

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.031

张晓韩, 马岚, 郁重, 等. 红壤坡面水力与重力复合作用下的土壤侵蚀过程[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 54-60.

ZHANG Xiaohan, MA Lan, YU Chong, et al. Soil erosion process under the combined action of water and gravity on red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 54-60.

红壤坡面水力与重力复合作用下的土壤侵蚀过程

张晓韩¹, 马岚^{1,2,3}, 郁重⁴, 武志伟¹, 王洁⁵

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室,北京 100083;

3.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;4.北京师范大学

水科学研究院,北京 100875;5.保定市水土保持试验站,河北 保定 071051)

摘要: [目的] 土壤侵蚀是全球最主要的生态环境问题之一。分析不同条件下水力与重力复合侵蚀的水沙过程及其与砾石含量间的协同变化规律,对揭示水力与重力复合侵蚀的耦合机理具有重要意义。[方法] 设置无砾石与砾石含量为 40% 的 2 种类型的土体,通过野外人工模拟连续降雨的方法,探讨水力与重力复合作用下,砾石含量对土壤侵蚀过程的影响及其协同变化规律。[结果] (1) 无砾石土体在 2 场降雨中均未产流;含砾石土体在第 1 场降雨中未产流,但第 2 场降雨中含砾石土体在 36 min 开始产流,初始产流时间随降雨场次的增加基本趋于提前,变化为 8~36 min。(2) 含砾石土体各场降雨的总产流量分别为 8.97, 63.9, 70.8, 79.7, 127.5 L;各场降雨后期产流过程基本一致,产流率均逐渐减小。(3) 各场降雨的总产沙量分别为 0.26, 10.6, 5.74, 3.15, 9.37 g;含砾石土体各场降雨中侵蚀速率均呈较大波动,但在降雨后期总体趋势均为减小。(4) 无砾石土体在第 2 场降雨中发生重力侵蚀,侵蚀量为 $106.37 \times 10^3 \text{ cm}^3$, 沉积量为 $76.28 \times 10^3 \text{ cm}^3$;含砾石土体在第 3 场降雨中,土体中下部发生小面积的崩塌,重力侵蚀量为 $6.08 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。[结论] 研究结果可为解析水力与重力复合侵蚀营力的耦合作用机制提供理论依据。

关键词: 红壤; 水力侵蚀; 重力侵蚀; 砾石含量; 侵蚀产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0054-07

Soil Erosion Process Under the Combined Action of Water and Gravity on Red Soil Slope

ZHANG Xiaohan¹, MA Lan^{1,2,3}, YU Chong⁴, WU Zhiwei¹, WANG Jie⁵

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Jixian Forest Ecosystem National Observation and Research Station, CNERN,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 5. Baoding Soil and Water Conservation Experimental Station, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion is one of the most important ecological and environmental problems in the world. It is of great significance to reveal the coupling mechanism of water and gravity combined erosion by analyzing the water and sediment process of water and gravity combined erosion under different conditions and its synergistic change law with gravel content. [Methods] Two types of soil, with no gravel and gravel content of 40%, were set up. Through the method of artificial simulation of continuous rainfall in the field, the influence of gravel content on soil erosion process and its synergistic change rule under the combined action of water and gravity were discussed. [Results] (1) Gravel-free soil did not produce runoff under two rainfalls. The gravel-containing soil did not produce runoff under the first rainfall, but started to produce runoff at 36 min under the second rainfall. The initial runoff time basically tended to advance with the

收稿日期: 2024-09-14

修回日期: 2024-09-24

录用日期: 2024-10-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302901)

第一作者: 张晓韩(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: ZXHLMO@163.com

通信作者: 马岚(1981—), 女, 博士后, 教授, 主要从事森林水文、坡面水文等研究。E-mail: mlpcz@sina.com

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

increase of rainfall times, and the range of variation was 8~36 min. (2) The total runoff of each rainfall in the gravel soil was 8.97, 63.9, 70.8, 79.7 and 127.5 L, respectively. The runoff process in the later stage of each rainfall was basically the same, and the runoff rate decreased gradually. (3) The total sediment yield of each rainfall was 0.26, 10.6, 5.74, 3.15, 9.37 g, the erosion rate of the gravel soil fluctuated greatly under each rainfall, but the overall trend decreased in the later stage of rainfall. (4) Gravity erosion occurred in the non-gravel soil during the second rainfall. The erosion amount was $106.37 \times 10^3 \text{ cm}^3$, and the deposition amount was $76.28 \times 10^3 \text{ cm}^3$. Under the third rainfall, a small area of collapse occurred in the middle and lower part of the gravel soil, and the amount of gravity erosion was $6.08 \times 10^3 \text{ cm}^3$. [Conclusion] The research results can provide a theoretical basis for analyzing the coupling mechanism of water and gravity combined erosion forces.

