

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.004; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.004.

施伟豪, 赵冰琴, 高儒章, 等. 降雨强度对含碎石坡耕地侵蚀泥沙有机碳组分流失特征的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 24-33.

Shi Weihao, Zhao Bingqin, Gao Ruzhang, et al. Effect of rainfall intensity on the loss characteristics of organic carbon components in eroded sediment of sloping land containing gravel[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 24-33.

## 降雨强度对含碎石坡耕地侵蚀泥沙 有机碳组分流失特征的影响

施伟豪<sup>1</sup>, 赵冰琴<sup>1,2</sup>, 高儒章<sup>1,2</sup>, 张兴凤<sup>1</sup>,  
吴欣<sup>1</sup>, 朱万庆<sup>1</sup>, 夏栋<sup>2,3</sup>, 许文年<sup>1,2</sup>

(1.三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学

水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** [目的]明确含碎石坡耕地有机碳组分在不同雨强和碎石含量下的流失特征,进而为坡耕地有机碳流失的防治提供科学支撑。[方法]以含碎石坡耕地黄棕壤为研究对象,在 4 种碎石含量(0, 10%, 20% 和 30%)下以不同降雨强度(60, 90, 120 mm/h)进行了人工模拟降雨试验。[结果](1) 在侵蚀泥沙中细砂粒含量最高(>50%), 中活性有机碳含量最高,在碎石含量为 20%时,有机碳流失量最多,且以中活性有机碳流失为主;(2) 雨强和各有机碳流失含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),碎石含量和非活性有机碳流失含量呈显著正相关( $p < 0.05$ );(3) 雨强主要通过影响粗砂粒、细砂粒来正向影响活性较高有机碳流失,而碎石含量主要通过影响黏粒来正向影响活性低的有机碳流失,雨强(60.2%)对于侵蚀泥沙和有机碳的流失影响程度大于碎石含量(39.8%)。[结论]雨强和碎石的增加都会加快各有机碳的流失速率和流失量,建议坡耕地进行去碎石化处理并将碎石含量保持在 10%以下。

**关键词:** 模拟降雨; 碎石含量; 团聚体; 有机碳组分

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0024-10

## Effect of rainfall intensity on the loss characteristics of organic carbon components in eroded sediment of sloping land containing gravel

Shi Weihao<sup>1</sup>, Zhao Bingqin<sup>1,2</sup>, Gao Ruzhang<sup>1,2</sup>, Zhang Xingfeng<sup>1</sup>,  
Wu Xin<sup>1</sup>, Zhu Wanqing<sup>1</sup>, Xia Dong<sup>2,3</sup>, Xu Wennian<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Cement-Based Ecological Restoration

Technology Hubei Engineering Research Center, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

3.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] The objectives of this study are to clarify the characteristics of organic carbon loss in sloping cultivated land with gravel under different rainfall intensities and gravel contents, and to provide scientific support for the prevention and control of organic carbon loss in sloping cultivated land. [Methods] The yellow-brown soil of sloping cultivated land with gravel was taken as the research object. Artificial simulated rainfall experiments were carried out with different rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h) under four gravel contents (0, 10%, 20% and 30%). [Results] (1) The content of fine sand particles was the highest (>50%), the content of moderate-labile organic carbon was the highest in the erosion sediment, and the loss of organic carbon was the highest when the content of gravel was 20%, and the loss of moderate-labile organic carbon was the mainstay. (2) The rain

收稿日期: 2024-04-23

修回日期: 2024-06-26

接受日期: 2024-07-15

资助项目: 国家自然科学基金(52200230); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放资助项目(2023KDZ18)

第一作者: 施伟豪(2000—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态防护。E-mail: 2238057066@qq.com

通信作者: 赵冰琴(1987—), 女, 湖北宜昌人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与生态防护研究。E-mail: bingqinzhao@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

intensity was significantly negatively correlated with the content of each organic carbon ( $p < 0.01$ ), and the content of gravel and the content of no-labile organic carbon were significantly positively correlated ( $p < 0.05$ ). (3) Rainfall intensity mainly affected the loss of organic carbon with high activity by affecting coarse sand and fine sand particles, while gravel content mainly affected the loss of organic carbon with low activity by affecting clay particles, and the influence of rain intensity (60.2%) on the loss of erosive sediment and organic carbon was greater than that of gravel content (39.8%). [Conclusion] The increase of rainfall intensity and gravel will accelerate the loss rate and amount of organic carbon, so it is recommended to de-gravel and keep the gravel content below 10% on sloping cultivated land.

**Keywords:** simulated rainfall; crushed stone content; aggregate; organic carbon components

土壤侵蚀造成了大量有机碳(SOC)的流失,在全球碳循环中发挥着重要作用,近年来,土壤侵蚀成为了全球最突出的问题之一,不仅制约着农业的发展,还威胁人类赖以生存的生态环境<sup>[1-2]</sup>。有研究表明,土壤侵蚀造成了大量土壤有机碳流失<sup>[2]</sup>,其中土壤有机碳流失给坡耕地带来的影响最剧烈,往往会导致坡耕地土壤肥力下降,生产力降低,粮食减产等问题<sup>[3-4]</sup>。目前,有机碳流失的研究较少且大多集中在总有机碳的变化上,而对于有机碳组分如何在土壤侵蚀中流失的研究较少,对碳组分的流失特征尚不清晰。三峡库区作为我国土壤侵蚀最严重的地区之一,其内坡耕地分布广泛,降雨多且暴雨集中,坡耕地含有碎石且土壤中有机碳等养分含量较高<sup>[5]</sup>。集中暴雨时,有机碳容易随泥沙流失而造成水体污染和耕地质量下降<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤侵蚀过程中有机碳组分的变化特征对提升三峡库区的耕地质量和减轻土壤碳流失造成的环境污染具有重要意义。

相关研究表明,在土壤侵蚀过程中团聚体是有机碳流失的主要载体,有机碳不均匀地分布在不同粒径的团聚体中<sup>[7-8]</sup>。其中活性有机碳是活性较高与微生物活动相关性较大的部分,它能够改善土壤结构,对提高土壤肥力和保持土壤碳循环具有重要意义<sup>[9]</sup>。因此,探究不同粒径侵蚀泥沙和各活性有机碳的关系,能够为坡耕地农业良好发展和生态环境保护提供理论依据。

