

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.044.

陈致君, 王善琦, 刘琳. 片蚀过程中黄土团聚体活性有机碳流失特征及其量估算[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 1-9.

CHEN Zhijun, WANG Shanqi, LIU Lin. Characteristics and Estimation of Lou Soil Aggregate-associated Active Organic Carbon Loss During Sheet Erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 1-9.

片蚀过程中黄土团聚体活性有机碳流失特征及其量估算

陈致君, 王善琦, 刘琳

(山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250000)

摘要: [目的]揭示土壤团聚体破碎、迁移对活性有机碳流失的影响,建立活性有机碳流失量估算方程,为评估水蚀作用下土壤有机碳流失与矿化的定量关系提供理论支撑。[方法]以黄土高原典型黄土为研究对象,设计 3 种降雨强度(60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h)和 3 个坡度(5°, 10°, 15°),采用人工模拟降雨技术,通过建立经验方程,对活性有机碳流失量进行估算。[结果]相较雨强,坡度对土壤轻组有机碳(light fraction of soil organic carbon, LFoc)流失的影响更明显,片蚀与溅蚀泥沙 LFoc 含量均随坡度的增大先减小后增大,而雨强对片蚀泥沙 LFoc 含量无显著影响($p < 0.05$);溅蚀泥沙 LFoc 含量明显低于片蚀,且溅蚀泥沙 LFoc 未发生明显富集,片蚀泥沙中 LFoc 发生明显富集;对比不同粒级团聚体 LFoc 含量发现, <0.05 mm 黏粉粒、0.05~0.25 mm 团聚体中 LFoc 更易于发生富集,而 0.25~2 mm 团聚体 LFoc 只在小雨强和小坡度条件下发生富集;由于 <0.02 mm 粒级团聚体迁移为 LFoc 流失的主导因素,基于 <0.02 mm 粒级团聚体迁移量相关指标,建立了拟合方程,对 LFoc 流失量进行了估算,拟合效果较好($R^2 = 0.727$)。[结论]水蚀过程中径流优先输移活性有机碳是造成有机碳大量矿化的原因,未来可以通过团聚体迁移量较好估算活性有机碳流失量。

关键词: 片蚀; 活性有机碳; 模拟降雨; 团聚体; 溅蚀

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0001-09

Characteristics and Estimation of Lou Soil Aggregate-associated Active Organic Carbon Loss During Sheet Erosion

CHEN Zhijun, WANG Shanqi, LIU Lin

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250000, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the response of soil active organic carbon loss to aggregate breakdown and transport, estimate the loss amount of active organic carbon by establishing empirical equations, and provide theoretical support for evaluating the quantitative relationship between soil organic carbon loss and carbon mineralization under water erosion. [Methods] This study took typical Lou soil in the Loess Plateau to conduct artificial simulated rainfall experiments with three rainfall intensities (60 mm/h, 90 mm/h, and 120 mm/h) and three slopes (5°, 10°, and 15°), and the loss amount of active organic carbon was estimated by establishing empirical equations. [Results] Slope gradient had the more important effect on light fraction of soil organic carbon (LFoc) loss than rainfall intensity. Both LFoc concentrations of sheet erosion and splash erosion sediments decreased first and then increased with the increase of slope gradient. Furthermore, rainfall intensity had no significant effect on the LFoc concentration of sheet erosion sediment ($p < 0.05$). The LFoc concentration of splash erosion sediments was obviously lower than that of sheet erosion sediments. Meanwhile, the LFocs were obviously enriched in sheet erosion sediment while those in splash erosion sediments were not obviously enriched. Compared the LFoc concentrations of aggregates with different particle sizes, the results revealed that the LFoc of <0.05 mm clay and silt particles and 0.05~0.25 mm aggregates were more likely to be enriched, while the LFoc of 0.25~2 mm aggregates was enriched only

收稿日期: 2022-07-04

修回日期: 2022-08-06

资助项目: 国家自然科学基金(41907055); 中国博士后科学基金(2019M652456); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_1762)

第一作者: 陈致君(1997—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持与土壤碳循环。E-mail: c806292071@163.com

通信作者: 刘琳(1990—), 女, 山东烟台人, 博士, 副教授, 研究方向: 水土保持与土壤碳循环。E-mail: kira_lau123@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

under light rainfall intensities and gentle slopes. As the transport of <0.02 mm aggregates had great correlation with LFoc loss, such a loss was well estimated by the transport amount of <0.02 mm aggregates ($R^2 = 0.727$). [Conclusion] Runoff preferentially transports active organic carbon during water erosion, which is the reason for the large amount of mineralization of organic carbon. The loss and mineralization of active organic carbon can be well estimated by the amount of the transported aggregates in the future.

Keywords: sheet erosion; active organic carbon; simulated rainfall; aggregates; splash erosion

土壤作为重要的碳库对全球碳循环过程有重要影响^[1-2]。全球范围内,每年有 (0.5 ± 0.15) Gt 土壤碳伴随 28 Gt 表层土壤迁移流失^[3],而水蚀是土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)流失的重要驱动力^[4-5]。该过程中,活性有机碳库对土壤环境变化的响应较为敏感,为土壤有机碳响应影响因子变化的重要指示物^[6]。通过密度分组法,获取的土壤轻组有机碳可作为表征土壤活性有机碳的重要指标^[7-9]。土壤轻组有机碳(light fraction of soil organic carbon, LFoc)包括微生物遗留残骸、动植物残体、菌丝体及孢子等^[10-11],主要为部分分解且未腐殖化的有机质^[12]。其 C/N 值高,分解速度为重组碳的 2~11 倍^[13],周转速度快,且易于被矿化^[14]。因此,轻组有机碳属于土壤中易分解的活性碳库^[15]。因而,探究水蚀作用下轻组有机碳的流失与富集机制有助于理解水蚀作用下的土壤有机碳库储量变化。

耕作表土层中约 90% 有机碳被包裹于团聚体内^[16-17],其中,活性有机碳占比 15%~32%^[18]。片蚀过程中,雨滴打击导致团聚体机械崩解,使原本被团聚体包裹的有机碳失去物理保护。随后,径流优先输移轻质有机质,促进了侵蚀泥沙中轻组有机碳的富集,亦改变了轻组有机碳在不同粒级团聚体之间的分布特征^[19],使更多活性有机碳暴露,被微生物分解进