Keywords: red soil; water erosion; gravity erosion; gravel content; erosion sediment yield

Received: 2024-09-14

Revised: 2024-09-24

Accepted: 2024-10-08

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

土壤侵蚀导致土地资源流失,土壤肥力和质量下降,造成土地退化和粮食减产等,对农业生产及人类的生存与发展带来巨大的冲击,是全球最主要的生态环境问题之一^[1-2]。西南高山峡谷区地势起伏大,地形较为复杂,地貌以山地和高原为主,气候空间分异明显^[3]。因其地貌呈现高差较大的特性,再加上极端天气频繁出现,该地区常年发生滑坡、崩塌与泥石流等重力侵蚀,而降雨又是该区重力侵蚀诱发的主要因素^[4],在水力与重力共同作用下,该区土壤侵蚀发生得愈加剧烈,为减少水土流失和西南高山峡谷区水土保持和生态保护等工作提供科学依据,揭示水力与重力复合侵蚀的耦合机理显得尤为重要。

水力侵蚀和重力侵蚀都是土壤侵蚀重要的组成部分。水力侵蚀是全世界最普遍、破坏性最大的土壤侵蚀类型^[5],在地形起伏较大的山区侵蚀程度尤为严重^[6]。水力侵蚀的发生取决于降雨强度、地形、植被和土壤母质等^[7]。在山区,重力侵蚀是一种常见的土壤侵蚀类型,包括崩塌、滑坡、泥石流等^[8],其主要受降雨、植被、气候和地形等因素的影响^[9]。降雨是水力侵蚀与重力侵蚀的主要触发因素,水力侵蚀仅发生于降雨时段,而大多数重力侵蚀往往发生在降雨过程中或之后^[10]。砾石的存在影响土壤含水量和导水率^[11]及土壤入渗规律^[12]等土壤物理性质及土壤水文过程。而砾石的含量、孔隙比、块石形状和角度等均为影响土石混合物渗透特性的主要因素,其中又以砾石含量的影响最为显著^[13]。土石混合堆积体中,细颗粒在水力作用下运移流失,颗粒重分布,引起土体内部结构变化^[14],极易造成边坡稳定性降低甚至失稳滑移。砾石对土壤侵蚀的影响较复杂,需要整合更多与侵蚀产沙过程相关的试验研究数据,综合评估砾石在坡面产流和侵蚀产沙中的作用。

目前对于水力侵蚀和重力侵蚀的交互作用研究

主要集中在黄土高原,认为气候因素和地形因素是重力侵蚀的主导因素^[10]。而西南高山峡谷区土壤侵蚀发生的位置、区域环境特征及岩土性质与黄土高原有很大差异,侵蚀机理更为复杂。因此,本研究以西南高山峡谷典型区域的红壤为研究对象,通过野外人工模拟降雨试验,开展不同下垫面的水力与重力复合侵蚀过程观测,对比分析不同条件下水力与重力复合侵蚀的水沙过程及其与砾石含量间的协同变化规律,以期解析水力与重力复合侵蚀营力的耦合作用机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南高山峡谷区是金沙江、澜沧江和怒江三大著名江河的上游,地处四川省、云南省与西藏自治区交界地带($24^{\circ}58'07.47''$ — $32^{\circ}51'24.93''$ N, $91^{\circ}23'48.24''$ — $104^{\circ}13'43.55''$ E),区域面积约 61.10 万 km^2 ,海拔 89~6 826 m,年平均气温 -2.98 ~ 21.89 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 296.62~2 302.90 mm,全区轻度及以上土壤侵蚀多发生于 $>15^{\circ}$ 坡段,占同等级侵蚀总面积的 73.36%,其中分布于 $>25^{\circ}$ 坡段的轻度及以上侵蚀面积占比达 48.90%^[15]。

1.2 供试材料

本研究选取红壤进行试验,试验用土的砾石粒径为 2~50 mm,为了更好地模拟实际土壤的状态,试验选用原状土壤中的砾石,并取 10 mm 作为土石混合物中的土石阈值,即粒径 >10 mm 的颗粒为块石,粒径 <10 mm 的颗粒为土体。将所取土壤过 10 mm 筛网剔除土中的杂物,后将其平铺至阴凉处自然风干,采用 MS 2000 激光粒度仪测定土壤机械组成, <0.002 , 0.002 ~ 0.02 , 0.02 ~ 0.05 , 0.05 ~ 0.1 , 0.1 ~ 2.0 mm 的颗粒组成分别为 15.26%,38.17%,19.85%,10.38%,16.34%,砾石含量为 40%。