降雨强度是影响土壤侵蚀和土壤养分流失的重要因素<sup>[10-11]</sup>。降雨强度越大,对土壤造成的冲击和侵蚀作用越强<sup>[11]</sup>。研究表明<sup>[12]</sup>,在不同雨强下,不同粒径团聚体颗粒差异显著,雨强是造成土壤侵蚀的主要影响因素。郭太龙等<sup>[10]</sup>研究显示,雨强会影响泥沙的流失,有机碳流失强度会随着泥沙侵蚀强度变化。碎石是影响土壤侵蚀的一个重要因素,研究表明<sup>[13]</sup>,碎石通过影响入渗和径流来影响雨水,从而重塑土壤侵蚀中的水文过程。碎石的存在改变了土壤的结构,使得孔隙分布和细土容重等基本物理性质有显著改变从而间接对土壤侵蚀过程产生影响<sup>[14]</sup>。

Kirkby 等<sup>[15]</sup>的研究表明,忽视碎石的存在会导致对土壤总碳的低估。综上所述,学者们对于碎石、降雨如何影响土壤侵蚀已开展了一定工作,但对于含碎石坡耕地的有机碳组分的流失机理有待进一步探究。

鉴于此,本研究针对三峡库区降雨充沛且土壤坡耕地多含碎石的实际情况<sup>[5,16]</sup>,进行人工模拟降雨试验。试验设置3个雨强(60,90,120 mm/h)和4个碎石含量(0%,10%,20%,30%),探究:(1)不同雨强和碎石含量下侵蚀泥沙粒径分布特征;(2)不同雨强和碎石含量下各有机碳流失特征;(3)不同雨强和碎石含量下侵蚀泥沙粒径分布与各有机碳流失的相关性。探究含碎石坡耕地的管理方式,以期为提高含碎石坡耕地的土地质量和减少有机碳流失导致的环境污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤与试验用碎石均采自湖北省宜昌市库区坡耕地(110°58′—111°23′E,30°4′—30°47′N)。主要耕地利用类型为黄棕壤(黏粒5.90%;粉粒42.09%;细砂粒47.35%;粗砂粒4.66%),占总面积的34.1%,土壤容重为1.25 g/cm<sup>3</sup>,三峡库区含碎石坡耕地中的碎石,粒径在5~20 mm与20~76 mm的小中粒径碎石占80%以上,因此将其过5,20,76 mm筛,之后再与土壤混合使用,碎石平均密度为2.24 g/cm<sup>3</sup>。粗砂来自湖北宜昌的夜明珠建材市场,用于风干后垫在降雨槽底部。模拟试验小区布设在湖北省宜昌市三峡大学校内,试验采用中国科学院水土保持研究所BX-1型混合侧喷降雨装置,该装置降雨高度7 m,有效降雨面积5 m×7 m。

### 1.2 试验设计

根据对三峡库区的多年气象资料、坡耕地坡度及碎石含量的调查<sup>[5,16-17]</sup>,库区坡耕地土壤的碎石含量集中在5%~30%,坡度在8°~25°,强降水量多为60~100 mm。故设置坡度为15°,碎石含量为0%,10%,20%,30%,以及60,90,12 mm/h 3种降雨强

度的径流小区,开展人工模拟降雨试验,设置径流小区有效尺寸为 1.5 m×0.375 m×0.4 m(长×宽×高)。在配置不同碎石含量的土壤时,提前对土壤进行晒干碎土处理,过 10 mm 筛留用,碎石中去除粒径不符合要求的碎石。填土前根据碎石含量公式<sup>[18]</sup>:

$$\rho_t = \frac{1-w}{\rho_b} + \frac{w}{\rho_s} \quad (1)$$

式中: $\rho_t$  为土壤碎石混合后的密度; $\rho_b$  为土壤的密度; $\rho_s$  为碎石的密度; $w$  为碎石含量。

计算出需要添加的碎石量,使碎石含量控制在 0%,10%,20%,30%,然后与处理过的土壤混合均匀备用。对混合后的试验所用土壤进行测定,并与三峡库区原坡面土壤进行对比,确保两者粒径分布、平均重量直径和总有机碳含量无明显差异。填土时,将每 10 cm 视为一层来分层填入降雨槽,每填完一层之后参照对应体积信息进行适当压实,然后将土层表面拔松,再填下一层土壤,使得两个土层的接触面均匀自然。全部完成后用起重机将降雨槽吊起并支撑定在所需坡度。

填土完成后,为了使土壤更接近天然饱和状态,消除坡面含水量对试验的影响,在正式降雨前,应提前一天以 30 mm/h 降雨强度对槽内填土进行润湿,直至坡面产流为止。润湿后将降雨槽用塑料布盖住,静置 24 h 后开始正式降雨<sup>[19]</sup>。在正式降雨试验过程中,待坡面产流后每隔 3 min 收集一次侵蚀样,共收集 30 min,试验设置 1 种坡度、3 种降雨强度、4 种碎石含量,每场降雨试验重复 3 次,需设置 36 场降雨试验,试验装置如图 1 所示。

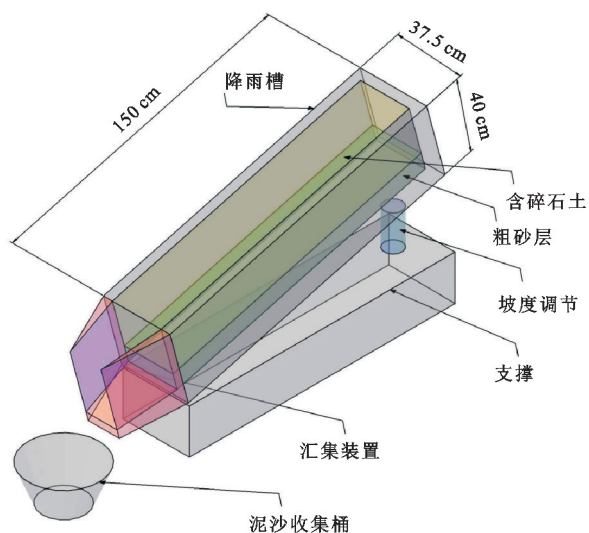


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Test device diagram

### 1.3 指标测定与方法

用激光粒度分布仪(BT-9300Z)对泥沙颗粒粒径进行测定,考虑到未分散的泥沙颗粒粒径分布更适合

用来探究泥沙的输移行为和有机碳的迁移,故本研究未进行有机质的去除和分散,测定的是有效粒径<sup>[20]</sup>,并根据美国制将侵蚀泥沙颗粒的粒径组别划分为黏粒 Clay(<0.002 mm)、粉粒 Silt(0.002~0.05 mm)、细砂粒 Fine Sand(0.05~0.25 mm)和粗砂粒 Coarse Sand(0.25~2 mm)<sup>[21]</sup>。泥沙有机碳含量采用重铬酸钾外加热法(湿氧化法)测定,依据硫酸溶液浓度的不同,将有机碳组别划分为 4 类:极高活性有机碳(High-labile organic carbon, LOC-H)、中活性有机碳(Moderate-labile organic carbon, LOC-M)、低活性有机碳(Low-labile organic carbon, LOC-L)和非活性有机碳(No-labile organic carbon, LOC-N)<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理

