

陕北黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀—沉积过程试验研究

刘冉¹, 余新晓¹, 蔡强国^{2,3}, 孙莉英², 方海燕^{2,3}, 贾国栋¹, 和继军⁴

(1.北京林业大学 水土保持学院 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 100083 北京; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 100101 北京; 3.中国科学院大学 资源环境学院, 100049 北京; 4.首都师范大学 城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地 北京资源环境与 GIS 重点实验室, 100048 北京)

摘要: [目的] 分析各影响因素作用下黄土坡面的侵蚀—沉积过程, 为陕北黄土丘陵沟壑区水土保持措施的合理布设以及水土流失防治规划提供科学依据。[方法] 采用室内人工模拟降雨试验方法对不同坡度、坡长和 60 mm/h 降雨强度条件下的黄土坡面侵蚀—沉积过程特征开展研究。[结果] ①净侵蚀过程主要发生时间为在达到侵蚀速率峰值前后, 在降雨开始 35 min 左右内, 侵蚀速率在整个降雨过程出现正负值交替变化, 侵蚀过程与沉积过程并存。②坡度为 5°, 10°, 15° 时, 单位面积侵蚀量随坡长的增加而减少, 5—10 m 坡段中存在明显的沉积过程和临界侵蚀坡长。试验条件下黄土坡面发生沉积的临界坡长在 4—5 m 以及 5—10 m 范围内。③在 5°, 15° 坡度下, 整个降雨过程中 0—5 m 坡段的累计单位面积侵蚀量均大于 0—10 m 坡段坡面, 侵蚀过程中一直伴有沉积现象; 10° 坡面分别在降雨后 15 min 左右开始伴有沉积现象出现。[结论] 坡度和坡长是影响黄土坡面侵蚀—沉积过程的重要因素, 坡面径流含沙量和单位面积侵蚀量可以作为表征黄土坡面侵蚀—沉积特征的重要因子。在治理坡面水土流失时应采用拦截中上坡位径流的水土保持措施。

关键词: 人工模拟降雨; 坡面侵蚀; 沉积过程; 陕北; 黄土丘陵沟壑区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0031-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀—沉积过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 31-37. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.005; Liu Ran, Yu Xinxiao, Cai Qianguo, et al. Soil erosion and deposition processes of loess slopes in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 31-37.

Soil Erosion and Deposition Processes of Loess Slopes in Loess Hilly and Gully Region

Liu Ran¹, Yu Xinxiao¹, Cai Qianguo^{2,3}, Sun Liying², Fang Haiyan^{2,3}, Jia Guodong¹, He Jijun⁴

(1.School of Soil Water Conservation in Beijing Forestry University, Key

Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water

Conservation, Beijing 100083, China; 2.Institute of Geographical Sciences and Natural

Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Water Cycle and Related

Land Surface Processes, Beijing 100101, China; 3.College of Resources and Environment, University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Numerical Simulation, Resources Environment and GIS Key Lab of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] The erosion-deposition process of loess slopes under the effects of various influencing factors was studied in order to provide a scientific basis for the rational layout of soil and water conservation measures, and for planning to control and prevent soil and water loss in the loess hilly and gully region of Northern Shaanxi Province. [Methods] The characteristics of erosion-deposition processes on a loess slope

收稿日期: 2021-11-28

修回日期: 2022-03-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀过程对临界坡长的响应机制”(52179071), “黄土坡面侵蚀泥沙沉积过程与模拟”(41771314), “黄土坡面细沟形态与土壤再分布空间特征的耦合机制研究”(41977069)

第一作者: 刘冉(1997—), 女(汉族), 河北省定州市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: liuran808@126.com。

通讯作者: 和继军(1979—), 男(汉族), 河北省邢台市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀、水土保持及区域水文研究。Email: hejijun_200018@163.com。

under different slope gradients, slope lengths, and 60 mm/h rainfall intensity were studied using an indoor artificial rainfall simulation experiment. [Results] ①The net erosion process mainly occurred before and after reaching the peak value of erosion rate. The erosion rates alternated between positive and negative values during the entire rainfall period, and the erosion process coexisted with the deposition process. ② When the slope was 5°, 10°, and 15°, the erosion per unit area decreased with increasing slope length. There was an obvious deposition process and critical erosion slope length in the 5—10 m slope section. Under the test conditions, the critical slope length of loess slope deposition was in the range of 4—5 m and 5—10 m. ③ Under the gradient of 5° and 15°, during the entire rainfall process, the cumulative erosion per unit area of the 0—5 m slope section was greater than erosion of the 0—10 m slope section, and there was always deposition in the erosion process. On the 10° slope, deposition began to occur about 15 minutes after rainfall. [Conclusion] Slope gradient and slope length are important factors affecting erosion-deposition processes of a loess slope. The sediment concentration of slope runoff and erosion per unit area can be used as important factors to characterize the erosion-deposition characteristics of a loess slope. To control soil and water loss on a slope, soil and water conservation measures that intercept runoff at the middle and upper slope positions should be adopted.