用中国科学院水利部水土保持研究所生产的 BX-1 型便携式野外降雨模拟装置,降雨高度为 4.11 m,雨滴直径大小分布与天然降雨相似,雨强 2~100 mm/h,均匀度达 75% 以上。所用土槽内径长 3.36 m,宽 1.26 m,后墙高 2.5 m,主要由砖块与水泥修建而成,在土槽长 2.4 m 处设置长 1.26 m,宽 10 cm,高 40 cm 的挡墙,挡墙顶端中部安装 1 个长宽高为 10 cm 的接样口,并配置带有刻度的 20 L 集水桶,2 个土槽为 1 组,共修建 2 组(图 1)。

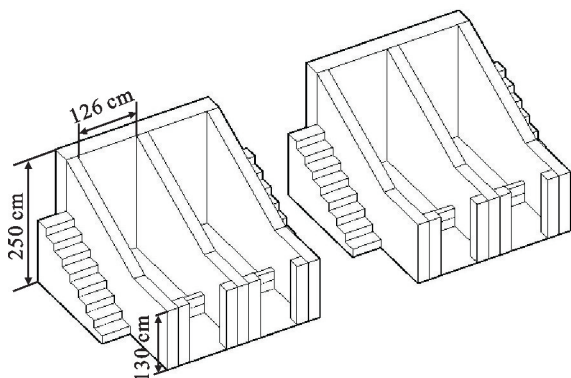


图 1 试验土槽

Fig.1 Test soil bin

对于一般浅层边坡,土体下部通常含有不透水或弱透水的基岩层,其对边坡的入渗及滑裂面的形状均有显著影响^[16],下层基岩面与边坡坡面近似平行处理^[17-18]。为了模拟基岩,特定规格为长 2.4 m,宽 0.6 m,高 0.1 m 的水泥板,将其固定于坡面下层,每个土槽中放置 2 块水泥板,用泡沫胶将土槽与水泥板间的缝隙填满,装土深度为 45 cm(图 2)。

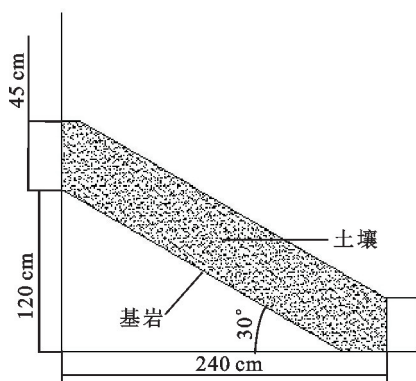


图 2 土壤装填示意

Fig.2 Schematic diagram showing soil filling

1.3 试验过程

装填土壤时,土壤质量密度设置为 1.2 g/cm^3 。填土前在土槽内壁用粉笔划线标记坡面的位置,使填土时坡面坡度能与水泥板放置坡度保持一致,后采用水平分层填土、人工压实的方法使其容重达到临近自然的状态,且坡面打磨平整,对边坡处尽可能压实以减小边界的影响,土层之间进行打毛处理防止

出现分层、滑移。野外人工模拟降雨实验设置坡度 30° ,降雨强度 90 mm/h ,砾石含量 0 和 40%。

模拟降雨试验在早上进行,试验开始前率定降雨器的实时雨强,将实际雨强与设计雨强的误差控制在 5% 以内。降雨方式为连续降雨,雨强设置为 90 mm/h ,每场降雨时间为 1 h,后暂停 1 h 利用三维激光扫描仪扫描地形,再进行下场降雨,直至土体发生重力侵蚀或降雨场次达到 6 场为止。重力侵蚀发生前、后瞬间坡体的体积差,即该次重力侵蚀量。本研究中统计单崩滑量为 500 cm^3 以上的重力侵蚀事件。在降雨过程中及雨后 20 min 内现场判断坡面上重力侵蚀的类型、发生的时间及位置;降雨试验后,根据三维激光扫描仪记录的图像,对上述人工现场判断的重力侵蚀类型进行校核。

由于无砾石土体在第 2 场降雨过程中发生重力侵蚀,而含砾石土体在 6 场降雨中仅有第 3 场发生小规模重力侵蚀,故无砾石土壤坡面共降雨 2 h,含砾石土壤坡面共降雨 6 h。降雨过程中,坡面开始产流后,记录初始产流时间,每隔 5 min 在出口处用 500 mL 取样瓶接取径流泥沙样,并读取集水桶中的刻度,接取的径流泥沙样静置后去除上层清液,放入 105°C 烘箱内烘干至恒重后称取泥沙质量。

