

DOI: 10.11766/trxb202201290040

张风宝, 李玄添, 申楠, 杨明义. 黄土坡面细沟间和细沟侵蚀对有机碳流失贡献的定量分析[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1398–1408.  
ZHANG Fengbao, LI Xuantian, SHEN Nan, YANG Mingyi. Quantitatively Partitioning Organic Carbon Loss by Interrill and Rill Erosion on The Loess Slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1398–1408.

# 黄土坡面细沟间和细沟侵蚀对有机碳流失贡献的定量分析\*

张风宝<sup>1, 2</sup>, 李玄添<sup>1</sup>, 申楠<sup>1, 2</sup>, 杨明义<sup>1, 2†</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 细沟间和细沟侵蚀剥离和输移土壤的机制不同导致有机碳输移存在差异, 然而因研究手段限制, 这两种侵蚀方式对有机碳输移的贡献、影响等研究有待深入。本文利用模拟降雨与 <sup>7</sup>Be 示踪技术, 在定量化分析细沟间和细沟侵蚀对黄土坡面侵蚀产沙贡献的基础上, 进一步分析其对有机碳输移的贡献及影响。结果表明 5°小区以细沟间侵蚀为主, 其产沙贡献率为 86%, 大于 5°的小区以细沟侵蚀为主, 其产沙贡献率介于 61%~71%之间, 在降雨过程中甚至可达 96%。降雨过程中坡面侵蚀泥沙有机碳平均富集比为 1.16±0.15, 细沟间侵蚀泥沙有机碳平均富集比为 1.50±0.50, 富集可导致有机碳流失率增加 0.008~0.028 g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>。坡度大于 5°的小区细沟侵蚀对有机碳流失贡献率介于 55%~62%之间, 低于对侵蚀产沙的贡献, 但仍占主导地位。坡面侵蚀产沙量可解释有机碳流失量变化的 97%, 细沟间侵蚀产沙可解释细沟间有机碳流失量变化的 89%。侵蚀过程中剧烈的细沟侵蚀可导致细沟间侵蚀泥沙有机碳的富集比增大。

**关键词:** 细沟侵蚀; 细沟间侵蚀; 有机碳流失; <sup>7</sup>Be 示踪技术; 富集比

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## Quantitatively Partitioning Organic Carbon Loss by Interrill and Rill Erosion on The Loess Slope

ZHANG Fengbao<sup>1, 2</sup>, LI Xuantian<sup>1</sup>, SHEN Nan<sup>1, 2</sup>, YANG Mingyi<sup>1, 2†</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】The differences in soil detachment and transport mechanisms between interrill and rill erosion lead to the differences in organic carbon loss by interrill and rill erosion. However, few studies have explored the effects and contributions of interrill and rill erosion on organic carbon loss during the erosion process because of the limitation of research methods.

\* 国家自然科学基金项目(41877080, 42177338)和陕西省林业科学院黄土高原生态修复创新团队项目(SXLK2020-03-02)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China( Nos. 41877080, 42177338 ) and Loess Plateau Ecological Restoration Innovation Team, Shaanxi Academy of Forestry ( No. SXLK2020-03-02 )

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ymyzly@163.com

作者简介: 张风宝(1980—), 男, 宁夏彭阳人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀及其效应研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2022-01-29; 收到修改稿日期: 2022-06-27; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-25

Successful use of the radionuclide  $^7\text{Be}$  to document soil erosion provides a means of addressing this need. Thus, the objectives of this study were to first estimate the contribution of interrill and rill erosion to sediment yield and then quantitatively explore the effects and contributions of interrill and rill erosion on organic carbon loss in the loess slope. 【Method】 Simulated rainfall experiments with five slope gradients ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  and  $30^\circ$ ) were conducted under different rainfall intensities in the field to investigate soil and organic carbon loss and  $^7\text{Be}$  tracing technology was used to quantify the contribution rate of interrill and rill erosion on sediment yield and organic carbon loss for the loess slope. 【Result】 Interrill erosion is the main and the relative contribution of interrill erosion on sediment yield was 86% on the  $5^\circ$  plot. However, rill erosion dominated on the plots with a gradient greater than  $5^\circ$ . The relative contribution of rill erosion on sediment yield ranged from 61% to 71% and could even reach 96% during the rainfall. The average enrichment ratio of organic carbon of sediment from the entire plot and the interrill area was  $1.16 \pm 0.15$  and  $1.50 \pm 0.50$ , respectively, during the rainfall. Also, the enrichment could increase the organic carbon loss rate from 0.008 to  $0.028 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ . In addition, the relative contribution of rill erosion to organic carbon loss was between 55% and 62% on plots with a gradient greater than  $5^\circ$  and was lower than those of rill erosion to sediment production, but still dominant. Sediment yield from the entire plot and the interrill area could respectively explain 97% and 89% of the variations of organic carbon loss from the entire plot and interrill area. 【Conclusion】 The organic carbon enrichment ratio had lesser effects on organic carbon loss when rill erosion occurred severely. Sediment yield determined the amount of organic carbon loss and severe rill erosion could enhance the enrichment ratio of organic carbon of sediment from the interrill area.

**Key words:** Rill erosion; Interrill erosion; Organic carbon loss;  $^7\text{Be}$  tracer technology; Enrichment ratio

土壤侵蚀是土壤碳库动态变化的主要驱动因子和影响全球碳循环过程的主要环节<sup>[1-4]</sup>。目前大多研究将坡面土壤侵蚀过程作为一个“黑箱”处理，或只静态对比长期侵蚀沉积形成的侵蚀区或沉积区有机碳的差异，以此来表征土壤侵蚀对有机碳库及碳循环的影响<sup>[5-7]</sup>，而对降雨过程中土壤分离、输移、沉积过程及不同侵蚀方式（溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀等）相互作用下有机碳变化特征缺乏统一的认识和系统的理论解释，导致很难有效揭示土壤侵蚀在土壤碳库动态变化和碳循环中的作用，使得对土壤侵蚀在全球碳循环过程中扮演的角色（源/汇）的认识还存在分歧<sup>[8-12]</sup>。

已有研究显示土壤侵蚀过程能够导致土壤有机碳的优先输移，使侵蚀泥沙中有机碳含量高于原土壤有机碳含量，即富集比（Enrichment ratio） $>1$ <sup>[13-15]</sup>，但也有泥沙中有机碳含量小于表层土壤的研究报道<sup>[16-17]</sup>。坡面侵蚀过程中有机碳流失量和泥沙有机碳富集比主要受土壤、地形、降雨、径流、耕作措施、植被覆盖等因素影响，绝大多数情况下侵蚀产沙越大，有机碳流失量就越多，富集比就越接近 $1$ <sup>[14-15, 18-22]</sup>。同时，侵蚀过程可能导致有机碳组分发生变化，细沟间侵蚀可导致矿质态有机碳优先迁移<sup>[6, 23]</sup>。也有研究表明有机碳富集比随着土壤流失量的增大而增大，并推断可能是不同耕作措施造成的<sup>[24]</sup>。此外，