入大气^[20],这成为水蚀作用下大量有机碳矿化的重要原因。然而,目前关于水蚀作用下土壤有机碳流失的研究,主要集中于影响因素^[21-25],如土地利用方式、雨强和坡度等以及有机碳流失特征等方面,尚未深入探究团聚体破碎、输移与轻组有机碳流失的关系,而该过程是揭示水蚀影响下土壤有机碳库变化的关键环节。鉴于此,本研究以黄土高原典型塬区为研究对象,探究片蚀过程中土壤团聚体破碎、输移对活性有机碳流失与富集的影响,并通过建立经验方程,对轻组有机碳流失量进行估算,以期为准评估水蚀作用下土壤有机碳库的变化提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省杨凌区($34^{\circ}12' - 34^{\circ}20' \text{N}$, $108^{\circ} - 108^{\circ}07' \text{E}$)位于黄土高原南部,海拔 435~563 m,属温带大陆性季风半湿润气候,年均温 12.9℃,年降水 635.1~663.9 mm,降水集中在夏季 7 月和 9 月,多暴雨。试验所用塬区采自该区域耕地表层 0—30 cm,该耕地往年主要作物为油菜和玉米轮作,土样采集时间为 6 月份,油菜收获后,尚未种植作物。土壤基本理化性质和土壤各粒级团聚体有机碳含量及轻组有机碳含量见表 1—2。

表 1 土壤基本理化性质

项目	黏粒/ %	细粉粒/ %	粗粉粒/ %	细砂粒/ %	粗砂粒/ %	CaCO ₃ / (g·kg ⁻¹)	pH 值	平均重量 直径/mm	容重/ (g·cm ⁻³)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)
EV	20.1	11.9	23.0	35.5	9.3	75.4	8.3	0.17	1.3	15.5
UV	37.2	30.5	22.2	7.1	3.0					

注:土壤质地分类依据美国农业部制分类系统。“EV”表示有效粒径分布,“UV”表示最终粒径分布。

表 2 土壤团聚体及其有机碳组分含量

粒径/ 原状土	团聚体 含量/%	SOC/ (g·kg ⁻¹)	LFoc/ (g·kg ⁻¹)
原状土	—	7.56±0.26	1.71±0.52
<0.05 mm	29.59	4.71±0.09	0.83±0.13
0.05~0.25 mm	39.55	6.31±0.12	1.65±0.03
0.25~2 mm	23.77	11.96±0.07	4.63±0.29
>2 mm	7.09	12.65±0.65	3.28±0.36

1.2 试验设计

1.2.1 模拟降雨试验设计 根据中国黄土高原耕地坡度分级标准,试验坡度选择 5°,10°,15°分别代表缓坡、缓陡坡和陡坡;根据黄土高原半湿润气候区侵蚀

性降雨的典型降雨强度^[26],选择 60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h 降雨强度,共 9 组试验,各试验重复 3 次,共计 27 场降雨。

1.2.2 试验土槽 试验采用改进“三区”移动式变坡钢制土槽,土槽分为三部分,包括上部、左侧与右侧溅蚀补偿区、土槽中心的侵蚀观测区与两个溅蚀收集区(图 1)。由于向上坡溅蚀量低,且 5 个径流收集口布设困难,因而,未在径流小区下部布设溅蚀补偿区。侵蚀观测区与溅蚀收集区出口处为铝制集流槽,用于收集径流和泥沙。土槽坡度调整范围为 0°~30°,各区规格与分布见图 1。

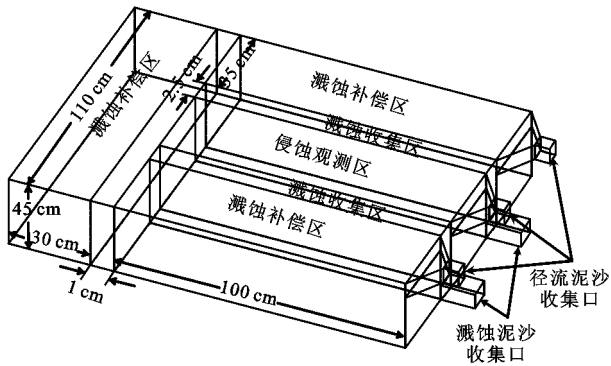


图1 试验土槽示意图

土槽装填前,首先对供试土样进行自然风干,将土壤水分控制在10%左右,去除植被凋落物后,再过10 mm筛。填装土槽时,土槽底部先填装10 cm厚沙子,土样混合均匀后,再依据原状土容重分层装入,每次填装5 cm,压实且通过打毛处理,以消除人为土壤分层界面的影响,土层总厚度为30 cm。正式降雨前,使用自来水喷雾至土壤水分饱和。

1.2.3 试验过程 降雨试验在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室人工降雨大厅开展。采用大厅侧喷式模拟降雨系统,降雨器高度为16 m,可保证雨滴达到雨滴终速,以满足天然降雨特性,降雨强度变化范围为40~260 mm/h,通过喷嘴大小和压强进行调节。降雨用水为自来水,电导率为0.7 dS/m。降雨前均对降雨器雨强进行率定,以保证试验雨强为目标雨强,降雨均匀度大于80%。

降雨后,自坡面产流后开始计时,降雨时长为1 h。降雨过程中,记录坡面产流、跌坎、细沟发生和沟壁坍塌时间等关键信息,并每隔一定时间,用数码相机从不同角度拍摄记录坡面侵蚀状况。自坡面产流开始,每间隔3 min收集径流泥沙样,每间隔5 min收集溅蚀泥沙样。收集径流泥沙样时,每3 min额外用玻璃烧杯收集150 ml的径流泥沙样,用于泥沙颗粒组成分析。径流流速采用染色剂示踪法(KMnO_4)进行测定,记录水流通过坡面方向0.5 m的时间,连续对流速进行测定,直至降雨结束。测定流速时,在坡面上选择呈明显股流的部位,待细沟形成后,测定细沟内水流流速。整个流速测定过程由单人操作完成,以确保系统误差的一致性。降雨结束后,记录坡面侵蚀状况,如果有细沟产生,则用尺子测量记录细沟位于坡面的具体位置,以及细沟的长、宽和深。