Keywords: artificial rainfall simulation; slope erosion; deposition process; critical slope length; Northern Shaanxi Province; loess hilly and gully region

陕北黄土丘陵沟壑区气候变化剧烈,地形地貌复杂,使其已成为水土流失最严重的地区之一,同时也是生态环境极其脆弱的地区之一,严重阻碍了黄土高原地区的可持续发展^[1]。土壤侵蚀过程包括土壤分离、泥沙输移和沉积 3 个子过程,3 个子过程间存在相互依存关系,且往往同时发生^[2]。雨滴的飞溅和径流使土壤颗粒从土壤表面分离出来,分离的泥沙主要通过水流向下输送^[3],当输沙量超过径流输沙能力时,就会发生沉积^[4]。在过去 20 a 的土壤侵蚀研究中,出口处的泥沙输送收集的泥沙数据只能反映土壤侵蚀的强弱,如何定量刻画坡面分离、搬运、沉积过程的问题在我国至今尚未完全解决^[5]。由于坡度和坡长的影响,土壤侵蚀速率存在明显差异。已有相关研究指出不同坡长下的坡面径流侵蚀输沙特性^[6]以及坡面侵蚀速率有重要影响^[7]。如王玲玲等^[8-9]坡面侵蚀速率随坡长增加呈波动的强弱交替变化,并指出存在临界侵蚀坡长。王小康等^[10]研究指出黑土坡面的侵蚀—沉积速率在坡长上存在主次周期变化。坡度通过影响土壤入渗和土壤稳定性等^[11]方面进而影响土壤侵蚀过程。谭贞学等^[12]通过室内模拟降雨试验发现侵蚀模数随坡度增加呈波动变化,并且上坡位、下坡位的侵蚀模数存在明显差异。徐振剑等^[13]利用三维激光扫描技术得出整个坡面存在明显的侵蚀—沉积分区,且随坡度增加,坡顶、坡中侵蚀更为明显。而针对陕北丘陵沟壑区坡面侵蚀—沉积过程的变化规律研究则较为缺乏,需加强该方面的研究。因此,本研究利用室内人工模拟降雨,结合陕北黄土丘陵沟壑区坡耕地特点,研究不同坡长、坡度对当地裸露坡

面侵蚀、沉积过程的影响,探讨不同坡长和坡度组合条件下坡面降雨产流、产沙过程动态规律,分析各影响因素作用下黄土坡面侵蚀沉积过程特征,促进对坡面侵蚀机理的深入认识,从而为陕北黄土丘陵沟壑区水土保持措施的合理布设以及水土流失防治规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究于 2018 年 5 月至 7 月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实验室人工降雨大厅采用室内模拟降雨试验方法进行。试验降雨方式采用下喷式降雨系统,雨强可通过喷嘴大小和压强进行调节。降雨高度为 18 m,能够保证所有雨滴均达到最终速度,降雨覆盖面积为 27 m×18 m。降雨系统将水喷射至空中,受空气阻力作用水流被破碎形成不同大小的雨滴,降落至地表,产生的雨滴有大有小,与天然降雨下的雨滴比较相似^[14],能够满足黄土区不同侵蚀模拟要求。试验用土取自于陕西省安塞县耕地表层的黄绵土。安塞地区属于典型的黄土丘陵沟壑区,地处陕北黄土高原腹地,地貌特征复杂,草原分布广,土地利用类型多样。该区农业以种植业和畜牧业为主,水土流失情况严重。研究区土壤土层深厚,土壤质地组成以粉沙为主,缺乏有机质和黏粒物质,胶结能力差,遇水易分散崩解,抗蚀能力差^[15]。利用马尔文激光粒度仪测定土壤机械组成,试验土壤质地按国际制的土壤粒级划分结果属于砂壤土,有机质含量较低(表 1)。

表 1 试验土壤的颗粒机械组成

土壤质地 类型	粒径组成/%					有机质含量/ (g·kg ⁻¹)
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.25 mm	≥0.25 mm	
砂壤土	8.73	14.35	40.87	36.01	0.05	1.84