坡面径流动力学参数与有机碳输移之间的关系也得以分析，并建立了相关经验模型<sup>[25-26]</sup>。然而，目前绝大多数研究从整体上对土壤侵蚀过程中有机碳流失、富集与侵蚀产沙及其影响因素的关系进行分析，把整个坡面作为一个“黑箱”或者针对单一侵蚀方式进行研究。

细沟间侵蚀和细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要过程，二者在土壤分离和输移过程中的作用机制存在较大差异，加之土壤有机碳本身特性（低密度及与土壤不同粒级颗粒结合存在差异等），导致不同侵蚀方式对有机碳输移特征存在差异。对于细沟间侵蚀，研究表明侵蚀过程存在分选性，导致泥沙有机碳富集比 $>1$ ，且富集比与侵蚀产沙量呈负相关<sup>[14-15, 27-29]</sup>。对于细沟侵蚀，研究表明其对侵蚀泥沙不存在或者分选性不明显，对有机碳输移也一样，其富集比非常接近 $1$ <sup>[27, 29]</sup>。这些研究结果均是针对单一细沟间或细沟侵蚀试验获得，但在坡面侵蚀过程中，大多数情况下细沟间侵蚀和细沟侵蚀同时发生，两者间存在一定的相互作用，机械式的分离研究与坡面真实侵蚀状况存在差异，并不足以深刻理解不同侵蚀方式相互作用对泥沙有机碳流失和富集的影响。但因传统研究手段限制，细沟间侵蚀和细沟侵蚀对有机碳流失及富集的影响难以区分。

$^7\text{Be}$  是宇宙射线轰击大气中氮氧原子而产生的

天然放射性核素, 主要随降雨沉降到地表, 能被土壤颗粒紧密吸附, 半衰期短 (53.3d), 可示踪短期内和次降雨过程坡面土壤侵蚀速率, 描述坡面细沟间侵蚀强度空间分布, 定量区分次降雨过程中细沟和细沟间侵蚀量的动态变化及贡献<sup>[30-37]</sup>。<sup>7</sup>Be 示踪技术为开展坡面不同侵蚀方式对泥沙有机碳流失及富集影响的研究提供了手段。因此, 本研究以模拟降雨条件下的坡面侵蚀过程为研究对象, 利用 <sup>7</sup>Be 示踪技术, 在定量区分细沟间侵蚀和细沟侵蚀对侵蚀产沙贡献的基础上, 分析细沟间和细沟侵蚀对坡面有机碳输移的贡献及其富集的影响, 以期深入分析坡面侵蚀过程中有机碳流失机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验小区布设在陕西省杨凌区国家节水博览园内, 修建了六个规格相同 (长 5 m, 宽 2 m) 坡度不同 (5°、10°、15°、20°、25°、30°) 的径流小区。小区坡面利用 PVC 板分成 1.5 m 宽的降雨试验区 and 0.5 m 宽的 <sup>7</sup>Be 背景值采样区。试验用土为杨凌黏黄土, 取耕地表层 0~25 cm 土壤 (黏粒含量 16%、粉粒含量 57%、砂粒含量 27%, 有机碳含量 3.25 g·kg<sup>-1</sup>) 装填小区, 采用分层装填控制容重 (10 cm 为一层), 30 cm 以下土壤容重控制在 1.3 g·cm<sup>-3</sup> 左右, 表层土壤容重控制在 1.2 g·cm<sup>-3</sup> 左右, 与耕层土壤容重接近。填完后自沉降一个月左右, 之后对地表 0~20 cm 多次翻耕并耙平, 使得土壤均匀混合且与耕地条件相近, 小区土壤与砖结合处注入沥青以消除边界效应。小区从冬末开始放置达 5 个月以上, 在此期间清除杂草使小区坡面裸露, 并时刻关注天气, 下雨时值守在旁, 一旦发现坡面开始侵蚀立即将小区用防水彩条布遮盖, 避免发生严重侵蚀, 在未下雨或小雨时不用覆盖, 以接收沉降的 <sup>7</sup>Be 用于示踪研究。

### 1.2 模拟降雨

本试验模拟降雨采用侧喷式模拟降雨器, 支架高 4 m, 喷头直径为 9 mm, 用压力控制雨强。试验设计雨强为 1.5 mm·min<sup>-1</sup>, 因野外模拟降雨影响因素较多, 雨强难以控制, 5°、10°、15°、20°、25° 和 30° 小区模拟降雨的实测雨强分别为 1.65、1.68、2.02、1.72、1.53 和 1.43 mm·min<sup>-1</sup>。因测定 <sup>7</sup>Be 样品用时较长, 不能在短时期内做完所有降雨试验,

导致每次模拟降雨的日期不同, 使得小区坡面表层土壤前期含水量差别较大, 分别为 3.77%、14.64%、13.81%、17.48%、3.78% 和 10.90% (质量含水量)。3 个侧喷式降雨器分别放置在小区左右和坡顶的位置。降雨前进行雨强和均匀度率定, 坡面降雨均匀度控制在 80% 以上。模拟降雨开始后记录产流时间、细沟出现时间等, 用编号的大塑料桶 (10 L) 依次收集径流泥沙全样, 桶满后记录时间并换桶, 直至降雨结束, 降雨历时不少于 40 min。

### 1.3 样品采集与处理

对收集的径流泥沙称重, 静置 24h 后用虹吸法分离清水, 然后风干称重, 取少量进行水分测定, 算出干泥沙量。风干的泥沙样首先在实验室内全部过 2 mm 的筛子, 之后部分过 1 mm 筛子装入特制的圆柱形塑料盒 (底直径 7.7 cm, 高 7.7 cm) 待测 <sup>7</sup>Be, 部分过 0.15 mm 筛子用于有机碳测定。

模拟降雨前在小区背景值采样区内采集 <sup>7</sup>Be 背景值样, 首先在背景采样区上中下部各采集一个背景值全样, 采样深度为 2 cm; 然后在背景值采样区坡面分多点采集分层剖面, 共分 7 层, 采用质量控制深度的方法, 每一点采样面积为 10 cm×10 cm, 在 1.2 cm 深度内每 0.2 cm 为一层, 1.2~1.5 cm 为一层, 不同点同一层土壤混合为该层的土样, 总采样面积为 0.25 m<sup>2</sup>。采集的土壤风干后过 2 mm 筛, 用于测定 <sup>7</sup>Be 和有机碳的土壤样品, 其处理方式与上述与泥沙样品一致。