1.3 样品测定

1.3.1 溅蚀、片蚀泥沙颗粒组成分析 降雨结束后,即将将溅蚀和片蚀泥沙样送入泥沙颗粒组成分析室,使用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪(Malvern Instruments Ltd., UK)测定分散前、后泥

沙颗粒组成。通过对泥沙样品直接测定,得到有效泥沙颗粒组成。随后,加入适量双氧水(10%)去除有机质,并使用六偏磷酸钠溶液(0.5 mol/L)进行化学分散,仪器超声物理分散后,测定分散后泥沙颗粒组成。**1.3.2 片蚀泥沙团聚体及其SOC组成分析** 泥沙样收集后立即采用湿筛法^[27]测定径流泥沙样品水稳性团聚体含量。使用2 mm,0.25 mm,0.05 mm筛子进行筛分,筛分时,在水中小幅度左右震荡100次,使筛网上泥沙全部转移至对应粒级筛子中,从而得到<0.05 mm黏粉粒、0.05~0.25 mm微团聚体、0.25~2 mm小团聚体和>2 mm大团聚体,团聚体样品在60℃下烘干24 h后称重,自封袋收集,以用于后续SOC组分测定。

采用 Ramnarine 等^[28]和张艺等^[29]的密度浮选法对片蚀泥沙团聚体与溅蚀泥沙样品进行轻、重组有机碳分离。称取团聚体或溅蚀泥沙样2 g,放入已知质量的50 ml锥形离心管内,加入5 ml 1.85 g/cm³的NaI溶液,轻摇至土样与重液充分混合后,超声分散10 min,随后,用5 ml NaI溶液将离心管盖和管壁上的混合物冲洗进悬浊液中。在20℃ 2 400 r/min速度下离心10 min,取出离心管后倒掉上清液。重复以上过程3次。用30 ml 0.05 mol/L CaCl₂溶液洗涤剩余土样,重复3次,以洗净NaI溶液,最后用40 ml去离子水洗净CaCl₂溶液至无浑浊液,将盛有土样的离心管置于60℃下烘24 h,以备测定重组有机碳含量。土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热法^[30]。测定后,轻组有机碳计算公式如下:

$$\text{LFoc} = \text{SOC} - \text{SOC}_{\text{HF}} \times M_{\text{HF}} \quad (1)$$

式中:LFoc为侵蚀泥沙轻组有机碳含量(g/kg);SOC为侵蚀泥沙有机碳含量(g/kg);SOC_{HF}为侵蚀泥沙重组有机碳含量(g/kg);M_{HF}为重组泥沙质量分数(%)。

1.4 数据处理与分析

$$E/U-\alpha = \frac{\alpha_E}{\alpha_U} \quad (2)$$

$$\text{ER}-\beta = \frac{\beta}{\beta_0} \quad (3)$$

式中: $E/U-\alpha$ 为侵蚀泥沙 α 粒径分散前后比值; α 为<0.002 mm,0.002~0.02 mm,0.02~0.05 mm,0.05~0.25 mm或0.25~2.00 mm; α_E 为分散前各粒级泥沙颗粒的含量(%); α_U 为分散后各粒级泥沙颗粒的含量(%);ER- β 为 β 富集比; β 为侵蚀泥沙SOC(g/kg)或LFoc(g/kg); β_0 为SOC或LFoc在原状土中的含量(g/kg)。利用IBM SPSS Statistics 26.0软件进行单因素方差分析(ONE-WAY ANOVA)、Pearson相关系数分析和多元线性回归分析,利用Origin 2019b软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同降雨条件下泥沙与团聚体流失特征

探究不同降雨条件下坡面产流产沙特征发现,径流

率随雨强增大而显著增大($p<0.05$;表 3),随坡度无显著变化($p<0.05$);径流含沙量和产沙量随雨强增大而增大,而随坡度增大先增大后减小;溅蚀量随雨强的增大先减小后增大,而随坡度的增大却呈增大趋势。

表 3 不同降雨条件下坡面侵蚀泥沙特征

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	产流 时间/min	径流率/ (L·min ⁻¹)	径流含沙量/ (kg·L ⁻¹)	产沙量/ g	溅蚀量/ g	溅蚀率/ (g·min ⁻¹)
60	5	1.45	0.13±0.01Ca	0.01±0.00Bc	43.66±0.11Bc	8.17±2.75Bc	0.14±0.05Bc
	10	1.00	0.12±0.00Ca	0.01±0.00Bb	120.82±0.64Bb	15.13±0.71ABb	0.25±0.01ABb
	15	1.53	0.14±0.01Ca	0.03±0.00Ca	209.95±4.27Ca	32.23±3.33Aa	0.54±0.06Aa
90	5	1.00	0.23±0.02Bb	0.01±0.00Bc	154.34±23.67Aa	9.61±0.11Bb	0.16±0.00Bb
	10	0.67	0.22±0.00Ba	0.02±0.00Bb	204.37±2.12Ab	10.70±1.21Bb	0.18±0.02Bb
	15	1.38	0.19±0.01Ba	0.01±0.00Ba	148.87±8.59Ba	13.77±0.87Ba	0.23±0.01Ba
120	5	0.77	0.28±0.01Aa	0.01±0.00Ab	163.32±22.38Ab	23.43±5.78Aa	0.39±0.10Aa
	10	0.53	0.27±0.00Aa	0.01±0.00Ab	202.92±17.50Ab	26.95±9.38Aa	0.45±0.16Aa
	15	0.73	0.27±0.00Aa	0.03±0.00Aa	347.62±4.50Aa	34.58±1.33Aa	0.58±0.02Aa