1.2 试验设计

试验前将所用土样自然风干,随后过 10 mm 筛,以便除去杂草和石块。装填试验土壤之前,先在试验槽的底部填入约 10 cm 厚的细沙,细沙上面覆盖透水的细纱布,保持试验土层的透水状况接近于天然坡面。随后装填试验土壤,采用分层填土法装填,边填土边使用工具压实,每次装土 5 cm,共填 6 层,每层表面用平尺拉毛,总共填土厚度约为 30 cm。为降低土槽边壁效应的影响,装土时在隔板处尽量压实,装土结束后,用平尺刮平土壤表面,形成疏松层,代表降雨前坡面已经形成大量可搬运物质。本次试验采用环刀法测定坡面表层土壤容重,土槽填土容重控制在 1.25~1.35 g/cm³ 左右^[16]。本试验使用规格 5 m×1.0 m×0.5 m 和 10 m×1.5 m×0.5 m 固定式可调坡钢制土槽;降雨过程中坡面存在侵蚀—搬运—沉积作用,而沉积现象的发生随坡度增加而减弱,根据缓坡分布范围,坡度分别选取 5°,10°,15°。通过对黄土丘陵沟壑区 1987 年以来的极端暴雨资料的统计分析,发现 1 h 最大降雨主要分布在 50~79 mm,其中小于 68 mm 的居多^[17],鉴于此,在 60 mm/h 降雨强度下进行降雨试验,每个试验方案均重复降雨 2 次,总共模拟降雨试验场次为 12 次。降雨历时 1 h,达到了天然暴雨的级别,文中分析数据均取 2 次降雨试验的平均值。

1.3 观测项目

观测坡面产流全过程,坡面产流后在出水口收集泥沙和径流样品,采样间隔为 1 min。采用烘干法确定含沙量,将采集的泥沙样进行体积量测,进行烘干称重,计算得到含沙量。采用自制大量桶测定径流量,为 1 min 内的产流量,加上泥沙样累计值,得到总径流量。自制大量桶量测精确度为 0.5 L,称重精确度为 0.01 g,含沙量测定的小样瓶体积是恒定的,从而含沙量的精确度为 0.01 g/L。总径流量乘以该时段含沙量即为该时段产沙量,产沙量的精确度为 0.01 g。