### 1.4 样品测定

土壤和侵蚀泥沙中有机质 (碳) 含量采用重铬酸钾外加热法测定。放射性核素 <sup>7</sup>Be 活度采用美国 ORTEC 公司生产的 8192 道低本底  $\gamma$  能谱仪测定, 测定时间为 86 400 s, 在 477.6 keV 能量处利用全峰面积法 (TPA) 提取能谱峰面积, 结合谱仪的探测效率, 求算 <sup>7</sup>Be 比活度。由于 <sup>7</sup>Be 半衰期短, 没有标准源, 通过制定含有 <sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs、<sup>226</sup>Ra、<sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>40</sup>K、<sup>230</sup>Th、<sup>232</sup>Th、<sup>228</sup>Ra、<sup>210</sup>Po 的混合标准源得到谱仪的探测效率曲线, 计算得到 <sup>7</sup>Be 探测效率<sup>[38]</sup>。所有样品中 <sup>7</sup>Be 活度利用衰变公式校正到采样时活度。

### 1.5 细沟间产沙贡献率的计算

利用 Zhang 等<sup>[30]</sup>提出的 <sup>7</sup>Be 估算细沟间侵蚀产沙贡献率的线性模型估算细沟间侵蚀贡献率, 模型形式如下:

$$Y=100 C_{Be, s} / C(0) \quad (1)$$

式中,  $Y$  为坡面细沟间侵蚀相对贡献率 (%);  $C_{Be, s}$  为降雨侵蚀过程泥沙中  $^{7}Be$  质量活度 ( $Bq \cdot kg^{-1}$ );  $C(0)$  为背景值区域  $^{7}Be$  的初始质量浓度 ( $Bq \cdot kg^{-1}$ ), 该数据由背景采样区  $^{7}Be$  剖面分布函数拟合计算得到, 具体可见相关论文<sup>[30, 39]</sup>。

根据式(1)计算的坡面细沟间侵蚀产沙贡献率, 结合实测的坡面侵蚀产沙量, 计算细沟侵蚀产沙贡献率, 进而计算细沟间侵蚀速率和细沟侵蚀速率。之后结合小区土壤有机碳含量及泥沙中有机碳含量, 根据已有研究结果认为细沟侵蚀对侵蚀产沙和有机碳侵蚀输移不存在分选性<sup>[27, 29]</sup>, 其有机碳含量与小区土壤一致, 计算细沟间侵蚀和细沟侵蚀有机碳输移量及相应贡献率。坡面侵蚀泥沙有机碳富集比用泥沙中有机碳含量除以坡面土壤中有机碳含量所得, 细沟间侵蚀泥沙富集比用细沟间侵蚀泥沙有机碳含量除以坡面土壤中有机碳含量所得。在计算单次降雨泥沙有机碳含量及富集比时采用降雨过程侵蚀产沙速率加权。本研究未考虑土壤可溶性有机碳随径流的损失。采用 SPSS21.0、Excel 对数据统计、分析及作图。

## 2 结果

### 2.1 细沟间和细沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献

利用式(1)计算各小区降雨过程中细沟间和细沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献率(图1)。与坡面侵蚀从溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀的演化过程一致,

在侵蚀初期, 坡面基本以细沟间侵蚀产沙为主, 随着降雨进行, 坡度大于  $5^{\circ}$  的小区细沟侵蚀贡献率快速增加, 而细沟间侵蚀贡献率快速减小, 细沟侵蚀贡献率超过 65% 后到达一个准稳态, 准稳态下细沟侵蚀贡献率大部分在 70%~90% 之间波动, 最大达 96%。25° 和 30° 小区在降雨后期出现细沟侵蚀贡献率明显降低, 细沟间侵蚀贡献增加。5° 小区在降雨过程中基本未出现明显的细沟侵蚀, 细沟间侵蚀一直占主导, 贡献率在 73%~100% 之间。图 1c 是次降雨细沟和细沟间侵蚀对坡面产沙的贡献率, 5° 小区次降雨细沟间侵蚀贡献率为 86%, 其余小区细沟侵蚀贡献率在 61%~74% 之间。野外模拟降雨试验各小区地表条件及降雨条件难以控制, 本研究中坡度对细沟间和细沟侵蚀贡献率的影响并未被体现。

降雨过程中细沟间和细沟侵蚀产沙率的变化如图 2 所示。整体上, 细沟间侵蚀和细沟侵蚀产沙率的变化与坡面侵蚀产沙率的变化一致, 随降雨历时呈先增加后降低的模式, 不同侵蚀方式峰值出现时间存在差异, 细沟间侵蚀峰值一般出现在产流初期, 细沟侵蚀峰值晚于细沟间侵蚀, 一般出现在降雨中前期。坡面侵蚀产沙率与细沟间和细沟侵蚀产沙率之间呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 但与细沟侵蚀产沙率的相关性 ( $r = 0.93$ ) 高于细沟间侵蚀 ( $r = 0.68$ ), 细沟间和细沟侵蚀速率尽管也呈显著性正相关 ( $P < 0.05$ ), 但相关系数较低, 为 0.36。

### 2.2 细沟间和细沟侵蚀对坡面有机碳流失的贡献

所有小区坡面侵蚀泥沙有机碳含量在  $3.04 \sim 6.10 g \cdot kg^{-1}$  之间, 平均值为  $3.73 \pm 0.61 g \cdot kg^{-1}$ , 变异系数为 16%, 富集比平均值为  $1.16 \pm 0.15$ , 坡面泥沙

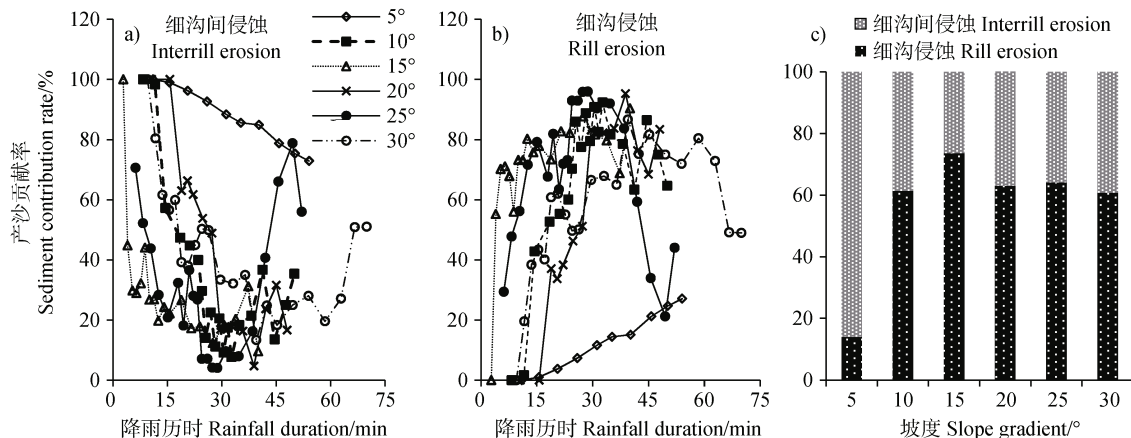


图 1 降雨过程中细沟间 (a) 和细沟侵蚀 (b) 及次降雨细沟间和细沟侵蚀 (c) 对坡面侵蚀产沙的贡献率

Fig. 1 Contribution rate of interrill (a) and rill (b) erosion to total erosion yield during rainfall and for events (c)