注:大写字母表示相同坡度下不同降雨强度的差异性,小写字母表示相同降雨强度下不同坡度的差异性($p<0.05$)。

为探究不同降雨条件下片蚀团聚体迁移特征,对分散前、后各粒级泥沙颗粒比值(E/U)进行探究发现, <0.002 mm 和 $0.002\sim0.02$ mm 粒级泥沙的 E/U 值 <1 , $0.02\sim0.05$ mm 粒级泥沙的 E/U 值接近于 1.0,而 $0.05\sim0.25$ mm 和 $0.25\sim2$ mm 粒级泥沙的 E/U 值 >1 ,因此,大量 <0.02 mm 泥沙颗粒以团聚体包裹态迁移,且大量 >0.02 mm 颗粒以团聚体的形式迁移(图 2)。其中,团聚体包裹态 <0.002 mm 和 $0.002\sim0.02$ mm 泥沙颗粒的迁移量随雨强的增大呈减少趋势, $0.02\sim0.05$ mm 泥沙颗粒随雨强的变化不明显,而 >0.05 mm 团聚体随雨强的增大而轻微增大。在 60 mm/h 雨强下, <0.02 mm 团聚体包裹态泥沙颗粒随坡度增大而减少, $0.02\sim0.05$ mm 泥沙颗粒受坡度影响较小,而 $0.05\sim2$ mm 团聚体随坡度的增大而增大;当雨强为 90 mm/h 或 120 mm/h 时, <0.02 mm 团聚体包裹态泥沙颗粒随坡度增大而增大, $0.02\sim0.05$ mm 泥沙颗粒依然受坡度影响较小,而 $0.05\sim2$ mm 团聚体随坡度的增大而减少,这可能是大量砂粒输移所造成的。

探究溅蚀团聚体迁移特征发现,溅蚀泥沙团聚体含量与径流含沙量随雨强和坡度的变化规律基本一致,然而,溅蚀泥沙团聚体含量受雨强和坡度的影响更大,且溅蚀泥沙 <0.02 mm 团聚体包裹态黏粉粒和 >0.02 mm 团聚体量明显高于径流泥沙,这可能与大的径流侵蚀力造成更多砂粒被输移有关。

2.2 不同降雨条件下 LFoc 与 SOC 流失特征

探究雨强和坡度对侵蚀泥沙 SOC 含量的影响发现,溅蚀与片蚀泥沙 SOC 含量均随雨强的增大先增

大后减小,而随坡度的增大先减小后增大(表 4)。因而,溅蚀泥沙 SOC 含量在一定程度上决定了片蚀泥沙 SOC 含量的变化。然而,通过对比溅蚀与片蚀泥沙 SOC 含量发现,在不同降雨条件下溅蚀泥沙 SOC 含量均高于片蚀泥沙 SOC 含量。对比片蚀与溅蚀泥沙 LFoc 含量的变化特征发现,雨强对片蚀泥沙 LFoc 含量无显著影响,而溅蚀泥沙 LFoc 含量随雨强的增大而先增大后减小($p<0.05$;表 4);片蚀与溅蚀泥沙 LFoc 含量均随坡度的增大而先减小后增大。对比片蚀和溅蚀泥沙 LFoc 含量的关系发现,在相同降雨条件下,片蚀泥沙 LFoc 含量高于溅蚀泥沙 LFoc 含量(表 4)。探究雨强和坡度对片蚀泥沙团聚体 LFoc 含量的影响发现, <0.05 mm 黏粉粒、 $0.05\sim0.25$ mm 团聚体和 $0.25\sim2$ mm 团聚体 LFoc 含量均随雨强的增大而先增大后减小,而随坡度的增大先减小后增大。溅蚀泥沙 LFoc 含量随雨强和坡度的变化规律与片蚀团聚体一致,因此,溅蚀对径流侵蚀泥沙 SOC,LFoc 流失有重要贡献。对侵蚀泥沙团聚体 SOC 含量及其影响因素进行相关性分析发现,相较片蚀团聚体迁移量,溅蚀团聚体迁移量与片蚀团聚体 SOC 含量相关性更显著;溅蚀、片蚀泥沙 SOC 含量均与黏粉粒 SOC 含量极显著正相关($p<0.01$;表 5)。对侵蚀泥沙及片蚀团聚体 LFoc 含量与降雨条件的相关性分析显示,相较雨强,片蚀泥沙 LFoc 含量与坡度相关性更显著($p<0.05$);同时, $0.25\sim2$ mm 团聚体 LFoc 含量与片蚀团聚体流失量显著正相关($p<0.05$;表 5),其他粒级团聚体 LFoc 含量与团聚体流失参数无显著相关关系,而侵蚀泥沙 SOC 含量则与溅蚀团聚体含量呈显著相关($p<0.05$)。