本试验通过 Excel 2021 进行数据录入和分析;采用 Origin 2021 进行绘图与分析,用 SPSS 22.0 对不同碎石含量下的侵蚀泥沙粒径组成、各有机碳流失量和不同降雨强度下的侵蚀泥沙粒径组成、各有机碳流失量分别进行单因素方差分析;采用 Canoco 5 对变量、侵蚀泥沙颗粒占比和有机碳组分占比进行冗余分析(RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀泥沙粒径分布特征

在不同试验条件下,泥沙量都随着雨强和碎石含量的增加而增加。坡面侵蚀泥沙粒径分布特征较为一致,粒径含量大小依次为细砂粒、粉粒、粗砂粒和黏粒,含量变化范围分别为 51.83%~56.19%,29.50%~33.47%,6.89%~10.03%和 3.36%~9.22%(表 1)。相较于原土中各粒径含量,侵蚀泥沙中细砂粒和粗砂粒含量增加,粉粒含量减少。黏粒流失含量在不同碎石含量和雨强下均差异性显著(表 1)。不同试验条件下,碎石含量增加使得黏粒含量有所增加,粗砂粒和细砂粒含量降低;降雨强度的增加使得粗砂粒和细砂粒含量有所增加,黏粒含量降低。

### 2.2 侵蚀泥沙中各有机碳组分流失特征

在各雨强下,侵蚀泥沙中各有机碳含量随碎石含量的变化趋势与总有机碳类似,均表现为随碎石含量的增加而增加(图 2)。以 60 mm/h 雨强为例,相较于 0%碎石含量,10%,20%,30%碎石含量下的总有机碳含量分别增加了 13.19%,27.69%,33.43%。在各碎石含量下,侵蚀泥沙中各有机碳含量均随着降雨强度的增加而减少,泥沙量随雨强和碎石含量的增加大致呈现增加的趋势。

随着降雨的进行,各有机碳流失速率(单位时间单位面积内的有机碳流失量)均呈现从 0 min 快速增加到 9~12 min 的峰值后降低再保持波动稳定(图 3)。

在大多数情况下,雨强和碎石含量的增加,都会使得各有机碳流失量有所增加,然而在碎石含量从 20% 增加到 30% 时,各有机碳流失量略微下降(图 4)。在不同试验条件下,中活性有机碳的流失对总有机碳流失的贡献最大,其次是低活性有机碳、极高活性有机碳、非活性有机碳(图 3 和图 4)。

表 1 不同碎石含量和雨强下侵蚀泥沙量及各粒径颗粒平均占比

Table 1 Erosion silt amount and the average proportion of each particle size under different gravel content and rain intensity						
降雨强度/ (mm · h <sup>-1</sup> )	碎石 含量/%	黏粒/%	粉粒/%	细砂粒/%	粗砂粒/%	泥沙量/g
60	0	7.16±0.21Ac	31.41±0.43Bb	53.18±0.59Aa	8.22±0.04Aa	689.2
	10	7.66±0.10Ac	32.81±0.77Ba	51.83±0.86Aa	7.65±0.23Bb	839.5
	20	9.22±0.44Aa	31.10±0.17Ab	51.87±1.15Ba	7.73±0.19Ab	1133.3
	30	8.63±0.11Ab	32.20±0.44Bab	52.21±0.41Aa	6.89±0.05Ac	998.6
90	0	4.62±0.14Bd	33.47±0.37Aa	53.12±0.86Aa	8.79±0.07Ba	1248.9
	10	5.88±0.32Bc	33.13±0.34Aa	52.29±0.71Aa	8.65±0.27Aa	1596.5
	20	6.92±0.57Bb	32.98±1.12Ba	52.35±0.77ABa	7.77±0.35Bb	2181.1
	30	7.79±0.06Ba	29.86±0.73Bb	53.77±0.94Aa	8.47±0.21Aa	1962.1
120	0	3.36±0.47Cc	31.35±0.91Ba	55.37±0.51Aa	10.03±0.01Ba	2364.7
	10	5.52±0.09Bb	29.50±0.51ABa	56.19±0.58Aa	8.72±0.22Ab	3219.4
	20	6.55±0.34Ba	29.69±0.61ABa	55.38±0.79Aa	8.87±0.82Cb	4645.4
	30	6.60±0.12Ca	31.47±0.58Aa	53.24±0.54Bb	8.16±0.16Ab	4105.8

注:表中数据为标准值±标准差;小写字母不同表示相同降雨强度下不同碎石含量间差异性显著( $p<0.05$ );大写字母不同表示相同碎石含量下不同降雨强度间差异性显著( $p<0.05$ )。

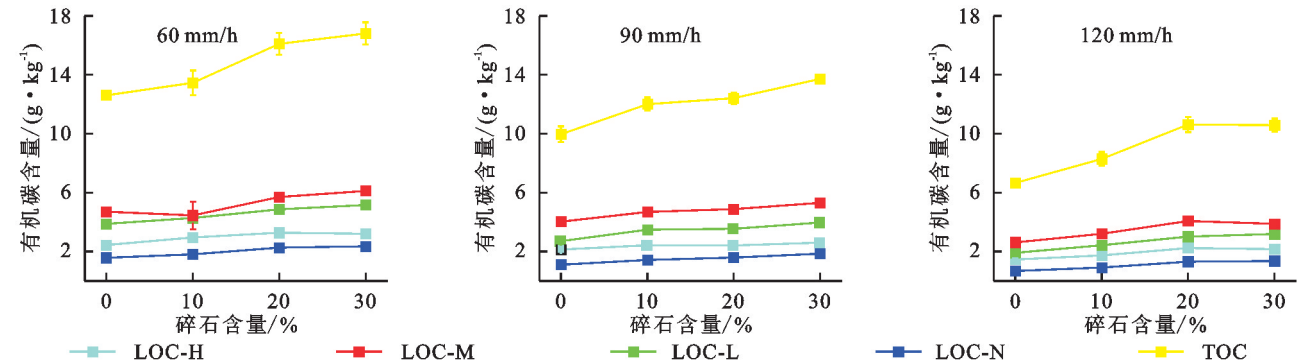


图 2 不同降雨强度和碎石含量下各有机碳流失含量变化

Fig. 2 Change of organic carbon loss under different rainfall intensity and gravel content