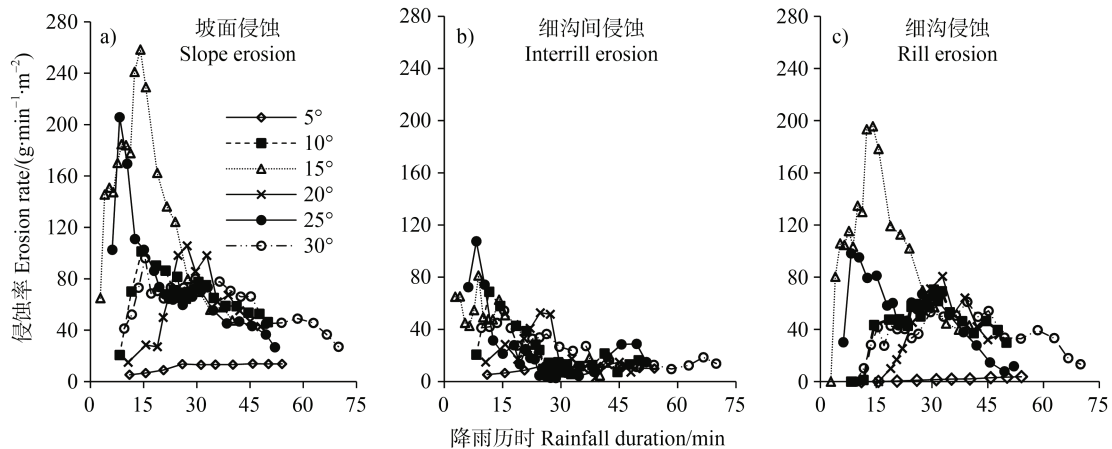


图 2 降雨过程中坡面侵蚀率 (a)、细沟间侵蚀率 (b) 及细沟侵蚀率 (c) 的动态变化

Fig. 2 Dynamic change in slope erosion rate (a), interrill erosion rate (b) and rill erosion rate (c) during rainfall

有机碳含量和富集比随降雨历时呈降低趋势 (图 3a)。根据细沟间侵蚀过程对土壤的输移具有分选性, 而细沟侵蚀过程不具有分选性的研究结论, 细沟间侵蚀过程导致泥沙有机碳富集, 估算细沟间侵蚀泥沙有机碳含量在  $3.04 \sim 11.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $4.82 \pm 1.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数为 33%, 富集比平均值为  $1.50 \pm 0.50$ , 且含量和富集比随降雨历时变异性大, 无趋势性变化 (图 3b), 泥沙有机碳富集可导致有机碳流失速率增加  $0.008 \sim 0.028 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

细沟间侵蚀和细沟侵蚀对坡面有机碳输移的贡献率与对侵蚀产沙的贡献率的趋势基本一致 (图 4a 和图 4b), 因细沟间侵蚀的分选性, 在数值上有一定差异。随降雨进行, 细沟侵蚀对有机碳输移的贡献率超过 60% 后到达一个准稳态, 准稳态下贡献率大部分在 65%~85% 之间波动, 最大为 94%。对次

降雨而言, 5°小区细沟间侵蚀输移有机碳占总输移碳的 90%, 其他小区仍以细沟输移有机碳为主, 占总量的 55%~62% (图 4c)。

降雨过程中坡面侵蚀、细沟间侵蚀和细沟侵蚀的有机碳流失率的变化 (图 5) 表明, 无论是坡面总有机碳流失速率, 还是细沟间和细沟输移的有机碳流失速率, 其整体变化趋势与侵蚀产沙随降雨历时的变化趋势相似, 遵循随降雨进行先增大后减少, 最后趋于稳定的模式, 在模拟降雨为恒定雨强下基本以单峰为主, 细沟侵蚀有机碳流失率随降雨进行而增加、减少及准稳态的历时长短等受坡度、雨强、前期含水量等影响, 不同侵蚀方式及不同场次之间有一定差异。细沟侵蚀有机碳流失率随降雨进行峰值较为明显, 细沟间侵蚀有机碳流失率峰值不明显, 且整体显示出减少的趋势。坡面有机碳流失速率与

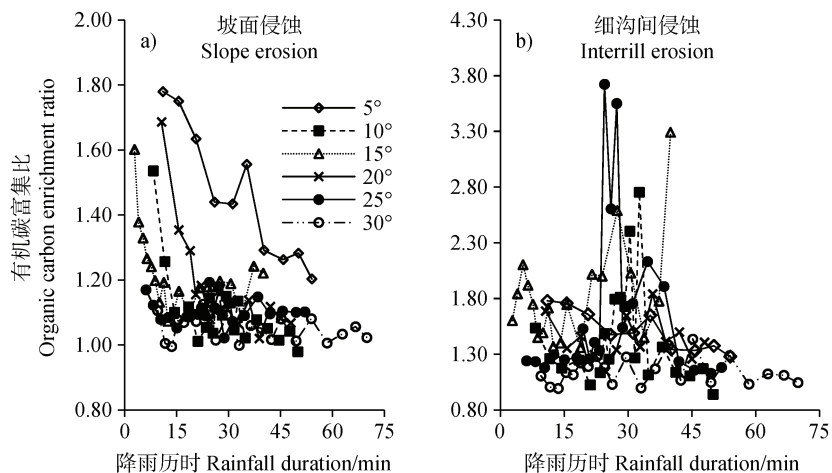


图 3 坡面侵蚀泥沙 (a) 和细沟间侵蚀泥沙 (b) 有机碳富集比

Fig. 3 Organic carbon enrichment ratio of sediment of slope erosion (a) and interrill erosion (b)