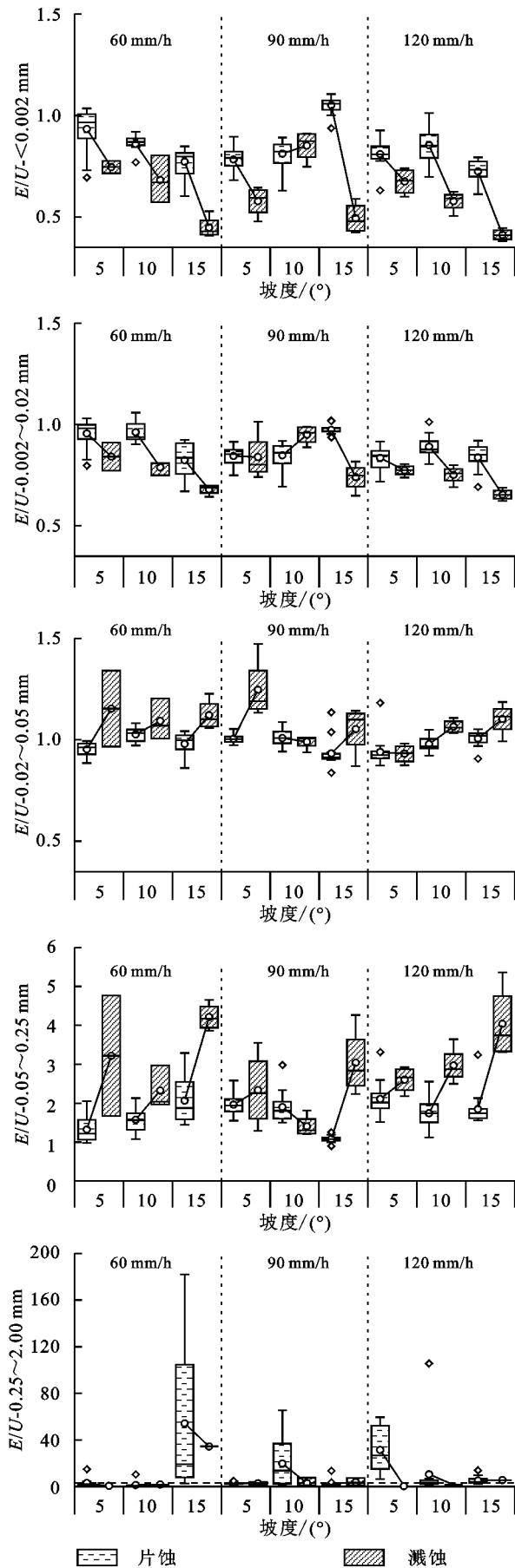


图2 不同降雨条件下溅蚀和片蚀泥沙团聚体迁移特征

分析片蚀各粒级团聚体 LFoc 富集特征发现, <0.05 mm 黏粉粒和 $0.05 \sim 0.25$ mm 团聚体中 LFoc 均发生明显富集, 而 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体 LFoc 只有在小雨强和小坡度条件下发生轻微富集(图 3)。对片蚀、溅蚀泥沙 SOC 含量与 LFoc 含量的关系进行回归分析发现, 片蚀、溅蚀泥沙 SOC 含量均与其 LFoc 含量呈显著正对数相关($p < 0.05$)。对比两者的相关性关系发现片蚀泥沙 LFoc 含量与其 SOC 含量的回归曲线斜率较溅蚀泥沙 LFoc 含量与其 SOC 含量的回归曲线斜率大, 因而, 在片蚀泥沙中, LFoc 对 SOC 的变化更敏感(图 4)。

对片蚀团聚体 SOC 含量的时间变化特征分析发现, 不同降雨条件下 <0.05 mm 黏粉粒 SOC 含量随降雨历时增加而逐渐降低(图 3), $0.05 \sim 0.25$ mm 团聚体 SOC 含量随降雨历时增加逐渐升高, 而 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体 SOC 含量随降雨历时波动较大。片蚀团聚体 LFoc 的时间变化特征与 SOC 基本一致。对溅蚀泥沙 SOC 含量的时间变化特征分析发现, 溅蚀泥沙 SOC 含量随降雨历时的增加而升高(图 5)。因此, 溅蚀泥沙 SOC 含量与片蚀泥沙 >0.05 mm 团聚体 SOC 含量的时间变化规律一致。此外, 降雨过程中溅蚀泥沙 LFoc 始终未发生富集(图 5)。因此, 径流对轻质 SOC 的优先输移是造成 LFoc 在片蚀泥沙中富集的主要原因。

2.3 片蚀泥沙轻组有机碳流失量估算

依据 Starr 等^[31]建立的泥沙 SOC 流失模型, 基于该研究发现的 LFoc 流失与 SOC 流失、泥沙颗粒组成的关系, 通过多元线性回归, 建立了侵蚀泥沙 LFoc 流失量预测方程, 公式如下:

$$A_{\text{LFoc}} = A_s \times \text{LFoc}_0 \times [4.229 \times (E/U_{\text{-Fslit}} - E/U_{\text{-Fslit0}}) - 2.094 \times (E/U_{\text{-clay}} - E/U_{\text{-clay0}})] \quad (4)$$

式中: A_{LFoc} 为轻组有机碳流失量(g); A_s 为侵蚀产沙量(kg); LFoc_0 为原状土 LFoc 含量(g/kg); $E/U_{\text{-Fslit}}$ 为侵蚀泥沙细粉粒分散前后含量比值; $E/U_{\text{-Fslit0}}$ 为原状土细粉粒分散前后含量比值; $E/U_{\text{-clay}}$ 为侵蚀泥沙黏粒分散前后含量比值; $E/U_{\text{-clay0}}$ 为原状土黏粒分散前后含量比值。建立方程后, 为进一步对方程预测精度进行验证, 将另一组测定参数输入方程, 对比方程预测 LFoc 流失量与实测数据, 方程拟合精度较高($R^2 = 0.727$, $p < 0.05$; 图 6)。

3 讨论

3.1 溅蚀、片蚀泥沙 LFoc 流失机制

降雨条件影响团聚体的破碎与迁移、产沙量, 从而

影响 LFoc 流失^[32-35]。本研究发现,相较雨强,坡度对活性有机碳矿化流失的影响更为重要。片蚀泥沙 LFoc 含量随坡度的增大而先减小后增大,片蚀泥沙 LFoc 含量与团聚体迁移量和产沙量随坡度的变化呈负相关,这是由于坡度对径流优先输移 LFoc 的过程有重要影响;而雨强对片蚀泥沙 LFoc 含量无显著影响。