2 结果与分析

2.1 坡面侵蚀阶段划分及产沙特征

含沙量的变化与坡面径流输沙能力密切相关,指出该含沙量与径流的变化关系可以作为划分土壤侵蚀限制条件的依据,本研究依据和继军等^[18]划分土

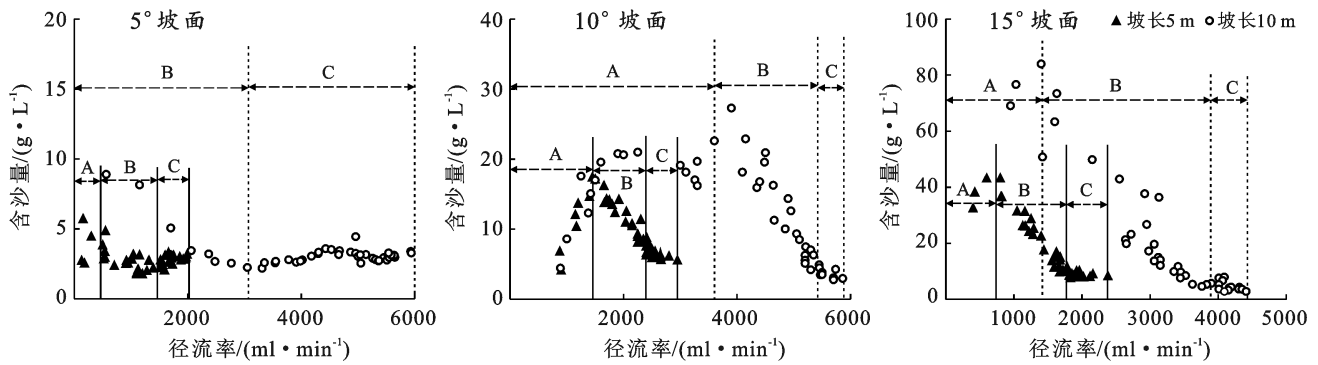
壤侵蚀限制条件方法,同样把坡面侵蚀过程依次划分:输沙能力限制阶段(A)、剥蚀能力限制阶段 I (B) 和剥蚀能力限制阶段 II (C) 3 个阶段(图 1)。在 A 阶段,随着侵蚀速率的增加,径流相对于输沙越来越少,此阶段含沙量快速增加,且此阶段的含沙量随坡度增加而增加;当坡度由 5°增加到 10°和 15°时,5 m 坡长坡面的平均含沙量从 5.64 g/L 分别增加到 6.25 和 38.48 g/L,10 m 坡长坡面的平均含沙量从 4.29 g/L,分别增加到 15.99 和 76.58 g/L。总体来看,含沙量随坡长的增加而明显增加,10°和 15°坡度下,10 m 坡长在此阶段的含沙量分别是 5 m 坡长的 2.56 和 1.99 倍。相关研究表明,相同试验条件下,坡面可搬运物质充足时的径流输沙能力比径流通过自身剥离土壤颗粒达到的输沙能力高 2 倍左右。本研究与其研究结果一致,该现象进一步说明上述关于侵蚀限制阶段划分的合理性。在 B 阶段和 C 阶段,含沙量呈现出快速下降最后接近稳定状态的趋势,说明侵蚀过程存在土壤剥离和搬运的限制条件,含沙量并不会一直增加或减少,泥沙的分离和搬运会达到相对平衡的状态,而此时是沉积可能发生的时间段,土壤表面和径流间发生频繁的物质交换,促进坡面泥沙沉积^[19]。在 5°坡面下,5,10 m 坡长坡面的剥蚀能力限制阶段 II(C)的持续时间最长,且两者达到平衡状态的含沙量相差不大,该阶段的含沙量分别为 2.74~3.01 g/L,2.95~3.37 g/L;在 10°坡面下,5,10 m 坡长坡面剥蚀能力限制阶段 II 持续时间均为 8 min 左右,平衡状态的含沙量分别为 5.31~6.07 g/L,2.76~3.81 g/L;在 15°坡面下,5,10 m 坡长坡面剥蚀能力限制阶段 II 的含沙量分别为 7.68~8.38 g/L,2.81~3.71 g/L;10°,15°坡面下,10 m 坡长达到平衡状态的含沙量均小于 5 m 坡面。

2.2 坡面土壤发生侵蚀—沉积特征

由图 2 可知,在降雨强度为 60 mm/h,坡度为 5°,10°,15°条件下,10 m 坡长坡面的总侵蚀量均明显高于 5 m 坡面。在该条件下表明,随坡长增加,5 m,10 m 坡面整体均呈侵蚀状态。通过分析图 2 中单位面积侵蚀量变化趋势可知,5 m 坡长坡面的单位面积侵蚀量分别为 28.55,166.82 和 198.74 g/(min·m²),均大于 10 m 坡面单位面积侵蚀量[25.57,141.49 和 160.68 g/(min·m²)],即同一坡度下单位面积侵蚀量随坡长的增加而减少,且 5 m 坡长坡面单位面积侵蚀