1.4 数据处理

利用 Trimble Real Works 12.0、Geomagic Wrap 2021 软件分析处理仪器扫描的数据。试验数据利用 Excel 2021 软件进行统计分析,采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 产流过程

2.1.1 初始产流时间 在暴雨条件下,无砾石土体在 2 场降雨中均未产流。由图 3 可知,含砾石土体在第 1 场降雨中未产流,但第 2 场降雨中含砾石土体在 36 min 开始产流,初始产流时间随降雨场次的增加基本趋于提前,变化范围为 8~36 min。第 2 场降雨坡面产流所需时间最长,第 3 场与第 6 场降雨坡面产流所需时间最短。后 4 场降雨的初始产流时间较第 2 场降雨分别提前 28,17,23,28 min,且后场降雨的初始产流时间较前场的变化分别为 28,11,6,5 min。整体来看,随着降雨场次的增加,初始产流时间波动越小。

2.1.2 产流量与产流率 由于试验时间较短蒸发量可忽略不记,降雨量仅转化为入渗与径流 2 个部分^[19]。含砾石土体各场降雨的总产流量见图 4,各场降雨的总产流量分别为 8.97, 63.9, 70.8, 79.7, 127.5 L。随着降雨场次的增加,总产流量逐渐增大。含砾石土体各场降雨的产流率见图 5,第 2~6 场降雨

的产流率分别为 0.06~0.8,0.34~1.5,1.0~2.1,0.7~2.0,0.86~3.2 L/min。含砾石土体各场降雨后期产流过程基本一致,产流率均为逐渐减小。第 2 场降雨的产流率先减小后增大,趋于稳定后在降雨后期减小;第 3 场与第 6 场降雨的产流率均呈多次先增大后减小的波动;第 4 场与第 5 场降雨的产流率均呈多次先减小后增大的波动,但第 5 场降雨的产流率在降雨末期迅速减小。整体来看,只有第 3 场降雨末期产流率高于初始产流率,其余 4 场降雨均为初始产流率高于末期产流率。第 6 场降雨的产流率总体大于其余 4 场降雨,第 2 场降雨的产流率最小。

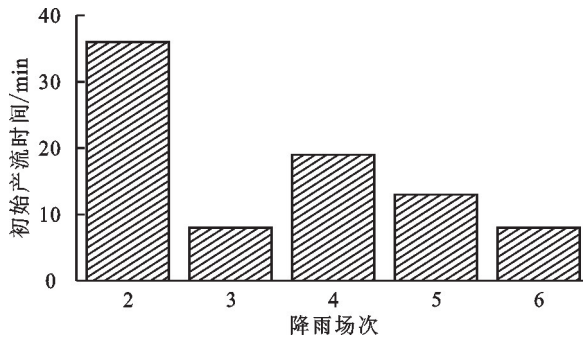


图 3 含砾石土体各场降雨的初始产流时间

Fig.3 The initial runoff time of each rainfall in the gravel soil

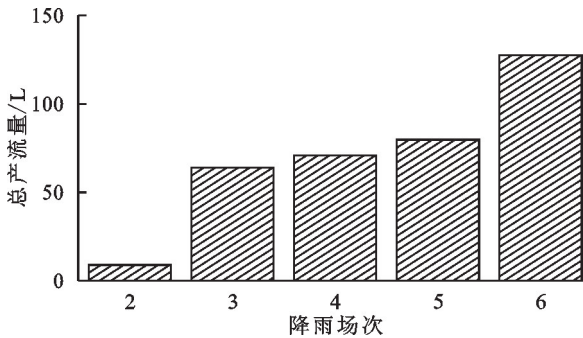


图 4 含砾石土体各场降雨的总产流量

Fig.4 Total runoff of the gravel soil under each rainfall

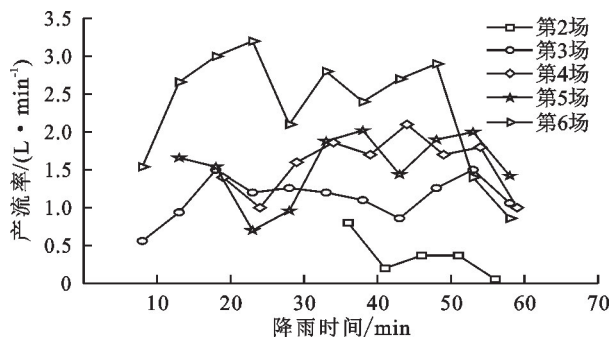


图 5 含砾石土体各场降雨的产流率

Fig.5 Runoff rate of the gravel soil under each rainfall

2.2 侵蚀过程

2.2.1 水力作用 侵蚀产沙过程是坡面侵蚀过程研究的主要内容,是研究坡地发育的基础^[20]。由图 6 可知,含砾石土体各场降雨的总产沙量分别为 0.26,10.6,5.74,3.15,9.37 g。降雨过程中重力侵蚀发生后