表 4 不同降雨条件下坡面侵蚀泥沙 SOC 及 LFoc 含量特征

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	泥沙 SOC 含量/(g·kg ⁻¹)		泥沙 LFoc 含量/(g·kg ⁻¹)		团聚体 SOC 含量/(g·kg ⁻¹)			团聚体 LFoc 含量/(g·kg ⁻¹)		
		片蚀	溅蚀	片蚀	溅蚀	<0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm	<0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm
60	5	8.45±0.17 Cab	11.37±0.28 Bc	1.37±0.39 Aab	0.65±0.35 Aab	7.87±0.17 ABa	12.55±0.24 Ca	16.19±1.23 Ca	1.11±0.37 Aa	3.21±0.74 Aa	5.11±0.24 Cab
	10	8.15±0.30 Cb	9.18±0.03 Cb	1.23±0.36 Ab	0.37±0.20 Ab	7.74±0.35 Ba	12.22±0.26 Ca	16.49±1.44 Ca	1.10±0.46 Aa	2.84±1.01 Aa	3.63±0.78 Ab
	15	8.94±0.05 Aa	9.97±0.07 Ca	2.22±0.39 Aa	1.17±0.16 Aa	8.12±0.13 Aa	11.71±0.49 Aa	16.60±1.35 Aa	1.64±0.37 Aa	4.46±0.10 Aa	7.09±1.56 Aa
90	5	9.69±0.32 Bb	11.76±0.25 Bb	1.87±0.00 Aa	1.35±0.39 Aa	8.49±0.49 Ba	18.43±0.20 Bc	24.58±0.87 Bc	1.50±0.04 Aa	3.00±0.49 Aa	10.39±0.79 Bc
	10	9.08±0.27 Ba	11.73±0.14 Bb	1.24±0.48 Aa	0.99±0.23 Ba	8.23±0.24 Ba	14.80±1.32 Bb	20.91±0.49 Bb	1.03±0.46 Aa	2.22±0.89 Aa	6.28±0.41 Bb
	15	8.81±0.16 Aa	11.03±0.13 Ba	2.05±0.57 Aa	1.38±0.38 Aa	8.07±0.22 Aa	12.47±0.64 Aa	13.10±0.40 Aa	2.05±0.54 Aa	2.28±0.94 Aa	1.57±0.15 Ba
120	5	7.68±0.10 Ab	9.58±0.02 Ac	1.51±0.67 Aa	1.19±0.75 Aa	7.13±0.12 Ab	10.18±0.64 Aa	11.05±0.33 Aa	1.27±0.66 Aa	2.57±0.56 Aa	2.89±0.76 Ab
	10	7.41±0.08 Ab	7.94±0.25 Ab	1.30±0.04 Aa	0.35±0.03 Aa	6.79±0.02 Ab	9.98±0.04 Aa	11.44±0.49 Aa	1.15±0.19 Aa	1.80±0.52 Aa	2.39±0.83 Ab
	15	8.77±0.32 Aa	10.36±0.08 Aa	1.98±0.50 Aa	0.86±0.38 Aa	7.81±0.29 Aa	10.94±1.01 Aa	15.05±2.81 Aa	1.34±0.65 Aa	3.02±0.67 Aa	6.31±1.07 Aa

注:大写字母表示相同坡度下不同降雨强度的差异性,小写字母表示相同降雨强度下不同坡度的差异性。 $p<0.05$ 。

表 5 不同降雨条件下侵蚀泥沙及各粒级团聚体 SOC,LFoc 含量的相关性分析

项目	SOC		SOC			LFoc		LFoc		
	片蚀	溅蚀	<0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm	片蚀	溅蚀	<0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm
雨强	-0.329	-0.293	-0.493 **	-0.289	-0.376	-0.012	0.062	-0.024	-0.441 *	-0.213
坡度	0.139	-0.150	0.125	-0.325	-0.226	0.401 *	0.063	0.323	0.139	-0.172
片蚀 E/U	<0.002 mm	-0.118	0.115	0.008	-0.049	-0.264	0.010	0.022	0.328	-0.191
	0.002~0.02 mm	-0.178	-0.021	-0.013	-0.061	-0.188	-0.092	-0.246	0.186	-0.106
	0.02~0.05 mm	0.272	-0.026	0.225	0.364	0.568 **	-0.155	-0.323	-0.290	0.051
	0.05~0.25 mm	0.033	-0.154	-0.074	0.038	0.180	-0.075	0.070	-0.309	0.129
溅蚀 E/U	<0.002 mm	-0.135	0.302	-0.019	0.177	0.205	-0.514 **	-0.254	-0.368	-0.217
	0.002~0.02 mm	0.176	0.502 **	0.249	0.534 **	0.479 *	-0.440 *	-0.116	-0.274	-0.253
	0.02~0.05 mm	0.488 **	0.030	0.364	0.486 *	0.472 *	0.380	0.132	0.286	0.169
	0.05~0.25 mm	-0.027	-0.388 *	-0.110	-0.450 *	-0.366	0.523 **	0.158	0.304	0.382 *

注: ** 表示在 0.01 水平相关性显著; * 表示在 0.05 级别相关性显著。

通过对比溅蚀、片蚀泥沙 SOC 与 LFoc 含量发现,溅蚀泥沙 SOC 含量高于片蚀泥沙 SOC 含量,而溅蚀泥沙 LFoc 含量却低于片蚀 LFoc 含量,其中,溅蚀泥沙中 LFoc 未发生明显富集,而片蚀泥沙中 LFoc 发生明显富集。该结果证明了径流对 LFoc 的明显优先迁移,且决定了侵蚀泥沙中 LFoc 的富集程度。虽然降雨过程中,雨滴打击造成颗粒有机碳或高有机碳含量的团聚体碎片被优先跃移^[36],使得 SOC 在溅蚀泥沙中富集,却未造成溅蚀泥沙中 LFoc 的富集,径流则通过悬移方式优先输移了大量轻组有机碳。此过程中,雨滴打击团聚体破碎暴露 LFoc^[20,37],为径流提供 LFoc 原料的作用不可忽略。因此,侵蚀方式和泥沙输移方式,如跃移或悬浮,对侵蚀泥沙中 SOC 和 LFoc 的富集与流失有重要影响,即溅蚀能够造成不

同粒级团聚体间 SOC 的不均匀富集,却对 LFoc 影响微弱,径流则通过对 SOC 不同组分的分选迁移,使 LFoc 在泥沙中发生显著富集。

3.2 侵蚀泥沙团聚体破碎、迁移对 LFoc 富集的影响

片蚀过程中,径流侵蚀泥沙<0.05 mm 黏粉粒、0.05~0.25 mm 团聚体和 0.25~2 mm 团聚体中均发生 SOC 富集现象,这与前人研究结果相同^[38],与团聚体的非均质性有关。本研究发现,较 0.25~2 mm 团聚体,LFoc 更易在<0.05 mm 黏粉粒、0.05~0.25 mm 团聚体中出现富集。这是由于径流泥沙中 0.25~2 mm 团聚体的 SOC 和 LFoc 富集状况更依赖于溅蚀泥沙 SOC 和 LFoc 富集状况,而小粒径团聚体,包括<0.05 mm 黏粉粒、0.05~0.25 mm 团聚体,的 SOC 和 LFoc 富集状况则更依赖于径流的选择性输移。