量是 10 m 坡面的 1.16~1.48 倍。说明在本研究设置的坡度、降雨强度条件下,在 5—10 m 坡段中存在明

显的沉积过程,该坡段的侵蚀量明显减少,导致 10 m 整体的单位面积侵蚀量小于 5 m 坡长坡面。



注:实竖线为 5 m 坡长不同侵蚀限制阶段分界线;虚竖线为 10 m 坡长不同侵蚀限制阶段分界线

图 1 不同坡度条件下坡面含沙量与径流率的关系

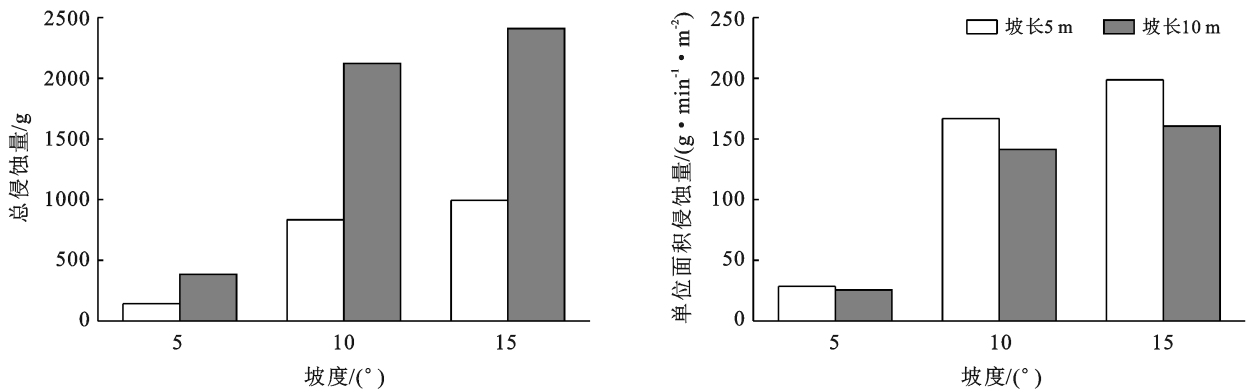


图 2 不同降雨和坡度条件下 5 和 10 m 坡长坡面总侵蚀量和单位面积侵蚀量变化

2.3 坡面侵蚀—沉积随降雨过程的变化

当前研究中主要是通过试验观测土壤坡面总体侵蚀特征进而分析坡面土壤的侵蚀过程,忽略了土壤坡面沿程的侵蚀—沉积过程。本研究在此基础上,将 5 m 坡长坡面上的土壤侵蚀观测结果作为 10 m 坡长坡面上 0—5 m 坡段的土壤侵蚀特征,并且在相同坡度下,将 10 和 5 m 坡长坡面土壤侵蚀观测结果相减的结果作为 5—10 m 坡段的相应坡度下的土壤侵蚀状况,以此方法进行坡面土壤侵蚀—沉积过程的分析研究。将不同坡度条件下,0—5,0—10,5—10 m 坡段侵蚀速率随降雨过程变化的结果绘制为图 3。由图 3 可以直观地反映侵蚀泥沙沿程输送的特征,整个侵蚀过程坡面侵蚀速率呈强弱交替变化。在 5°~15° 坡度范围内,0—5 m 坡段的平均侵蚀速率为 0.65,3.61,4.32 g/(m²·min),0—10 m 坡段坡面的平均侵蚀速率为 0.57,2.91,3.20 g/(m²·min),5—10 m 坡段的平均侵蚀速率明显小于 0—5 m 坡段坡面。在 10°,15° 坡度条件下,0—5,0—10,5—10 m 坡段侵蚀速率随降雨历时的变化趋势基本一致,土壤侵

蚀速率随降雨过程呈明显的波动变化,但总体变化呈增加—降低—增加—降低—最终趋于稳定的趋势;在降雨开始 35 min 左右时间内,侵蚀速率波动变化幅度较大,整个降雨过程侵蚀速率出现正负值交替变化,表明降雨过程中侵蚀过程与沉积过程并存。降雨开始 25 min 左右时间内,侵蚀速率以上升趋势为主,25~33 min 左右呈下降上升再下降的波动趋势,10 min 以后侵蚀速率变化趋于稳定。至于净侵蚀过程主要发生的时间在达到侵蚀速率峰值前后一段时间内,当坡度由 10° 增加到 15° 时,达到侵蚀速率峰值的时间缩短,相应侵蚀速率也增大,且 0—10 m 坡段坡面的侵蚀速率峰值均大于相应坡度下 0—5 m 坡段的侵蚀速率峰值,表明该时间段内 5—10 m 坡段以侵蚀过程为主。在坡面坡度为 5° 坡度时,由于 0—5 m,0—10 m 坡段坡面含沙量达到平衡状态持续时间较长,且整个降雨过程的含沙量变化差异不大,因此 0—5,0—10 m 坡段坡面的侵蚀速率变化相对平缓,侵蚀速率随降雨历时增加而稳步增加,均没有出现明显的减少的趋势。