产沙量迅速升高。在降雨前期,土体发生重力侵蚀前(仅发生水力侵蚀)侵蚀产沙量很小,然而随着重力侵蚀发生,产沙量迅速增加并达到峰值,重力侵蚀发生一段时间后,产沙量有所减小,但仍高于重力侵蚀发生前的产沙量。

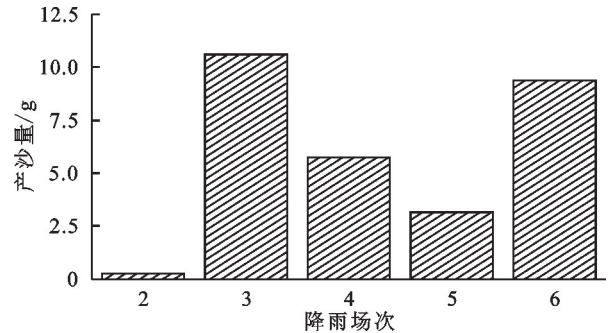


图 6 含砾石土体各场降雨的总产沙量

Fig.6 Total sediment yield of the gravel soil under each rainfall

由图 7 可知,含砾石土体各场降雨中产沙率均呈较大波动,分别为 0.002~0.028,0.024~0.496,0.010~0.220,0.020~0.176,0.024~0.484 g/min。在降雨后期产沙率总体呈减小趋势。第 2 场降雨的产沙率先增大后减小,最后趋于稳定;第 3 场与第 6 场降雨的产沙率均呈多次先增大后减小的波动,且波动幅度较大;第 4 场与第 5 场降雨的产沙率均呈先减小后增大再减小的趋势,且在降雨末期产沙率迅速减小。整体来看,第 3 场与第 5 场降雨为末期产沙率高于前期产沙率,其余 4 场降雨均为前期产沙率高于末期产沙率。降雨前期,第 6 场降雨的产沙率总体大于其余 4 场降雨;降雨中后期,第 3 场降雨的产沙率总体大于其余 4 场降雨;第 2 场降雨的产沙率最小。

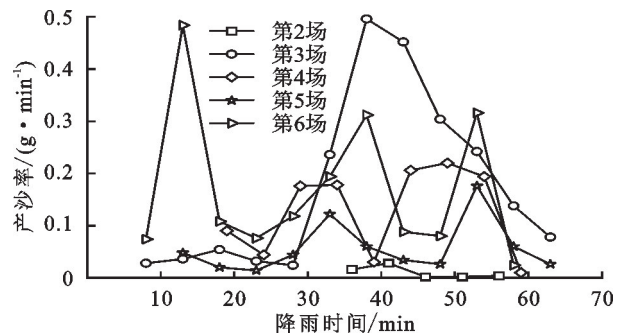


图 7 含砾石土体各场降雨的产沙率

Fig.7 Sediment yield rate of the gravel soil under each rainfall

2.2.2 重力作用 由图 8 可知,随着第 1 场降雨的进行,无砾石土体坡顶前端下沉 2~8 cm,且坡顶中部产生裂缝,水平贯穿整个坡顶面,但土体并未发生滑动;在第 2 场降雨过程中,降雨 51 min 时土体发生重力侵蚀,重力侵蚀量为 $106.37 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。土体从坡顶开始发生滑动,滑移后的坡顶较试验前的坡顶整体下移 4~15 cm,滑坡体一直延伸到土槽后壁,其主要是从上下垂直发生位移,当滑坡体滑动到坡下时,

在土槽接样口处被拦截,因此堆积在坡下,沉积量为 $76.28 \times 10^3 \text{ cm}^3$,占重力侵蚀总量的 71.7%。随着降雨的持续进行,堆积在坡下的土体再次发生重力侵蚀,重力侵蚀量为 $21.59 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。