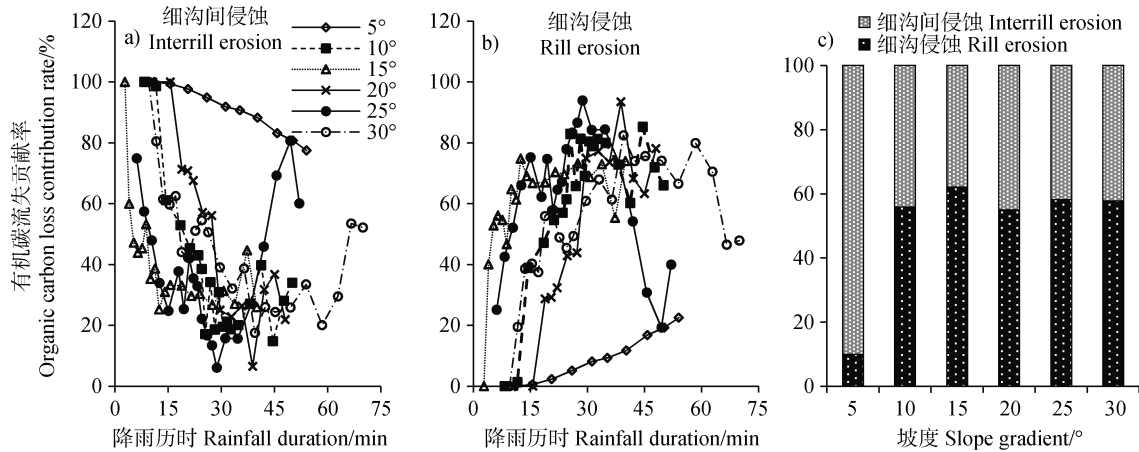


图4 降雨过程细沟间 (a) 和细沟侵蚀 (b) 及次降雨细沟和细沟间侵蚀 (c) 对有机碳流失的贡献率

Fig. 4 Contribution rate of interrill (a) and rill (b) erosion to total organic carbon loss during rainfall and for events (c)

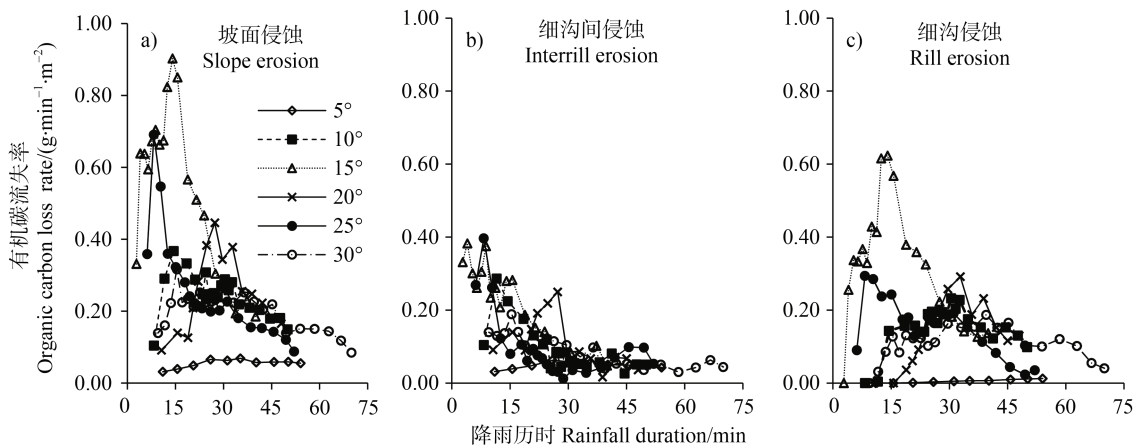


图5 降雨过程中坡面侵蚀 (a)、细沟间侵蚀 (b) 和细沟侵蚀 (c) 有机碳流失率的变化

Fig. 5 Dynamic change in organic carbon loss rate by slope erosion (a), interrill erosion (b) and rill erosion (c) during rainfall

细沟间和细沟侵蚀输移的有机碳速率呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 0.80 和 0.90, 细沟间和细沟侵蚀输移有机碳速率也呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.46。

### 2.3 坡面侵蚀产沙与有机碳流失的对应分析

有机碳输移速率主要由侵蚀产沙速率和泥沙中有机碳含量决定, 而泥沙中有机碳含量在侵蚀过程中又受到侵蚀产沙量的影响, 随侵蚀产沙率的增加, 泥沙中有机碳含量及其富集比降低并趋于稳定, 呈幂函数递减 (图 6)。降雨过程中侵蚀产沙速率与有机碳流失速率具有极显著正相关, 二者变化趋势相似 (图 2 和图 5), 侵蚀产沙速率变化可解释有机碳流失速率变化的 97%, 泥沙中有机碳富集对其流失速率的影响较小。针对不同侵蚀方式, 细沟间侵蚀因其存在明显分选性, 细沟间侵蚀产沙速率可解释

其输移有机碳流失速率变化的 89%, 说明针对细沟间侵蚀过程, 泥沙富集对有机碳流失速率有一定的影响, 而细沟侵蚀因其不存在分选性, 侵蚀产沙过程直接决定有机碳流失过程, 其微小的差异主要因坡面有机碳背景值不同造成。

细沟间和细沟侵蚀对坡面侵蚀产沙和有机碳输移的贡献率具有相似性 (图 1 和图 4), 相同侵蚀方式对产沙的贡献率和对有机碳输移的贡献率呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.99, 细沟间侵蚀对有机碳输移和产沙贡献率在低值区间内变异性较大, 而细沟侵蚀对二者贡献率在高值区间内变异较大 (图 1 和图 4)。细沟间侵蚀对有机碳输移的贡献率大于其对产沙的贡献率, 平均高出  $5.61\% \pm 4.28\%$ , 最大高出 17.37%。细沟侵蚀正好相反, 对有机碳输移的贡献率小于对产沙的贡献率。次降雨事件细沟

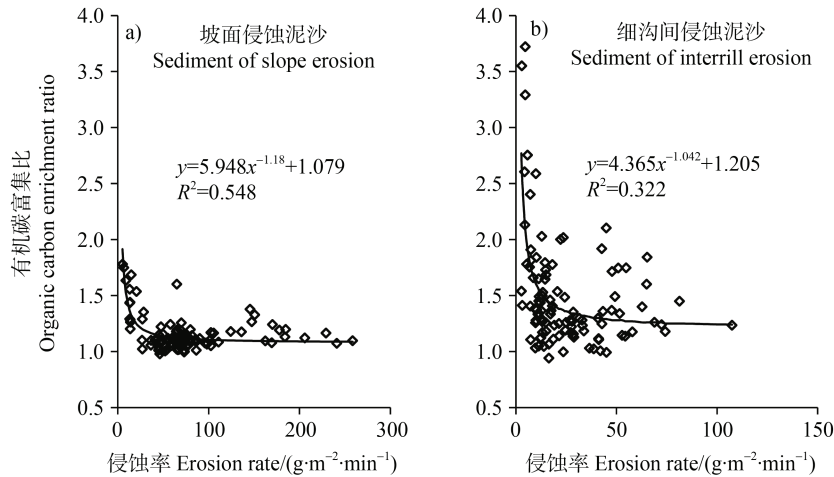


图 6 坡面侵蚀泥沙 (a) 和细沟间侵蚀泥沙 (b) 有机碳富集比与侵蚀率的关系

Fig. 6 Relationship between organic carbon enrichment ratio of sediment from slope erosion ( a ) and interrill erosion ( b ) and erosion rate