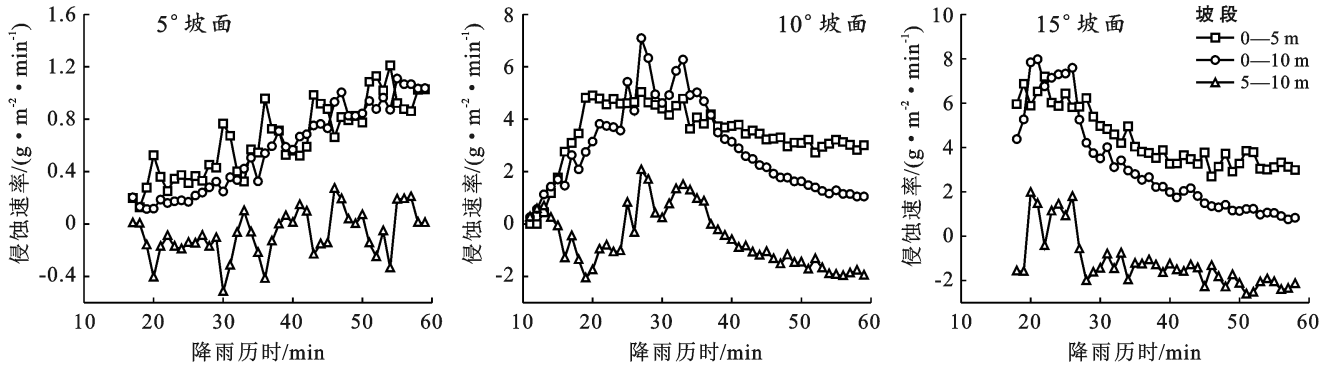


图3 不同坡度条件下侵蚀速率随降雨过程的变化

不同坡度下,不同坡段坡面的侵蚀速率随降雨过程的变化波动较大,1 min 的侵蚀速率与降雨时间的关系图(图4)。由图4可知,0—5,0—10 m 坡段坡面的累计单位面积侵蚀量随降雨历时增加,且在5°,15°坡度下,0—5 m 坡段的累计单位面积侵蚀量均小于0—10 m 坡段坡面,再次表明完整的降雨过程中5—10 m 坡段出现沉积现象。且随着降雨历时的延

长,5—10 m 坡段坡面的沉积速率逐渐增加;相同降雨条件下,5—10 m 坡段的沉积速率随着坡度的增加而增加。在10°坡度条件下,在31~43 min 时间段内出现0—10 m 坡段坡面单位面积侵蚀量大于0—5 m 坡段,主要原因是在该试验条件下,0—10 m 坡面出现跌坎儿,由于其没有进一步发育,侵蚀速率下降,使得出现0—5 m 坡段的累计单位面积侵蚀量再次大于0—10 m 坡段坡面的现象。

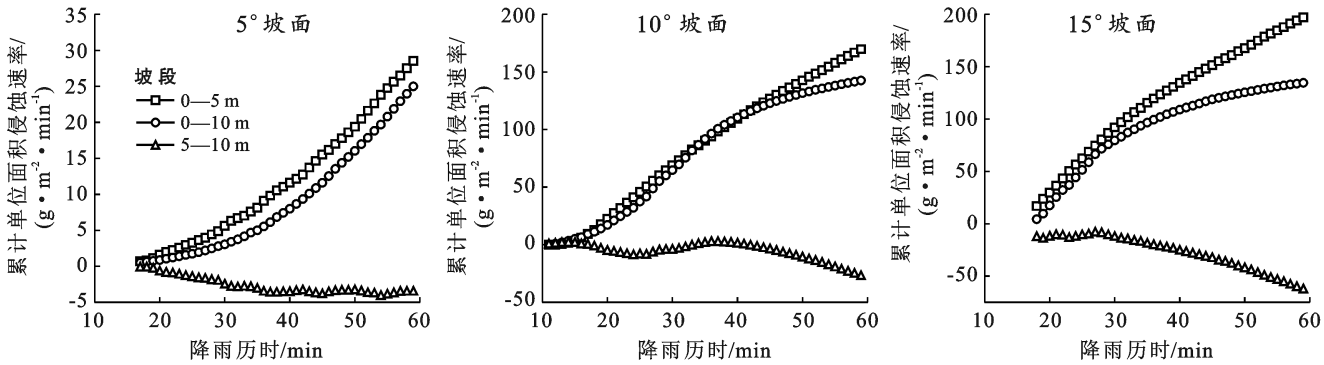


图4 不同坡度坡面,各坡段累计单位面积侵蚀速率随降雨历时的变化

3 讨论

3.1 坡面侵蚀—沉积特征

研究表明,相同下垫面在不同坡度和坡长下会表现出不同的坡面侵蚀规律,在5,10 m 坡面土壤总侵蚀量均随着坡度的增加而增加,这与Shi等^[20]和继军等^[21]的结果一致;陡坡的径流剪切力远大于缓坡^[22]。安塞地区黄土细颗粒含量较多,黏结力较强,形成的团聚体抗冲强度较大,土壤剥离能力相对较小^[23]。但坡长增加,来自土壤表层的松散物质和降雨和径流分离的土壤直接增多;且细颗粒的沉降速度较低,土壤颗粒一旦被剥蚀,细颗粒比粗颗粒更容易带走^[24]。本研究设置的坡度、降雨强度条件下,通过分析图2中0—5 m 坡段的侵蚀速率大于0—10 坡段的侵蚀速率,使得5—10 m 坡段的侵蚀量明显减少,