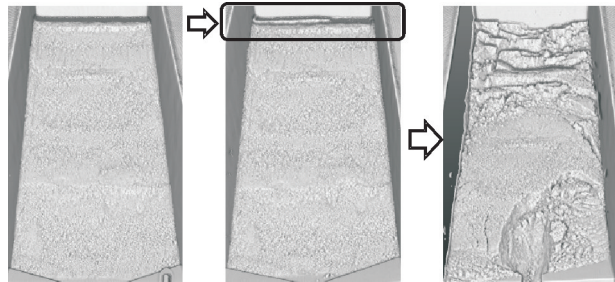


图 8 无砾石土体重力侵蚀发展过程

Fig.8 Development process of gravity erosion of the non-gravel soil

由图 9 可知,随着 6 场降雨的进行,含砾石土体坡顶整体下沉 $2 \sim 14 \text{ cm}$,后场降雨较前场降雨坡顶下移最大高度分别为 $5.0, 3.5, 2.5, 1.5, 1, 0.5 \text{ cm}$ 。在前 2 场降雨结束后,土体坡顶中部产生 2 条裂缝,一条裂缝水平贯穿整个坡顶面,另一条裂缝占据坡顶的 $1/2$,但土体并未发生滑动;在第 3 场降雨过程中,土体中下部发生小面积的崩塌,重力侵蚀量为 $6.08 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。随着降雨的持续进行,坡面产流量逐渐增多,但却仅发生水力侵蚀,未再次发生重力侵蚀。

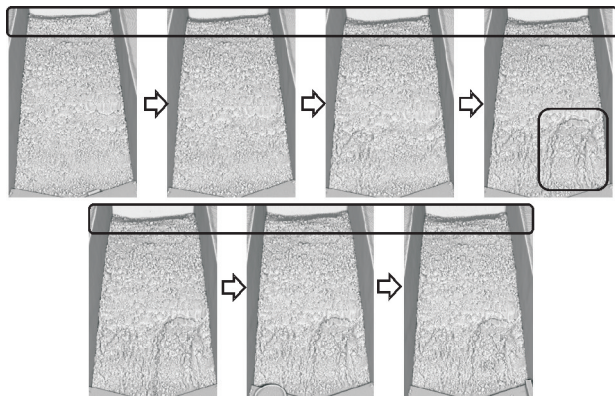


图 9 含砾石土体重力侵蚀发展过程

Fig.9 Development process of gravity erosion of the gravel soil

整体来看,无砾石土体重力侵蚀量是含砾石土体重力侵蚀量的 52.8 倍。无砾石土体发生大规模重力侵蚀后,在降雨的持续进行下,仍再次发生重力侵蚀,而含砾石土体在发生小规模重力侵蚀后,则不易再次发生重力侵蚀,在降雨场次的持续增加下,无砾石土体边坡稳定性下降。

3 讨论

由于土地利用、地形条件、植被覆盖等的影响,土壤坡面产流发生时间存在较大差异,而准确把握降雨过程中的初始产流时间,是坡面产流及坡面侵蚀计算的关键^[21]。由于无砾石土体在降雨过程中正常入渗,但当雨水持续下渗,饱和土体的下滑力大于抗剪

强度时,发生重力侵蚀,故土体还未达到产流阶段;砾石的存在则能有效保护土壤表面,减少雨滴的直接冲击,增加水流的弯曲度和地表的粗糙度,延长径流路径,并防止土壤表层结皮,使水分得以持续入渗,同时土壤大孔隙增多,使入渗率增加,加速土体的饱和,与梁洪儒等^[22]研究结论一致。而且砾石透水性较差,表面更为光滑,可以促进径流的汇集,因此降雨场次的增加使初始产流时间提前。

产流量的变化是一个复杂的过程,在特定的降雨强度下,地表径流量的大小主要由坡面土壤入渗特性与承雨量来决定^[21]。当坡面开始产流后,在降雨初期,坡面产流量增加迅速,随着降雨场次的增加,土壤含水率上升,坡面入渗率逐渐降低,总产流量也随之增大。产流后,坡面入渗量减少,更多降雨转化为径流,而降雨量的持续累积使得坡面水流速度加快,因此在连续降雨过程中,单位时间内坡面产流量越大,其变化的程度也在逐渐增大。在单场降雨中,含砾石土体的产流量呈不规则波动,原因是砾石的存在改变土壤入渗及产流特征,在降雨初期,含砾石土体的入渗速率加快,导致坡面径流量减少,但随着产流的发生,土体结构受到破坏,表层土壤被冲刷剥离,入渗速率减慢,从而使得坡面径流量增加,与王慧等^[11]研究结论一致。

随着土壤含水量的增加,坡面初始产流速率加快,侵蚀产沙量也随之增大,是由于降雨初期雨滴击溅在坡面上产生大量分散的颗粒,而这些土粒在坡面薄层水流的搬运下,形成坡面产沙的高峰,随着降雨的继续,在雨滴的打击作用下,土壤表面出现更密集的临界结皮层^[23],从而增加土壤的抗蚀性,而薄层水流的存在,使雨滴击溅的土粒减少,受重力侵蚀的影响,坡面的产沙过程更为复杂,呈多峰值特征。坡面土壤侵蚀过程中,降雨场次的增加,使土壤含水量增加,当重力侵蚀发生后,坡面汇流量增大,地表径流持续向细沟内汇集,沟壁土体在重力作用下塌陷,从而引起产沙速率的波动^[24]。

