Zhengchao. Research on the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil erodibility factors of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):50-56.

[27] 齐瑜洁,黄金权,李威闻,等.基于水力侵蚀过程的土壤有机碳变化驱动机制研究进展[J].土壤通报,2023,54(5):1196-1204.
Qi Yujie, Huang Jinquan, Li Weiwen, et al .Research progress on driving mechanism of soil organic carbon change based on hydraulic erosion process [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(5):1196-1204.

(上接第 239 页)

[25] 杨轩,刘渊克,韩志强,等.河南丹江湿地保护区植物生物量分配及土壤剖面有机碳含量特征[J].生态学报,2026,46(4):1787-1799.
Yang Xuan, Liu Yuanke, Han Zhiqiang, et al. Characteristics of plant biomass allocation and soil profile organic carbon content in Danjiang wetland reserve, Henan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4):1787-1799.

[26] 廖雯.丹江口库区生态系统服务及其权衡协同关系分析[D].湖北 武汉:湖北大学,2022.
Liao Wen. Analysis of ecosystem services and their trade-off synergies in the Danjiangkou reservoir area [D]. Wuhan, Hubei: Hubei University, 2022.

[27] Liu Linghua, Zheng Liang, Wang Ying, et al. Land use and ecosystem services evolution in Danjiangkou reservoir area, China: Implications for sustainable management of national projects [J]. Land,2023,12(4):788.

[28] 汪兴,赵友礼,刘超杨,等.不同土地利用类型下生态系统固碳成效研究[J].人民长江,2024,55(12):124-130.
Wang Xing, Zhao Youli, Liu Chaoyang, et al. Ecosystem carbon sequestration efficiency of different land use types [J]. Yangtze River, 2024,55(12):124-130.

[29] 童荣鑫,梁迅,关庆锋,等.2000—2020年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J].地理学报,2023,78(9):2209-2222.
Tong Rongxin, Liang Xun, Guan Qingfeng, et al. Estimation of soil carbon storage change from land use and management at a high spatial resolution in China during 2000—2020 [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(9):2209-2222.

[30] Walker W S, Gorelik S R, Cook-Patton S C, et al. The global potential for increased storage of carbon on land [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(23): e2111312119.