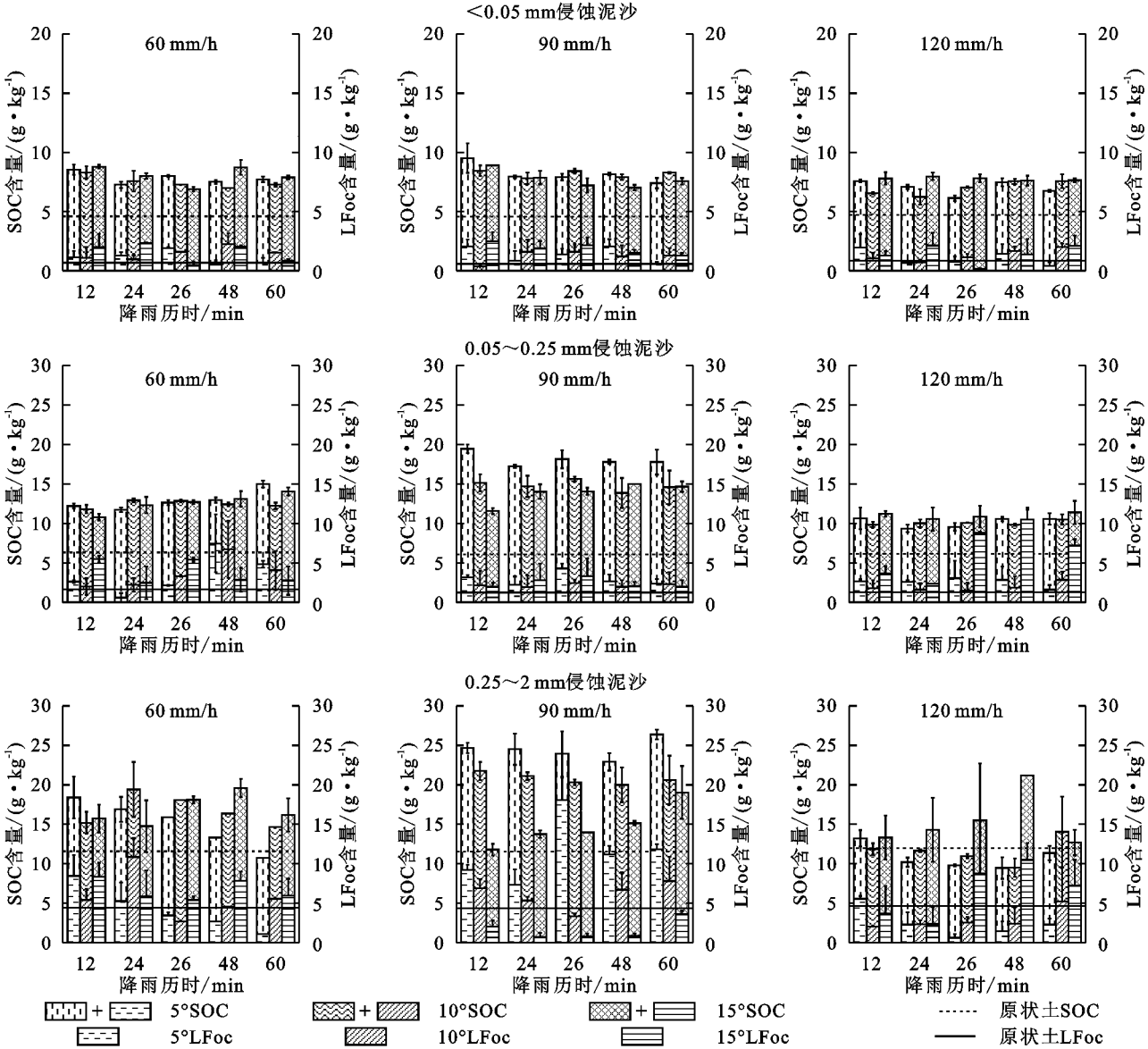


图3 侵蚀泥沙团聚体 SOC 与 LFoc 含量时间变化特征

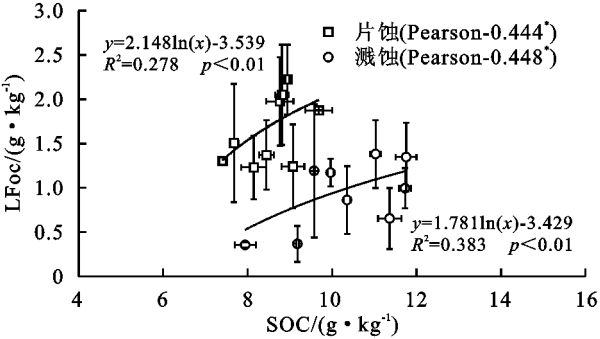


图4 片蚀泥沙和溅蚀泥沙中 SOC 与 LFoc 含量的关系

3.3 片蚀泥沙 LFoc 流失量估算

水蚀条件下土壤有机碳矿化量无法通过产沙量与原土壤有机碳含量准确预测^[31,39],进一步考虑片蚀过程中团聚体破碎作用下轻质有机碳的富集可提高预测精度。本研究通过分析侵蚀泥沙团聚体迁移特征发现,<0.02 mm 粒级团聚体迁移与 LFoc 富集

显著相关($p < 0.01$)。因此,本研究以<0.02 mm 团聚体迁移量,建立了片蚀泥沙 LFoc 流失量估算方程,以期提高小尺度下 LFoc 流失预测的精度。对比预测值与实测值发现,当 LFoc 流失量较小时,方程预测值与实测值更接近,这可能与<0.02 mm 团聚体迁移量系数的确定有关,该系数与侵蚀土壤性质有关。此外,该 LFoc 流失量估算方法应用于其他土壤时方程系数的变化,以及决定该系数的关键土壤性质有待进一步研究。

4 结论

(1) 相较雨强,坡度对活性有机碳矿化流失的影响更为重要。片蚀泥沙 LFoc 含量随坡度的增大而先减小后增大,片蚀泥沙 LFoc 含量与团聚体迁移量和产沙量随坡度的变化呈负相关,这是由于坡度对径