导致10 m 整体的单位面积侵蚀量小于5 m 坡长坡面,说明在5—10 m 坡段中存在明显的沉积过程。谭贞学等^[12]同样利用室内模拟试验指出1.2 m 坡长坡面下坡位在发生侵蚀过程的同时存在沉积过程,表明黄土坡面单位面积土壤侵蚀量随坡长的增加呈明显的强弱交替变化,在各坡长坡面的侵蚀过程下坡位,存在临界侵蚀坡长^[25],且由于雨强、坡度、坡长等因素的影响,临界坡长是不断变化的。侵蚀与坡长关系中的临界坡长指在一定的坡面长度内,侵蚀量随坡长的增长而增长,当达到一定坡长时,产生质变的坡长或是土壤侵蚀模数随坡长增加由递增过渡为减少时的坡面长度^[26]。Quan等^[19]通过黄土坡面侵蚀—沉积空间分布图指出相同试验条件下,在4—5 m 坡段出现沉积现象,表明本试验条件下坡面发生沉积的临界坡长在4—5 m 以及5—10 m 范围内。在5°,15°坡

度下,在整个降雨过程中,0—5 m 坡段的累计单位面积侵蚀量均大于0—10 m 坡段坡面,侵蚀过程中一直伴有沉积现象;在10°坡面分别在降雨后15 min左右开始伴有沉积现象出现。

3.2 坡面侵蚀—沉积随降雨过程的变化

坡面径流从形成开始就具有能量,除去自身流动所需的能量外,坡面径流剥蚀土壤、水流携带搬运土壤都需要水流消耗自身能量才能够进行。研究表明,在10°坡度下,在降雨开始26~35 min时间段内,5—10 m 坡段为净侵蚀过程,主要发生在图1中的输沙能力限制阶段,0—10 m 坡段坡面的面积大于0—5 m 坡段坡面,使得10 m 坡长坡面在开始降雨试验之前,坡面存在可被坡面径流直接搬运的松散物质多于5 m 坡长坡面。其他阶段以侵蚀—沉积过程为主,此阶段0—10 m 坡段的平均含沙量均低于0—5 m 坡段。实际上5—10 m 坡段的侵蚀—沉积过程受到0—5 m 坡段坡面的汇流、泥沙运输以及自身产流的影响,径流泥沙从0—5 m 坡段输送到5—10 m 坡段时,水流速度增加的同时,自身的流动和携带搬运泥沙的能耗也相应增加,当坡面径流能量不足以支撑其继续剥蚀土壤,坡长的增加则不会使含沙量增加。随着坡度的增加,坡面产生的侵蚀强弱变化也就与径流率的大小并不完全相对应,因此,就必然5—10 m 坡段坡面侵蚀速率在整个降雨过程中上下波动,出现负值,出现沉积。在10°,15°坡度条件下,0—5,0—10 m 坡段在整个降雨过程侵蚀速率出现强弱交替变化,进而5—10 m 坡段侵蚀速率出现正负值交替变化,表明降雨过程中侵蚀过程与沉积过程并存。雷廷武等^[27]认为2—4 m 坡面的含沙量达到径流的输沙能力,且李君兰等^[28]认为超过2—4 m 以后,径流是剥蚀与沉积交替进行。坡面的泥沙和被携带搬运泥沙在水流作用下不断交换,从而使得5—10 m 坡段侵蚀和沉积过程交替进行。

坡面径流饱和含沙量与径流输沙含沙量的差值影响坡面侵蚀—沉积过程,随坡度增加,0—5 m 坡段侵蚀增强,该坡段向5—10 m 坡段的汇流输沙率增大,含沙量增高与饱和含沙量差值变小,导致5—10 m 坡段侵蚀量变小;径流含沙量超过饱和含沙量,5—10 m 坡段必然出现沉积。随着降雨历时的延长,5—10 m 坡段坡面的沉积速率逐渐增加;相同降雨条件下,5—10 m 坡段的沉积速率随着坡度的增加而增加。原因是随着降雨历时的增加,剥蚀能力限制阶段II(C)的0—5 m 坡段的含沙量均小于0—10 m 坡面。本研究主要讨论了不同坡度下,陕北黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀—沉积过程特征规律,对土壤质地、降雨强度等因子没有进