间侵蚀对有机碳输移的贡献较对产沙的贡献高 2.98%~11.54%。不同侵蚀方式产沙贡献率与泥沙富集比的相关关系表明 (图 7), 坡面泥沙有机碳富集比随细沟间侵蚀产沙贡献增加呈增加趋势, 随细沟

侵蚀产沙贡献增加呈减少趋势 (图 7a); 而细沟间侵蚀泥沙有机碳富集比随细沟间和细沟侵蚀产沙贡献率增加呈先减少后增加模式, 出现细沟侵蚀贡献较大时细沟间侵蚀泥沙富集比较高的现象 (图 7b)。

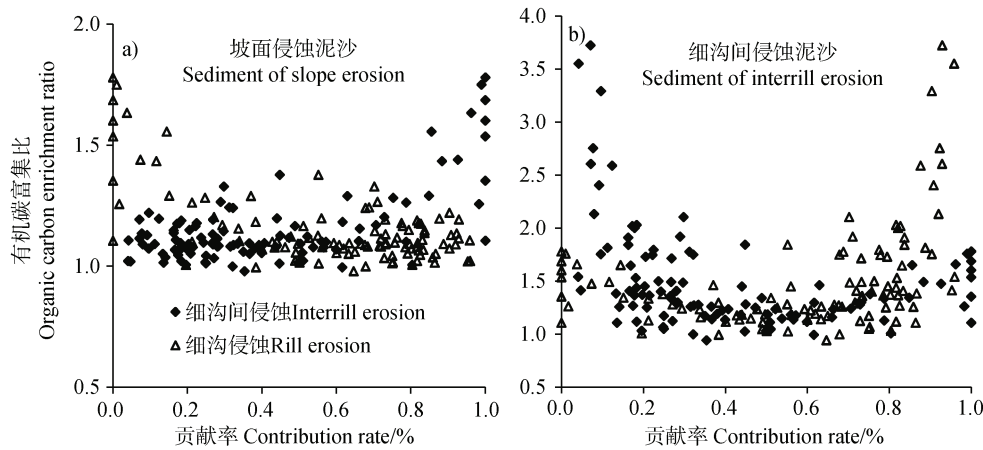


图 7 坡面侵蚀泥沙 (a) 和细沟间侵蚀泥沙 (b) 有机碳富集比与细沟和细沟间侵蚀贡献率关系

Fig. 7 Relationship between organic carbon enrichment ratio of sediment by slope erosion ( a ) and interrill erosion ( b ) and the contribution rate of interrill and rill erosion

### 3 讨论

细沟间和细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要形式, 不同侵蚀方式对侵蚀产沙的贡献随降雨历时、坡度、降雨特性、土壤类型、径流特征等条件的变化而变化<sup>[40-43]</sup>。次降雨过程中整体遵从随降雨历时增加, 细沟间侵蚀贡献减小和细沟侵蚀贡献增大的整体趋势, 主要由不同侵蚀方式在降雨过程中发生时间次序所决定, 但因细沟侵蚀发生的随机性和野外模拟

降雨受风力条件变化等影响, 细沟间和细沟侵蚀贡献率的变化在降雨过程中存在较大波动<sup>[30-31, 33, 44-46]</sup>。在降雨后期, 细沟间侵蚀产沙贡献有增大趋势, 主要和细沟发育趋于稳定有关。就次降雨而言, 5°小区细沟侵蚀贡献率为 16%, 大于 5°的小区细沟侵蚀贡献率为 61%~74% (图 1), 与目前坡面侵蚀以细沟侵蚀为主, 但受到诸如坡度、坡长、降雨等因素的影响的结论一致<sup>[31, 44-47]</sup>。如宋炜等<sup>[45]</sup>利用 REE 示踪技术得出黄土坡面细沟侵蚀贡献泥沙量在 70%

左右, Kimaro 等<sup>[48]</sup>在坦桑尼亚乌卢古鲁山北坡 36 个试验小区观测到坡面细沟侵蚀贡献率在 68.3%~72.5%。在应用最为广泛的 RUSLE 模型中, 坡长因子公式中指数 ( $m$ ) 是通过细沟与细沟间侵蚀比率 ( $\beta$ ) 来计算,  $\beta$  的计算公式仅考虑了坡度。坡度 $<5^\circ$ 时  $\beta<1$ , 细沟侵蚀贡献率 $<50\%$ ; 坡度 $>5^\circ$ 时  $\beta>1$ , 细沟侵蚀贡献率大于 50%<sup>[49]</sup>。本研究与已有研究结果的一致性说明利用  $^7\text{Be}$  示踪估算的细沟侵蚀贡献率的可靠性。但本研究是野外模拟降雨试验, 不同场次模拟降雨日期不同, 降雨场次最长日期间隔甚至相差 1 个月, 使得不同小区地表的土壤水分、结皮特征等差异和变化较大, 同时野外模拟降雨条件难以控制一致, 使得不同小区降雨强度有一定差异, 加之降雨过程中风等随机因素的影响, 致使无法分析细沟侵蚀贡献率随坡度的趋势性变化, 坡度对细沟间和细沟侵蚀的效应并未体现出来。试验过程中  $15^\circ$  小区的雨强明显高于其他小区, 导致其细沟侵蚀产沙贡献率增大。

土壤侵蚀产沙过程是有机碳输移过程的载体, 但因侵蚀过程破坏了土壤结构、改变了碳的赋存方式、存在颗粒分选等, 加之有机碳本身性质及与土壤不同粒径颗粒结合程度的差异性, 有机碳的输移过程与侵蚀产沙过程既存在相似性, 也存在差异性。在降雨开始的片蚀/细沟间侵蚀阶段, 泥沙有机碳出现了明显的富集, 随着降雨进行, 有机碳含量显著减少, 富集比接近 1.0, 甚至低于 1.0 (图 3a), 这与目前绝大多数的研究结果一致<sup>[25-29]</sup>。该现象的产生主要与径流作用下有机碳选择性输移、侵蚀方式演化及侵蚀产沙量的变化有关<sup>[29]</sup>。雨滴击溅分离, 破坏土壤团聚结构, 密度较小的有机碳失去了团聚体保护, 同时降雨前期, 坡面以薄层水流为主, 输移能力弱, 优先输移细小的黏粒、颗粒有机碳等质量小的物质, 导致泥沙有机碳富集; 随着降雨进行, 产流量增加, 细沟发生, 股流形成, 径流输移的分选性降低, 泥沙输移方式转变, 侵蚀产沙量增加, 导致了泥沙有机碳富集比变小, 并接近于 1.0<sup>[11, 25-27]</sup>。细沟间侵蚀过程是泥沙有机碳富集的主要过程, 细沟间侵蚀产沙贡献率高, 坡面侵蚀泥沙有机碳富集比大, 反之亦然 (图 7a)。缓坡因很难发生细沟侵蚀, 有机碳富集比在整个降雨过程高于其他坡度的小区 (图 3)。当细沟侵蚀比较强烈时, 尽管坡面侵蚀泥沙有机碳富集比降低, 但针对细沟间侵蚀泥沙而言, 有机碳富集比反而增大 (图 7b)。主要原因可能是