降雨入渗过程中土体含水量逐渐增加,土体重量增大,基质吸力减小,导致土体的抗剪强度降低,当边坡土体重量引起的下滑力与土体抗剪强度的平衡被打破时,土体发生重力侵蚀;而含砾石土体由于砾石的作用,边坡稳定性变化较小,不易发生重力侵蚀。又因土体砾石含量较高,雨水下渗到一定程度后,土壤入渗率减小,部分雨水转化为坡面径流流出,进而造成水力侵蚀。降雨入渗是一个持续的动态过程,边坡失稳通常发生在持续降雨期间或降雨停止后的某个时间^[25]。砾石的存在一定程度上减少重力侵蚀的发生,其主要是砾石促进黏土入渗^[26],使土体抗剪强

度增大,而土体下滑力并未大于抗滑力,且在降雨量的不断累积下,土体含水率不断增加,已入渗的雨水汇集到一处后使其发生小规模崩塌,未入渗的水分则转化为地表径流流走,因此,砾石的存在能有效减少重力侵蚀发生的次数及规模。

本研究基于野外人工模拟降雨试验,对不同条件下水力与重力复合侵蚀的水沙过程及其与砾石含量间的协同变化规律作出初步探索,仍存在一定不足。本研究仅设计砾石含量作为变量进行试验,土层底部基岩渗透性存在多种情况,实际土壤中也还存在土层底部基岩渗透性^[27]、根系^[28]等的分布,后期研究还需要从基岩渗透性与根系分布等方面着手,进一步研究基岩渗透性与根系分布情况下水力与重力共同作用的坡面产流产沙规律及主要影响因素,为坡面水土流失防控提供理论依据。

4 结论

(1)红壤坡面初始产流时间与砾石含量关系密切,无砾石土体坡面未产流,含砾石土体的初始产流时间随着降雨场次的增加逐渐提前。

(2)随着降雨场次的增加,含砾石土体的总产流量逐渐增大。含砾石土体各场降雨的产流率在降雨初期快速增大,降雨中期呈不稳定波动趋势,后期迅速减小至降雨结束。

(3)含砾石土体各场降雨中的产沙率均呈较大波动,但在降雨后期均呈减小趋势。

(4)无砾石土体与含砾石土体均发生重力侵蚀。无砾石土体的重力侵蚀量是含砾石土体的52.8倍,砾石的存在有效减少重力侵蚀发生的次数及规模。

参考文献:

- [1] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等.西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J].泥沙研究,2023,48(6):51-58.
DING L, HUANG T T, QIN W, et al. Spatial variation of soil erosion in Southwest Alpine Canyon area[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(6): 51-58.
- [2] 冯笛珂,符素华,丁建新,等.北京市近40年来降雨侵蚀力时空变异特征[J].水土保持学报,2024,38(4):132-142.
FENG D K, FU S H, DING J X, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Beijing in recent 40 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 132-142.
- [3] 赖金林,齐实,廖瑞恩,等.2000—2019年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应[J].农业工程学报,2023,39(14):155-163.
LAI J L, QI S, LIAO R E, et al. Vegetation change responses to climate change and human activities in southwest alpine canyon areas of China from 2000 to 2019[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14): 155-163.
- [4] 赵兴阳,徐向舟,蒋云钟,等.暴雨条件下植被对黄土沟坡重力侵蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):58-63.
ZHAO X Y, XU X Z, JIANG Y Z, et al. Effects of vegetation for gravity erosion on the loess gully sidewall under the intense rainfalls[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 58-63.
- [5] 林杰,张相,姜姜,等.水力侵蚀过程中土壤有机碳循环研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):187-194.
LIN J, ZHANG X, JIANG J, et al. Progress of soil organic carbon cycling during hydraulic erosion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 46(6): 187-194.
- [6] 余恩旭,张明芳,蒋志魏,等.岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-10.
YU E X, ZHANG M F, JIANG Z W, et al. Spatiotemporal dynamics of soil erosion and associated influencing factors in the upper Minjiang River watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 1-10.
- [7] MONTGOMERY D R. Soil erosion and agricultural sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(33): 13268-13272.
- [8] 高航,徐向舟,肖培青,等.暴雨条件下植被对沟坡重力侵蚀速率和规模的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):17-24.
GAO H, XU X Z, XIAO P Q, et al. Effects of vegetation on scale and rate of gravity erosion on the gully sidewall under heavy rainfall[J]. Soil and Water Conservation Research, 2021, 28(6): 17-24.
- [9] 喻涵,周子渊,王一,等.极端暴雨下典型小流域重力侵蚀的分布及影响因素[J].水土保持学报,2023,37(4):69-74.
YU H, ZHOU Z Y, WANG Y, et al. Distribution and influencing factors of gravitational erosion in typical small watershed under extreme rainstorm[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 69-74.
- [10] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [11] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.
WANG H, HU X J, SHAN C J. Effect of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield on the red soil slope nested gravel-sand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 24-29.
- [12] CERD A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration

- tion, interrill runoff and erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(1): 59-68.
- [13] 杨忠平, 李勇华, 李诗琪, 等. 不同含石率土石混合体水力侵蚀分异特征及机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(1): 133-145.
YANG Z P, LI Y H, LI S Q, et al. Characteristics and mechanisms of hydraulic erosion differentiation of soil-rock mixtures with different rock content[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(1): 133-145.
- [14] 田大浪, 谢强, 宁越, 等. 间断级配砂砾石土的渗透变形试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3663-3670.
TIAN D L, XIE Q, NING Y, et al. Experimental investigation on seepage deformation of gap-graded sand-gravel soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3663-3670.
- [15] 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 等. 西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(12): 6833-6846.
LAI J L, QI S, CUI R R, et al. Analysis of vegetation change and influencing factors in southwest alpine canyon area[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6833-6846.
- [16] 马世国, 韩同春, 徐日庆, 等. 强降雨条件下含倾斜基岩层的边坡稳定分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7): 2673-2678.
MA S G, HAN T C, XU R Q, et al. Slope stability analysis of inclined bedrock layer containing inclined bedrock under strong rainfall conditions[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(7): 2673-2678.
- [17] XIE M W, ESAKI T, CAI M F. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard[J]. *Environmental Geology*, 2004, 46(6): 840-850.
- [18] CROSTA G. Regionalization of rainfall thresholds: An aid to landslide hazard evaluation[J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2): 131-145.
- [19] 王丽园, 查轩, 黄少燕, 等. 不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 40-44.
WANG L Y, ZHA X, HUANG S Y, et al. Effect of slope gradients on red soil erosion under different rainfall intensity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 40-44.
- [20] 胡辉, 张金池, 朱丽珺, 等. 不同降雨条件对江苏高沙土地区水土流失的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(3): 149-152.
HU H, ZHANG J C, ZHU L J, et al. Effects of different rainfall conditions on soil erosion in high sandy soil areas of Jiangsu[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 36(3): 149-152.
- [21] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 40-43.
ZHANG H R, ZHENG F L. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 40-43.
- [22] 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 57-61.
LIANG H R, YU X X, FAN D X, et al. Effect of gravel-sand mulching on slope runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 57-61.
- [23] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 48-53.
GENG X D, ZHENG F L, LIU L. Influence of rainfall intensity and slope on erosion and sand production on purple soil slopes[J]. *Sedimentation Research*, 2010(6): 48-53.
- [24] ZHAO X N, WU P T, CHEN X L, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Research*, 2013, 51(1): 50-58.
- [25] 刘卫涛, 曹文贵, 张运强. 考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型及边坡稳定性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(4): 102-109.
LIU W T, CAO W G, ZHANG Y Q. Rainfall infiltration modeling and slope stability analysis of slopes considering unsaturated soil properties[J]. *Journal of Changjiang Academy of Sciences*, 2021, 38(4): 102-109.
- [26] 李建明, 刘晨曦, 张长伟, 等. 土质和砾石对堆积体入渗和产沙的影响试验研究[J/OL]. *长江科学院院报*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240507.1405.002>.
LI J M, LIU C X, ZHANG C W, et al. Experimental study on the effects of soil quality and gravel on infiltration and sand production in the accumulation[J/OL]. *Journal of Changjiang Academy of Sciences*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240507.1405.002>.
- [27] 刘纪根, 路良伟, 童晓霞, 等. 连续模拟降雨下不同底部透水性和坡度条件的坡面径流产沙特征[J/OL]. *长江科学院院报*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240521.1619.010>.
LIU J G, LU L W TONG X X, et al. Characteristics of sand production from slope runoff under continuous simulated rainfall with different bottom permeability and slope gradient[J/OL]. *Journal of Changjiang Academy of Sciences*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240521.1619.010>.
- [28] 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 64-68.
YANG Y M, ZHENG Z C, LI T X. Soil anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 64-68.