各有机碳流失量在不同雨强和碎石含量下均差异性显著( $p<0.05$ )(图 5 和图 6)。在 20% 碎石含量时,各有机碳流失量最高。在碎石含量相同的情况下,各有机碳流失量随降雨强度的增加呈现明显的增加趋势。在降雨强度相同的情况下,各有机碳流失量随碎石含量的增加呈现先增加后降低的趋势。

2.3 侵蚀泥沙与有机碳的相关性分析

对雨强、碎石含量与各粒径泥沙颗粒含量、各有机碳含量进行相关性分析得到图 7,其中雨强与各有机碳含量呈极显著负相关( $p<0.01$ ),碎石含量与非活性有机碳含量呈显著正相关( $p<0.05$ )。雨强与泥沙量、细砂粒含量呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与粗砂粒呈显著正相关( $p<0.05$ ),与黏粒含量呈显著负相关( $p<0.05$ )。碎石含量与黏粒含量呈显著正相关( $p<0.05$ ),与粗砂粒含量呈显著负相关( $p<0.05$ )。黏粒含量与各有机碳含量呈

极显著正相关( $p<0.01$ ),粗砂粒、细砂粒含量都与各有机碳含量呈极显著负相关( $p<0.01$ )。

对雨强、碎石含量与各粒径泥沙颗粒占比、各有机碳占比进行冗余分析得到图 8 和表 2,由图 8 可看出,第一轴和第二轴的解释贡献度分别为 56.36% 和 5.96%,两轴累计解释率 62.32%。通过表 2 对比两者贡献度可以看到雨强(60.2%)的贡献率大于碎石含量(39.8%)。雨强、碎石含量与各粒径泥沙流失量、各有机碳流失量都呈正相关。黏粒与非活性有机碳和低活性有机碳呈正相关,与极高活性有机碳和中活性有机碳呈负相关。细砂粒、粗砂粒都与中活性有机碳和极高活性有机碳呈正相关,与低活性有机碳和非活性有机碳呈负相关。碎石含量与黏粒、非活性有机碳、低活性有机碳呈正相关。降雨强度与细砂粒、粗砂粒、中活性有机碳、极高活性有机碳呈正相关。

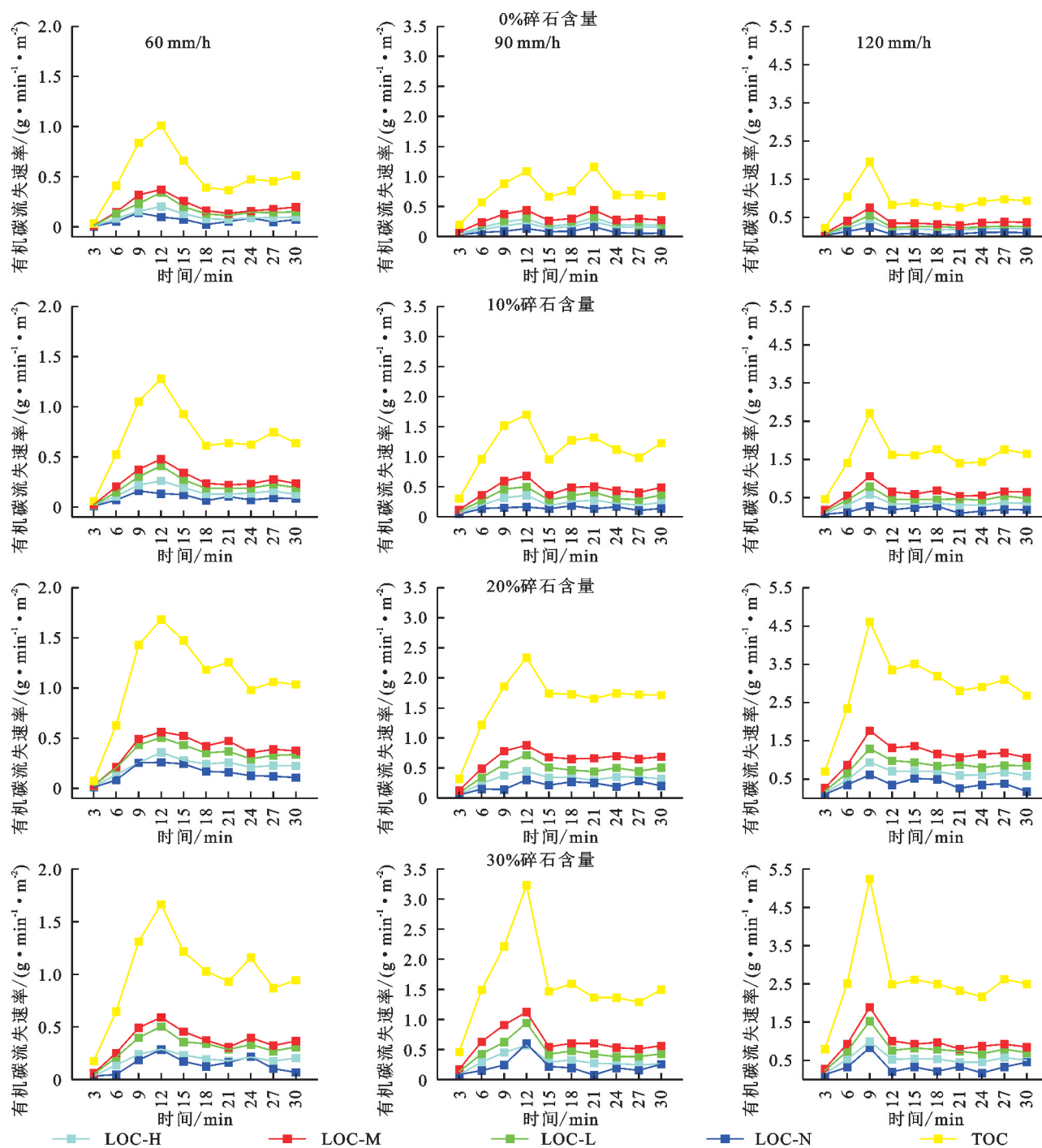


图 3 降雨过程中各有机碳流失速率变化

Fig. 3 Change of organic carbon loss rate during rainfall

### 3 讨论

有研究表明,降雨到达一定程度后会产生径流,径流冲刷土壤会导致团聚体破碎,从而使得一部分有机碳释放随径流流失,而另一部分会随泥沙而流失<sup>[4,11]</sup>。本研究显示泥沙中各有机碳的含量会随着碎石的增加而增加,随着雨强的增加而减少,这一结果与郭太龙等<sup>[10]</sup>的研究结论不一致。这可能是由于碎石对团聚体形成了保护作用,减弱了雨滴对团聚体的击打,使得团聚体不容易破碎,从而导致有机