坡面细沟侵蚀增加割裂程度和破碎程度, 细沟间面积变小, 流路变短, 汇流小, 薄层水流输移能力变弱, 细沟间侵蚀的输移分选性更强, 导致细沟侵蚀严重且产沙贡献较大时, 细沟间侵蚀泥沙有机碳富集比呈增大趋势。

细沟间侵蚀过程对泥沙有机碳的富集使其对产沙和有机碳流失的贡献存在差异。细沟间侵蚀对有机碳流失的贡献比对产沙量的贡献高  $5.61\%\pm 4.28\%$ , 但因侵蚀过程中细沟侵蚀对产沙的贡献明显高于细沟间侵蚀, 因此, 大于  $5^\circ$  坡面有机碳流失主要由细沟侵蚀控制。坡面侵蚀产沙量能够解释坡面有机碳流失量的 97%, 说明坡面有机碳流失主要由侵蚀产沙量控制, 泥沙有机碳富集对其影响较小。这与 Liu 等<sup>[25-26]</sup>研究结果一致。但对于仅发生细沟间侵蚀的坡面, 泥沙有机碳富集对其流失量有一定的影响。片蚀/细沟间侵蚀在一定程度上对坡耕地退化的影响更大, 侵蚀过程对缓坡地退化的作用更不容忽视。

## 4 结 论

本研究结合野外模拟降雨与  $^7\text{Be}$  示踪技术, 定量分析了细沟间和细沟侵蚀对坡面有机碳流失的贡献及影响。降雨过程中缓坡以细沟间侵蚀为主, 较陡坡面一旦发生细沟侵蚀, 其对侵蚀产沙的贡献占据主导。坡面侵蚀泥沙有机碳富集比随降雨历时和产沙量的增加逐渐趋近于 1, 而细沟间侵蚀泥沙富集比在降雨过程中变异性较大, 剧烈的细沟侵蚀可导致细沟间侵蚀泥沙有机碳富集比呈增大趋势。细沟和细沟间侵蚀的产沙率和贡献率与有机碳流失率和贡献率分别具有相似的变化趋势, 各自呈极显著正相关。细沟侵蚀对次降雨有机碳流失贡献率 (55%~62%) 小于对侵蚀产沙的贡献 (61%~71%), 但在陡坡仍然占主导地位。坡面侵蚀产沙量决定了有机碳流失量的变化, 在陡坡有机碳富集对有机碳流失量影响较小, 而缓坡富集对有机碳流失影响较大。细沟间侵蚀因其具有分选性, 在一定程度上对耕地退化的影响更严重。本研究过程中, 因试验条件控制问题, 使得细沟间和细沟侵蚀对产沙和有机碳流失的坡度效应未能体现。后续研究应设计合理的试验方案, 基于  $^7\text{Be}$  示踪技术, 深入探究细沟间和细沟侵蚀对产沙和有机碳流失的坡度、雨强、坡长、植被等效应。



## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Quinton J N, Govers G, van Oost K, et al. Reply to 'erosion and climate'[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3 ( 11 ): 738.
- [ 2 ] van Oost K, Verstraeten G, Doetterl S, et al. Legacy of human-induced C erosion and burial on soil-atmosphere C exchange[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 ( 47 ): 19492—19497.
- [ 3 ] Yue Y, Ni J R, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO<sub>2</sub> flux induced by water erosion in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 ( 24 ): 6617—6622.
- [ 4 ] Bouchoms S, Wang Z G, Vanacker V, et al. Modelling long-term soil organic carbon dynamics under the impact of land cover change and soil redistribution[J]. *Catena*, 2017, 151: 63—73.
- [ 5 ] Olson K R, Al-Kaisi M, Lal R, et al. Soil organic carbon dynamics in eroding and depositional landscapes[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2016, 6 ( 8 ): 121—134.
- [ 6 ] Holz M, Augustin J. Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes : A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 397: 115045.
- [ 7 ] Shi F Y, Zhang F B, Yang M Y. Research hotspots and progress of soil organic carbon mineralization based on bibliometrics method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 ( 2 ): 381—392. [史方颖, 张风宝, 杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. 土壤学报, 2022, 59 ( 2 ): 381—392.]
- [ 8 ] van Oost K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, 318 ( 5850 ): 626—629.
- [ 9 ] Lal R, Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source? [J]. *Science*, 2008, 319 ( 5866 ): 1040—1042.
- [ 10 ] Kuhn N J, Hoffmann T, Schwanghart W, et al. Agricultural soil erosion and global carbon cycle : Controversy over? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 ( 7 ): 1033—1038.
- [ 11 ] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 102—122.
- [ 12 ] Wang Z G, Hoffmann T, Six J, et al. Human-induced erosion has offset one-third of carbon emissions from land cover change[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7 ( 5 ): 345—349.
- [ 13 ] Ghadirri H, Rose C W. Sorbed chemical transport in overland flow: II. enrichment ratio variation with erosion processes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20 ( 3 ): 634—641.
- [ 14 ] Maïga-Yaleu S B, Chivenge P, Yacouba H, et al. Impact of sheet erosion mechanisms on organic carbon losses from crusted soils in the Sahel[J]. *Catena*, 2015, 126: 60—67.
- [ 15 ] Müller-Nedebock D, Chivenge P, Chaplot V. Selective organic carbon losses from soils by sheet erosion and main controls[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41 ( 10 ): 1399—1408.
- [ 16 ] Fullen M A. Soil organic matter and erosion processes on arable loamy sand soils in the west Midlands of England[J]. *Soil Technology*, 1991, 4 ( 1 ): 19—31.
- [ 17 ] Fullen M A, Yi Z, Brandsma R T. Comparison of soil and sediment properties of a loamy sand soil[J]. *Soil Technology*, 1997, 10 ( 1 ): 35—45.
- [ 18 ] Chaplot V, Podwojewski P, Phachomphon K, et al. Soil erosion impact on soil organic carbon spatial variability on steep tropical slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73 ( 3 ): 769—779.
- [ 19 ] Zhu B B, Zhou Z C, Li Z B. Soil erosion and controls in the slope-gully system of the loess plateau of China: A review[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 657030.
- [ 20 ] He S Q, Wu W H, Gong Y B, et al. Characteristics of sediment yield and organic carbon loss in slope farmland with contour ridges during maize seedling stage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 ( 2 ): 166—172. [何淑勤, 武万华, 宫渊波, 等. 玉米苗期横垄坡面侵蚀产沙与有机碳流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32 ( 2 ): 166—172.]
- [ 21 ] Ren R X, Zhang F B, Yang M Y, et al. Characteristics of sediment organic carbon loss during slope erosion process[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 ( 6 ): 15—19. [任瑞雪, 张风宝, 杨明义, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31 ( 6 ): 15—19.]
- [ 22 ] Li Z W, Lu Y M, Nie X D, et al. Simulating study of the loss of soil organic carbon based on the model of sediment transport by slope runoff in the hilly red soil region of central Hunan Province[J]. *Journal of Hunan University ( Natural Sciences )*, 2015, 42 ( 12 ): 115—124. [李忠武, 陆银梅, 聂小东, 等. 基于坡面径流输沙模型的湘中红壤丘陵区土壤有机碳流失模拟研究[J]. 湖南大学学报 ( 自然科学版 ), 2015, 42 ( 12 ): 115—124.]
- [ 23 ] He Y X, Zhang F B, Yang M Y. Effects of soil erosion on organic carbon fractions in black soils in sloping farmland of Northeast China by using <sup>137</sup>Cs tracer measurements[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering, 2021, 37 ( 14 ): 60—68. [何彦星, 张凤宝, 杨明义.  $^{137}\text{Cs}$  示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37 ( 14 ): 60—68.]
- [ 24 ] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon dioxide evolution in runoff from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils in southwestern Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66 ( 1 ): 23—33.
- [ 25 ] Liu L, Li Z W, Chang X F, et al. Relationships of the hydraulic flow characteristics with the transport of soil organic carbon and sediment loss in the Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 291—301.
- [ 26 ] Liu L, Li Z W, Nie X D, et al. Hydraulic-based empirical model for sediment and soil organic carbon loss on steep slopes for extreme rainstorms on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2017, 554: 600—612.
- [ 27 ] Jiang Y L, Zheng F L, Wen L L, et al. Effects of sheet and rill erosion on soil aggregates and organic carbon losses for a Mollisol hillslope under rainfall simulation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19( 1 ): 467—477.
- [ 28 ] Wang Z G, Govers G, Oost K V, et al. Soil organic carbon mobilization by interrill erosion: Insights from size fractions[J]. Journal of Geophysical Research ( Earth Surface ), 2013, 118 ( 2 ): 348—360.
- [ 29 ] Schiettecatte W, Gabriels D, Cornelis W M, et al. Enrichment of organic carbon in sediment transport by interrill and rill erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72 ( 1 ): 50—55.
- [ 30 ] Zhang F B, Yang M Y, Walling D E, et al. Using  $^7\text{Be}$  measurements to estimate the relative contributions of interrill and rill erosion[J]. Geomorphology, 2014, 206: 392—402.
- [ 31 ] Yang M Y, Walling D E, Tian J L, et al. Partitioning the contributions of sheet and rill erosion using beryllium-7 and cesium-137[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 ( 5 ): 1579—1590.
- [ 32 ] Matisoff G, Bonniwell E C, Whiting P J. Soil erosion and sediment sources in an Ohio watershed using beryllium-7, cesium-137, and lead-210[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31 ( 1 ): 54—61.
- [ 33 ] Whiting P J, Bonniwell E C, Matisoff G. Depth and areal extent of sheet and rill erosion based on radionuclides in soils and suspended sediment[J]. Geology, 2001, 29 ( 12 ): 1131.
- [ 34 ] Blake W H, Walling D E, He Q. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 51 ( 5 ): 599—605.
- [ 35 ] Walling D E, He Q, Blake W. Use of  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. Water Resources Research, 1999, 35 ( 12 ): 3865—3874.
- [ 36 ] Walling D E, Schuller P, Zhang Y, et al. Extending the timescale for using beryllium 7 measurements to document soil redistribution by erosion[J]. Water Resources Research, 2009, 45 ( 2 ): W02418.
- [ 37 ] Schuller P, Iroumé A, Walling D E, et al. Use of beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35 ( 5 ): 1756—1763.
- [ 38 ] Zapata F, Garcia-Agudo E, Ritchie J C, et al. Introduction[M]//Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 1—13.
- [ 39 ] Zhang F B, Yang M Y. Plot-slope soil erosion using  $^7\text{Be}$  measurement and rill fractal dimension[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24( 5 ): 1032—1037. [张凤宝, 杨明义. 基于  $^7\text{Be}$  示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀[J]. 核农学报, 2010, 24 ( 5 ): 1032—1037.]
- [ 40 ] Loch R J. Using rill/interrill comparisons to infer likely responses of erosion to slope length: Implications for land management[J]. Soil Research, 1996, 34 ( 4 ): 489.
- [ 41 ] Govers G, Poesen J. Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot[J]. Geomorphology, 1988, 1 ( 4 ): 343—354.
- [ 42 ] Jafarpoor A, Sadeghi S H, Zarei Darki B, et al. Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria[J]. Catena, 2022, 208: 105782.
- [ 43 ] Zhou C H, Zhang F B, Liu B Y, et al. Quantitative analysis of interactions between interrill erosion influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 ( 2 ): 420—429. [周春红, 张凤宝, 刘宝元, 等. 细沟间侵蚀影响因子交互作用定量分析[J]. 土壤学报, 2022, 59 ( 2 ): 420—429.]
- [ 44 ] Song W, Zheng L Y, Chen M H, et al. Application of REE tracer technique in slope erosion development study[J]. Water Resources Planning and Design, 2007 ( 5 ): 52—56. [宋炜, 郑良勇, 陈梦华, 等. 利用 REE 示踪法研究坡面侵蚀转变过程[J]. 水利规划与设计, 2007 ( 5 ): 52—56.]
- [ 45 ] Song W, Liu P L, Yang M Y. Study on erosion process by the REE tracer method[J]. Advances in Water Science, 2004, 15 ( 2 ): 197—201. [宋炜, 刘普灵, 杨明义. 利用 REE 示踪法研究坡面侵蚀过程[J]. 水科学进展, 2004, 15 ( 2 ): 197—201.]
- [ 46 ] Ju T J, Liu P L. Study on changeable process of soil erosion distributive characteristics on the slope surface by REE tracing method[J]. Acta Agriculturae Nucleatae

- Sinica, 2005, 19 (1): 58—61. [据彤军, 刘普灵. 坡面侵蚀分布特征动态变化过程的 REE 示踪法研究[J]. 核农学报, 2005, 19 (1): 58—61.]
- [ 47 ] Sun L Y, Fang H Y, Qi D L, et al. A review on rill erosion process and its influencing factors[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23 (4): 389—402.
- [ 48 ] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, *Tanzania*; Interrill and rill erosion[J]. Catena, 2008, 75 (1): 38—44.
- [ 49 ] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M], Washington, DC, USA: Agriculture Handbook Number 703, USDA, 1997.

(责任编辑: 檀满枝)