流优先输移 LFoc 的过程有重要影响;而雨强对片蚀泥沙 LFoc 含量无显著影响。

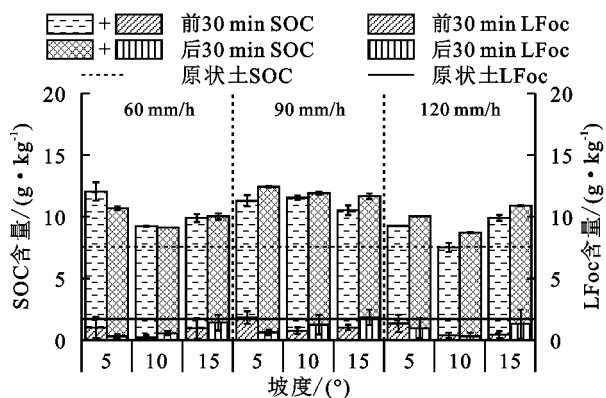


图5 溅蚀泥沙 SOC 含量和 LFoc 含量时间变化特征

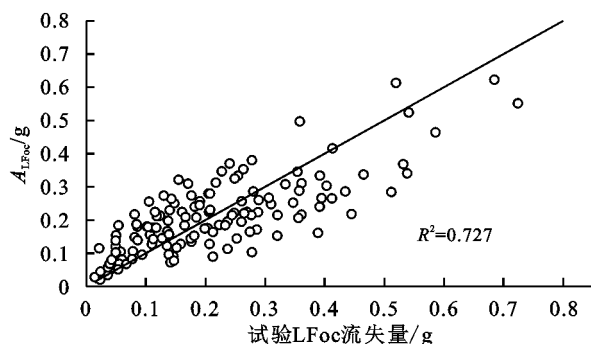


图6 LFoc 的预测流失量与实际流失量对比

(2) 溅蚀泥沙 SOC 含量明显高于片蚀泥沙 SOC 含量,但溅蚀泥沙 LFoc 含量明显低于片蚀 LFoc 含量;且溅蚀 LFoc 未发生明显富集,而片蚀 LFoc 存在明显富集。雨滴打击团聚体破碎暴露 LFoc,为径流提供了 LFoc 原料,却未造成溅蚀泥沙中 LFoc 的富集,随后,径流则通过悬移方式优先输移了大量轻组有机碳。

(3) 片蚀泥沙各粒径团聚体间不仅 SOC 发生不均匀富集,LFoc 亦发生不均匀富集。其中, <0.05 mm 黏粉粒、 $0.05\sim0.25$ mm 团聚体中 LFoc 发生明显富集,而在 $0.25\sim2$ mm 团聚体中 LFoc 只有在小雨强和小坡度条件下发生富集。

(4) <0.02 mm 粒级团聚体迁移与泥沙 LFoc 的富集极显著相关($p<0.01$),通过 <0.02 mm 粒级团聚体迁移量对 LFoc 流失量进行了估算,拟合效果较好($R^2=0.727$)。

参考文献:

[1] Wang Z, Yang Y, Li J, et al. Simulation of terrestrial carbon equilibrium state by using a detachable carbon cycle scheme[J]. Ecological Indicators, 2017,75:82-94.
[2] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink[J]. Bioscience, 2007,57(4):337-346.

[3] Quinton J N, Govers G, Van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J]. Nature Geoscience, 2010,3(5):311-314.
[4] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995,267(5201):1117-1123.
[5] 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.
[6] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].应用生态学报,2011,22(7): 1921-1930.
[7] Yan D, Wang D, Yang L. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007,44(1):93-101.
[8] Schomakers J, Mayer H, Lee J Y, et al. Soil aggregate breakdown and carbon release along a chronosequence of recovering landslide scars in a subtropical watershed[J]. Catena, 2018,165:530-536.
[9] Trigalet S, Gabarron-Galeote M A, Van Oost K, et al. Changes in soil organic carbon pools along a chronosequence of land abandonment in southern Spain[J]. Geoderma, 2016,268:14-21.
[10] Gregorich E G, beare M H, Mckim U F, et al. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(3):975-985.
[11] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns[J]. Soil Science, 1983,135(2): 79-87.
[12] von Luetzow M, Koegel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(9):2183-2207.
[13] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1994,74(4):367-385.
[14] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(10):1345-1352.
[15] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2001,

- 52(3):345-353.
- [16] Liu X, Wu X, Liang G, et al. A global meta-analysis of the impacts of no-tillage on soil aggregation and aggregate-associated organic carbon[J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(18):5292-5305.
- [17] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996,28(4):665-676.
- [18] 武天云, Schoenau Jeff J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004,15(4):717-722.
- [19] Liu L, Li Z, Xiao H, et al. The transport of aggregates associated with soil organic carbon under the rain-induced overland flow on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019,44(10):1895-1909.
- [20] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014,72:55-65.
- [21] 范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同施肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. *土壤学报*, 2019,56(3):638-649.
- [22] 裴会敏, 许明祥, 李强, 等. 侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展[J]. *水土保持研究*, 2012,19(6):269-274.
- [23] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *水土保持研究*, 2018,25(4):22-29.
- [24] 栗文玉, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 黄土丘陵区人工柠条恢复为主小流域土壤有机碳空间变异性及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020,27(2):15-22.
- [25] 王伟, 李占斌, 李鹏, 等. 生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2020,27(2):35-41.
- [26] 陈永宗. 黄土高原土壤侵蚀规律研究工作回顾[J]. *地理研究*, 1987,6(1):76-85.
- [27] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998,5(62):1367-1377.
- [28] Ramnarine R, Voroney R P, Dunfield K E, et al. Characterization of the heavy, hydrolysable and non-hydrolysable fractions of soil organic carbon in conventional and no-tillage soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018,181:144-151.
- [29] 张艺, 尹力初, 戴齐. 后续施肥措施改变对红壤性水稻土团聚体有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016,30(6):278-283.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [31] Starr G C, Lal R, Malone R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes[J]. *Land Degradation & Development*, 2000,11(1):83-91.
- [32] 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. *水土保持学报*, 2011,25(6):100-104.
- [33] 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.
- [34] 朱方方, 程金花, 王书韬, 等. 湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系[J]. *水土保持学报*, 2021,35(4):27-33.
- [35] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. *土壤学报*, 2012,49(3):465-473.
- [36] Lin J, Fang N, Zhang Y, et al. Dynamics of soil organic carbon in different-sized aggregates under splash erosion[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022,22(6):1713-1723.
- [37] 闫峰陵. 红壤表土团聚体稳定性特征及其对坡面侵蚀过程的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [38] Liu L, Li Z W, Li Z J, et al. Effect of aggregate breakdown on the unevenly enriched organic carbon process in sediments under a rain-induced overland flow[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,204:104752.
- [39] 刘琳. 黄土坡面有机碳迁移流失机制及模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.