碳更多地封存于团聚体内而不随径流流失<sup>[23]</sup>。而在含碎石坡耕地上,由于雨强的增大在坡面的碎石之间更容易形成径流,且流速较快,使团聚体更易与碎石产生碰撞,加快破碎速度,封存于其中的有机碳更容易随径流流失,导致最后侵蚀泥沙中的有机碳含量降低<sup>[4-5,24]</sup>。本试验得到在大多数试验条件下,中活性有机碳含量最高,这是由于本试验所用土为坡耕地土壤,其中人类活动导致的施肥以及农作物等因素,能为土壤带来更多的新鲜腐殖质和有机物,从而导致土壤中活性有机碳含量较多<sup>[25]</sup>。

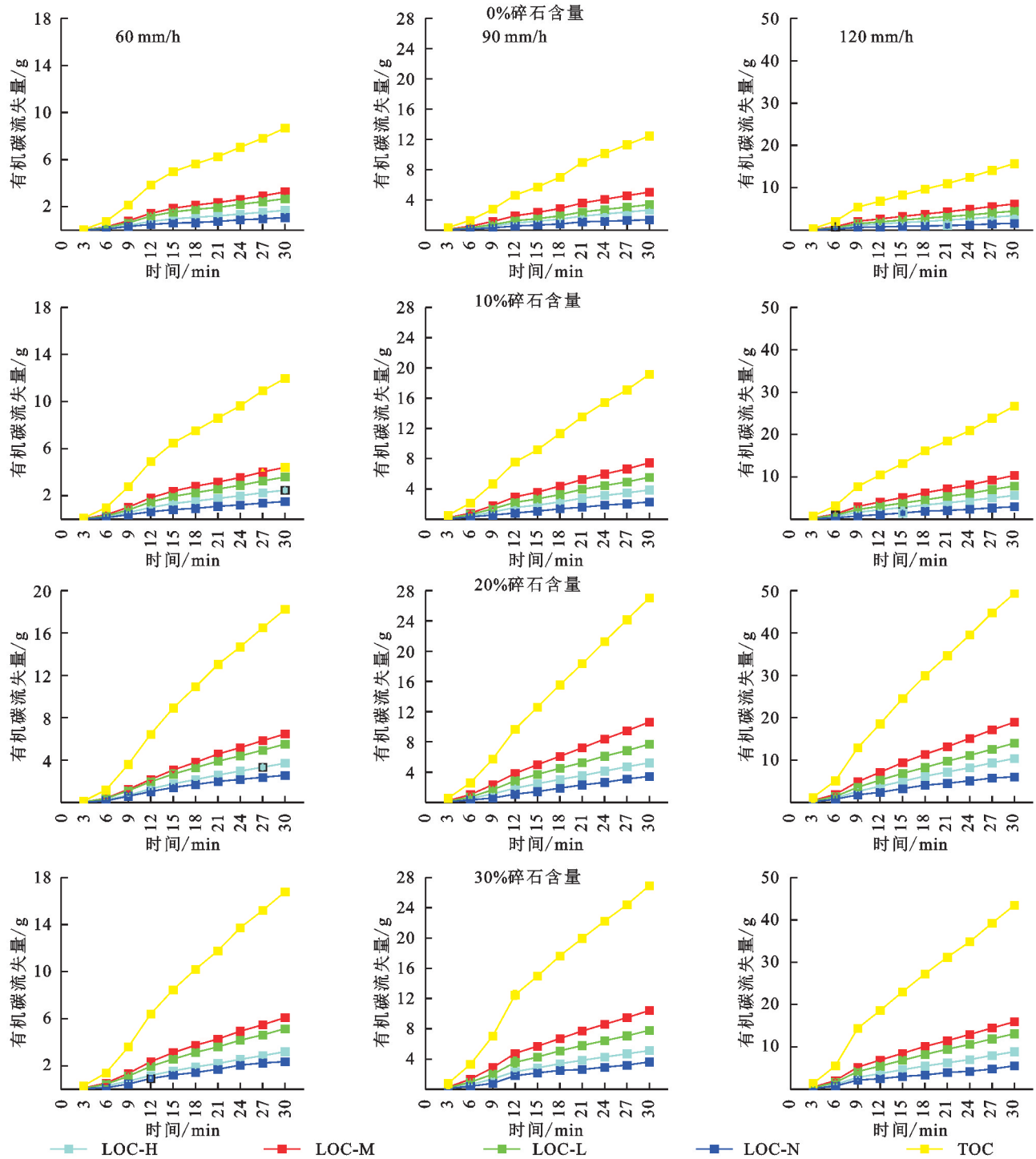


图4 各有机碳流失量随降雨时间变化

Fig. 4 Loss of each organic carbon varied with rainfall time

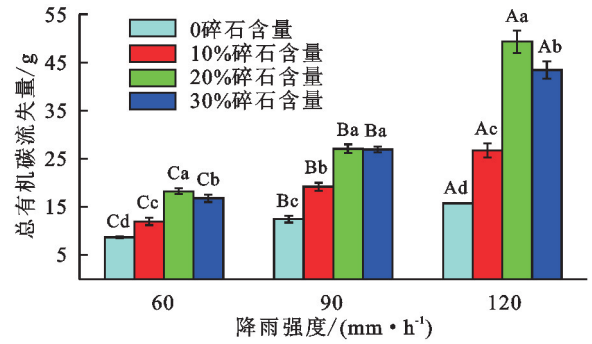
在降雨前期(0~9 min 或0~12 min)有机碳流失速率增加迅速,而在降雨后期(9~30 min 或12~30 min)增速放缓,在12 min 左右达到最高,而到了降雨后期坡面侵蚀进入相对稳定阶段,这与任瑞雪等<sup>[7]</sup>的研究结果类似。出现该现象的原因可能是在初期会对表层土壤进行侵蚀,而坡耕地由于施肥、凋落物等因素导致表层的土壤有机碳含量较高,且在初期径流形成缓慢,且侵蚀的力度会逐步增加,但随着降雨时间的持续,土壤中的水分趋于饱和,此时地表

径流量会逐渐增大直至最后趋于平衡<sup>[26]</sup>。在碎石含量从0%提升至20%时,各有机碳流失量也随之增加,但在碎石含量从20%增加至30%时,各有机碳流失量反而减少。推测原因为,增加碎石含量有助于剥蚀能力较强的涡流侵蚀区的形成,团聚体更容易被侵蚀搬运,进而导致随着团聚体流失的各有机碳也提高,但过高的碎石含量导致了坡面土壤的孔隙度增大,降雨入渗增加,径流减少,侵蚀能力下降,使得侵蚀泥沙量随之减少,以泥沙为载体的有机碳流失量也