行深入分析,今后应加强对这些因子的研究,更有利于准确把握坡面土壤侵蚀沉积规律对有效控制坡面水土流失,提高黄土丘陵沟壑区水土保持效益。

4 结论

(1) 在输沙能力限制阶段(A)阶段,含沙量随坡长的增加而明显增加,10°和15°坡度下,10 m 坡长在此阶段的含沙量分别是5 m 坡长的2.56和1.99倍。

(2) 坡度为5°,10°,15°时,10 m 坡长坡面的总侵蚀量均明显高于5 m 坡面,且5,10 m 坡面整体均呈侵蚀状态。同一坡度下单位面积侵蚀量随坡长的增加而减少,在该坡度、降雨强度条件下,5—10 m 坡段中存在明显的沉积过程。

(3) 在5°~15°坡度范围内,在10°,15°坡度条件下,0—5,0—10,5—10 m 坡段的侵蚀速率随降雨过程总体呈增加—降低—增加—降低—最终趋于稳定的变化趋势;净侵蚀过程主要发生的时间在达到侵蚀速率峰值前后一段时间内,在降雨开始35 min左右时间内,在整个降雨过程侵蚀过程与沉积过程并存。

(4) 黄土坡面单位面积土壤侵蚀量随坡长的增加呈明显的强弱交替变化,存在临界侵蚀坡长;本试验条件下坡面发生沉积的临界坡长在4—5 m 以及5—10 m 范围内。在5°,15°坡度下,在整个降雨过程中,0—5 m 坡段的累计单位面积侵蚀量均大于0—10 m 坡段坡面,侵蚀过程中一直伴有沉积现象;在10°坡面分别在降雨后15 min左右开始伴有沉积现象出现。

[参 考 文 献]

- [1] Guo Zhong, Ma Meijing, Cai Chongfa, et al. Combined effects of simulated rainfall and overland flow on sediment and solute transport in hillslope erosion [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 1120-1132.
- [2] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 395-402.
- [3] Walling D E. Erosion and sediment yield research—some recent perspectives [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 100(1/3): 113-141.
- [4] 张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 151-158.
- [5] 郑粉莉, 高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 134-139.
- [6] 周凡凡, 高建恩, 王照润, 等. 坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 95-100.
- [7] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 572-581.
- [8] 王玲玲, 范东明, 王文龙, 等. 水蚀风蚀交错区不同坡长坡

- 面产流产沙过程[J].人民黄河,2016,38(3):72-75.
- [9] 姚璟,付兴涛.坡长对离石黄土坡面径流含沙量影响的模拟降雨研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(3):493-501.
- [10] 王小康,谷举,刘刚,师宏强.横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀—沉积周期规律的影响[J/OL].土壤学报,1-13 [2022-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210730.1201.002.html>.
- [11] Huang Jun, Wu Pute, Zhao Xining. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments [J]. Catena, 2013,104:93-102.
- [12] 谭贞学,王占礼,马春艳,等.黄土坡面下坡位土壤侵蚀过程的模拟试验[J].中国水土保持科学,2009,7(2):12-17,28.
- [13] 徐振剑,权鑫,史红伟,等.黄土坡面侵蚀过程与侵蚀—沉积空间分布特征[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2021,49(6):98-105.
- [14] 盛贺伟,孙莉英,蔡强国.黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):679-688.
- [15] 李玥.黄土丘陵区退耕与农业生态经济社会系统协同发展研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [16] 权鑫,史红伟,蔡强国,等.室内模拟降雨情形下黄土坡面沉降程度的试验研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2021,49(2):98-106.
- [17] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.
- [18] 和继军,王硕,蔡强国,等.黄土缓坡片蚀过程及其水力参数适宜性试验研究[J].水科学进展,2021,32(1):97-108.
- [19] Quan Xin, He Jijun, Cai Qiangguo, et al. Soil erosion and deposition characteristics of slope surfaces for two loess soils using indoor simulated rainfall experiment [J]. Soil and Tillage Research, 2020,204:104714.
- [20] Shi Zhihua, Fang Nufang, Wu Fengzhi, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012,454/455(1),123-130.
- [21] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [22] Wang Li, Shi Zhihua. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(3):917-929.
- [23] 贾宝真,钟德钰,张科利.基于动理学理论的坡面水土分离能力研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(3):591-605.
- [24] Sun Liying, Zhou J L, Cai Qiangguo, et al. Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(4):520-531.
- [25] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [26] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2886-2894.
- [27] 雷廷武, Nearing M A.侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J].水利学报,2000(11):49-54.
- [28] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.