对应减少<sup>[27]</sup>。

本研究结果显示雨强与各有机碳含量呈极显著负相关( $p<0.01$ ),与细砂粒、粗砂粒呈显著正相关( $p<0.05$ )与中活性、极高活性有机碳占比呈正相关。推测原因为增大雨强会提升径流对于大粒径颗粒的搬运能力<sup>[12]</sup>,而在大粒径颗粒中生物活动强使得有机碳的含量较少但活性较高的有机碳占比比较多<sup>[25]</sup>。碎石含量与黏粒含量呈显著正相关( $p<0.05$ ),碎石含量与非活性有机碳含量呈显著正相关( $p<0.05$ ),碎石含量与低活性有机碳、非活性有机碳占比呈正相关。故推测,碎石含量的增加,增加了坡面入渗,减弱了水流的侵蚀搬运能力,使得大颗粒较难被搬运<sup>[28]</sup>,同时由于碎石的增加使得碎石之间的缝隙中容易形成急流,使得更多的小粒径颗粒被侵蚀。在小颗粒中孔隙较小微生物的分解作用弱,使得其中有机碳周转

较慢,故非活性有机碳含量较高<sup>[8,29]</sup>。



注:小写字母不同表示相同降雨强度下不同碎石含量间差异性显著( $p<0.05$ );大写字母不同表示相同碎石含量下不同降雨强度间差异性显著( $p<0.05$ )。下图同。

图 5 不同雨强和碎石含量下总有机碳流失变化  
Fig. 5 Change of total organic carbon loss under different rainfall intensity and gravel content

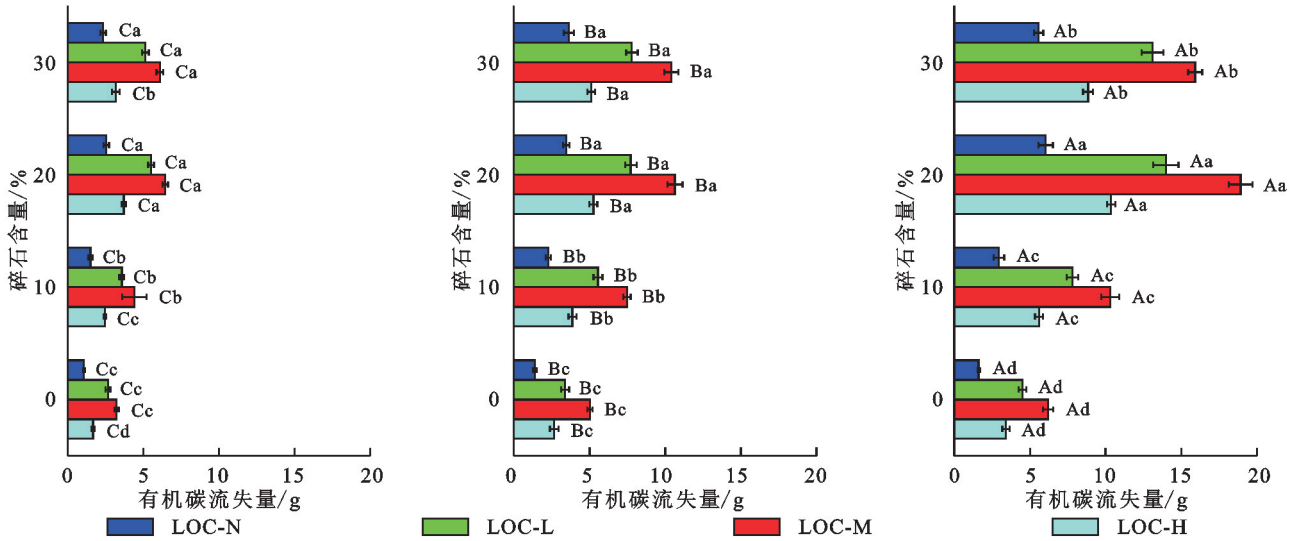
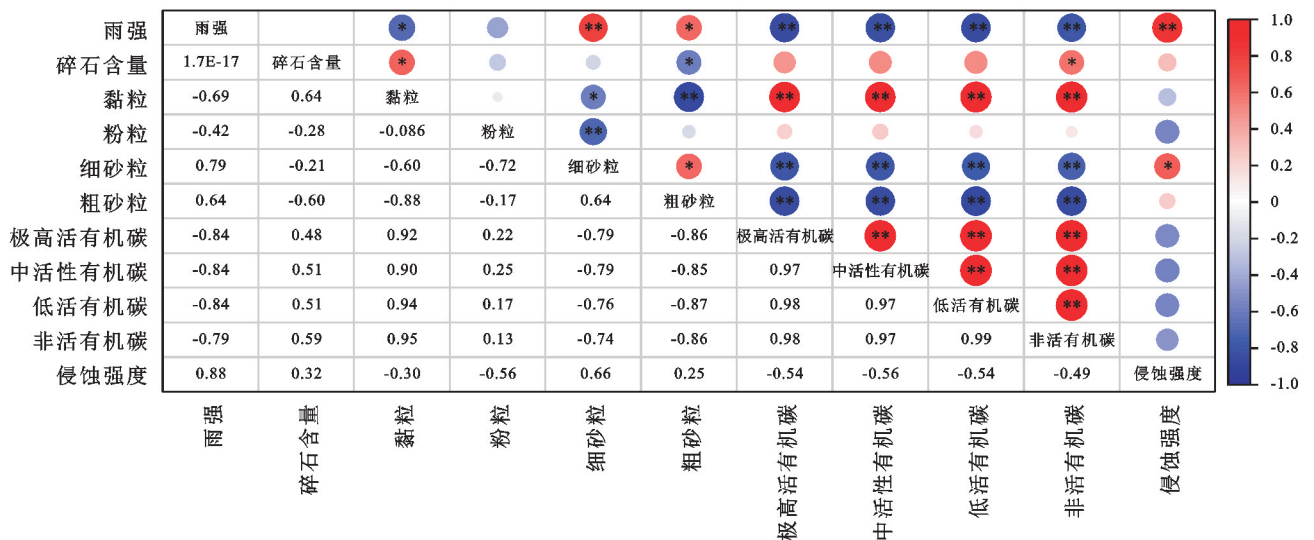


图 6 不同雨强下各组分有机碳流失量随碎石含量变化

Fig. 6 Loss of organic carbon of each component varies with the content of crushed stone under different rainfall intensity



注: \* 表示显著相关( $p<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ )。

图 7 雨强、碎石含量、各粒径泥沙颗粒含量与各有机碳含量相关性拟合

Fig. 7 Correlation between rain intensity, gravel content, sediment particle content and organic carbon content was fitted

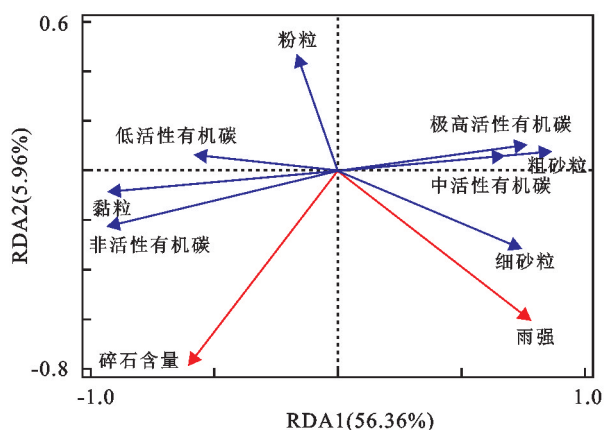


图 8 雨强、碎石含量与各粒径泥沙颗粒占比、各有机碳占比的冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis of rain intensity, gravel content, sediment fraction and organic carbon fraction of each particle size

表 2 RDA 分析中变量对侵蚀泥沙和有机碳的解释率

Table 2 Interpretation rates of erosion sediment and organic carbon in RDA analysis

变量	解释量/%	贡献率/%	<i>F</i>	<i>p</i>
雨强	37.5	60.2	6.0	0.004
碎石含量	24.8	39.8	5.9	0.004

综上所述,降雨强度(60.2%)对泥沙侵蚀和有机碳流失的影响程度大于碎石含量(39.8%),推测雨强主要通过影响粗砂粒和细砂粒来正向影响活性较高的有机碳流失,碎石含量主要通过黏粒来正向影响活

性较低的有机碳流失。

经过本次试验可得到机理图(图 9),在降雨侵蚀前,原坡面土壤中团聚体和有机碳粘结或团聚体包裹有机碳。当降雨侵蚀发生时,雨滴对团聚体击打会导致团聚体的破碎分离,雨强增大会加剧这一过程,破碎的团聚体和有机碳会随径流而流失,碎石的存在会弱化雨滴的击打作用,从而呈现大雨强,低碎石含量下,有机碳流失含量较低,小雨强高碎石含量下,有机碳流失含量较高的现象。粒径较小的团聚体颗粒内部应力更强,在侵蚀时不容易被雨滴击碎<sup>[5,28]</sup>。而大粒径团聚体颗粒在降雨侵蚀中更易被击碎破坏,且降雨前期因侵蚀力不足更难被搬运<sup>[12]</sup>。由于搬运过程中,雨滴的击打和碰撞会导致其内的有机碳流失。在降雨后,侵蚀泥沙中,各活性有机碳的含量和占比会随着粒径组成的变化而改变。小粒径的黏粒由于其微生物活动较弱,其内含有稳定性较高的非活性有机碳和低活性有机碳<sup>[8,11,29]</sup>。而大粒径颗粒易于破碎和黏合,生物活动较强,在坡耕地上施肥等人为因素较多,使得周转速率较快,活性较高的有机碳用于胶结形成大团聚体颗粒<sup>[24]</sup>。雨强对于泥沙的侵蚀起主导作用,有机碳随着泥沙流失,最终呈现出以雨强为主导。因此在暴雨季节应特别注意对坡耕地施肥的使用和大粒径颗粒的流失防护,从而防止有机碳流失导致土地质量下降和水体富营养化,同时对碎石含量较高的坡面应进行去碎石化处理。

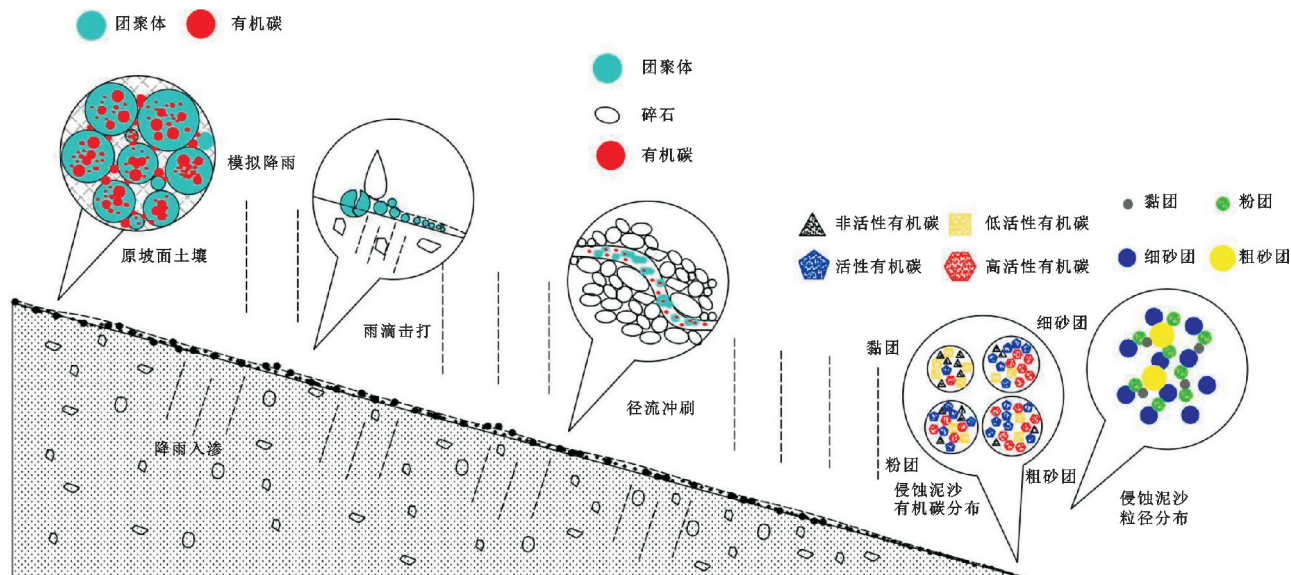


图 9 泥沙和有机碳流失机理

Fig. 9 Mechanism of Sediment and organic carbon loss

## 4 结论

(1) 本研究得出在侵蚀泥沙粒径分布中,细砂粒含量最高(51.83%~56.19%)。在侵蚀泥沙有机碳

流失中,中活性有机碳流失含量最高。雨强和各有机碳流失含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),碎石含量和非活性有机碳流失含量呈显著正相关( $p < 0.05$ ),各有机碳流失量在碎石含量 20%和降雨强度 120 mm/h

下,均达到了峰值。在降雨侵蚀过程中,有机碳流失速率,随时间呈现先波动增加后稳定的趋势。

(2) 雨强主要通过影响细砂粒和粗砂粒来影响活性较高的有机碳流失,碎石含量通过影响黏粒来影响活性较低的有机碳流失。雨强(60.2%)对于泥沙侵蚀和有机碳的流失影响程度大于碎石含量(39.8%)。

(3) 依据本试验所得结果,考虑实际情况和经济因素,对于库区含碎石坡耕地侵蚀泥沙和有机碳流失防治,建议在原坡碎石含量在 0%~30% 时,对坡面进行去碎石处理,保持碎石含量低于 10%。

(4) 本研究考虑了降雨强度和碎石含量对坡耕地有机碳侵蚀的影响,但实际在坡耕地中的影响因素较多,后续研究可结合农作物种类、人为耕作等因素去深入探讨坡耕地土壤侵蚀和有机碳组分流失之间的影响关系。

#### 参考文献(References):

- [1] Zheng H, Li X A, Deng Y H, et al. Physical modelling of hydraulic erosion rates on loess slopes[J]. *Water*, 2022,14(9):1344.
- [2] 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 X L, Huang J Q, Qi Y J, et al. Response of organic carbon loss to soil erosion and its drivers: A meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2023,44(9):5125-5134.
- [3] 张健乐,曾小英,史东梅,等.生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响[J].*环境科学*,2022,43(4):2209-2218.  
Zhang J L, Zeng X Y, Shi D M, et al. Effects of biochar on soil organic carbon of eroded cultivated layer of slope farmland in purple hilly area[J]. *Environmental Science*, 2022,43(4):2209-2218.
- [4] 任瑞雪.降雨侵蚀的分离与输移过程对泥沙中有机碳特征的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.  
Ren R X. Impact of detachment and transport of rainfall erosion on sediment organic carbon [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [5] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.  
Wang X Y. Distribution of rock fragments and their effects on hillslope soil erosion in purple soil [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [6] 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.
- [7] 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.  
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.
- [8] 陈致君,王善琦,刘琳.片蚀过程中壤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 Z J, Wang S Q, Liu L. 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.
- [9] 何舫,韩少杰,王丹彤,等.典型黑土区坡耕地表层土壤活性有机碳变化特征[J].*森林工程*,2024,40(2):85-91.  
He S, Han S J, Wang D T, et al. Characteristics of changes in active organic carbon in surface soil of sloping farmland in typical black soil areas [J]. *Forest Engineering*, 2024,40(2):85-91.
- [10] 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 T L, Xie J B, Kong C H, 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.
- [11] Wang L, Li Y, Wu J J, 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.
- [12] 王涵,赵怡凯,陈祥伟,等.降雨强度和坡度对黑土坡耕地团聚体流失特征的影响[J].*水土保持研究*,2023,30(1):11-17.  
Wang H, Zhao Y K, Chen X W, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the characteristics of soil aggregate loss in black soil sloping field[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):11-17.
- [13] van Wesemael B, Mulligan M, Poesen J. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: The impact of rock fragments and soil thickness [J]. *Hydrological Processes*, 2000,14(10):1811-1828.
- [14] van Wesemael B, Poesen J, Kosmas C S, et al. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments [J]. *Journal of Hydrology*, 1996,182(1/4):65-82.

- [15] Kirkby C A, Kirkegaard J A, Richardson A E. Gravel-associated organic material is important to quantify soil carbon and nitrogen stocks to depth in an agricultural cropping soil[J]. Soil Research, 2021,60(3):224-233.
- [16] 程辉,吴胜军,王小晓,等.三峡库区生态环境效应研究进展[J].中国生态农业学报,2015,23(2):127-140.  
Cheng H, Wu S J, Wang X X, et al. Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015,23(2):127-140.
- [17] 唐永兰,徐桂荣,王晓芳,等.1992—2021年三峡库区夏季小时强降水时空分布特征[J].干旱气象,2023,41(4):589-598.  
Tang Y L, Xu G R, Wang X F, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of summer hourly heavy rainfall in the Three Gorges Reservoir area from 1992 to 2021[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023,41(4):589-598.
- [18] Mehuys G R, Stolzy L H, Letey J, et al. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975,39(1):37-42.
- [19] 郭萍,夏振尧,高峰,等.香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(19):105-112.  
Guo P, Xia Z Y, Gao F, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):105-112.
- [20] 郝燕芳,佟帆.侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J].水土保持学报,2020,34(1):1-7.  
Hao Y F, Tong F. Research progress of the particle-size characteristics of eroded sediments[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(1):1-7.
- [21] 杨帅.不同工程堆积体坡面水蚀过程及泥沙颗粒搬运机制研究[D].北京:中国科学院大学,2018.  
Yang S. Water erosion processes of sandy soil and sediment sorting associated with transport mechanism on slope of engineering accumulation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [22] 张方方,岳善超,李世清.土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J].农业环境科学学报,2021,40(2):252-259.  
Zhang F F, Yue S C, Li S Q. Chemical methods to determine soil organic carbon fractions and carbon indexes: A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(2):252-259.
- [23] Li J M, Wang W L, Guo M M, et al. Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(11):3896-3908.
- [24] 蔡岸冬,徐香茹,张旭博,等.不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析[J].中国农业科学,2014,47(21):4291-4299.  
Cai A D, Xu X R, Zhang X B, et al. Capacity and characteristics of mineral associated soil organic carbon under various land uses[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014,47(21):4291-4299.
- [25] 侯赛赛,白懿杭,王灿,等.土壤有机碳及其活性组分研究进展[J].江苏农业科学,2023,51(13):24-33.  
Hou S S, Bai Y H, Wang C, et al. Research progress of soil organic carbon and its active components[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023,51(13):24-33.
- [26] 李波,李晔,韩惟怡,等.人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析[J].水土保持学报,2016,30(3):39-43.  
Li B, Li Y, Han W Y, et al. Loss characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of different sizes under artificial rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(3):39-43.
- [27] 杨艳芬,王全九,曾辰,等.土石混合介质水分入渗特性试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):87-90,132.  
Yang Y F, Wang Q J, Zeng C, et al. Experimental research on water infiltration characteristics of stony-soil medium[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):87-90,132.
- [28] 杨苗苗,杨勤科,张科利,等.砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响[J].土壤学报,2021,58(5):1157-1168.  
Yang M M, Yang Q K, Zhang K L, et al. Effects of content of soil rock fragments on calculating of soil erodibility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(5):1157-1168.
- [29] 王琼,范志平,陈寒,等.辽东冰缘地貌表层土壤团聚体活性有机碳分布特征[J].中国水土保持科学,2023,21(6):23-31.  
Wang Q, Fan Z P, Chen H, et al. Distribution characteristics of labile organic carbon in the soil aggregate in periglacial landforms of eastern Liaoning[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(6):23-31.