

暴雨条件下植被对黄土沟坡重力侵蚀的影响

赵兴阳¹, 徐向舟¹, 蒋云钟², 高航¹, 张红武³

(1.大连理工大学水利工程学院,辽宁 大连 116024; 2.中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038; 3.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 研究植被对重力侵蚀的作用机理可为黄土高原水土保持规划提供依据。通过对坡度 70°、坡高 1.5 m 的黄土沟坡裸地模型和根土复合模型(简称根土模型)的降雨模拟试验,对比分析暴雨条件下植被对沟坡重力侵蚀的影响。结果表明:植被对沟坡重力侵蚀总量的影响不显著,根土模型 5 次降雨后次降雨重力侵蚀量平均值较裸地模型减小 12%。植被能够一定程度上促使沟坡雨后重力侵蚀的增长,根土模型雨后重力侵蚀总量占次降雨重力侵蚀总量的比例为 12%,而裸地模型相应的比例仅为 1%。沟坡植被对不同重力侵蚀的影响差异较大,相同下垫面地形条件下和同样的 5 次降雨后,根土模型发生的崩塌、滑坡、泥石流总量较裸地模型分别变化了-72%、220%、-69%。植被对沟坡重力侵蚀的作用是多方面因素综合的结果,植被根系的“加筋”固结作用促使重力侵蚀量减少,但植被的自重和促进渗透作用又可加剧重力侵蚀,植被根系的根劈作用也可能加剧滑坡的发生。在易于发生泥流的沟坡带,植被措施可作为水土保持工程措施的重要补充。研究结果可为重力侵蚀机理分析和治理规划提供参考。

关键词: 黄土沟坡; 重力侵蚀; 植被; 根土复合模型; 地貌仪

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0058-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.009

Effects of Vegetation for Gravity Erosion on the Loess Gully Sidewall Under the Intense Rainfalls

ZHAO Xingyang¹, XU Xiangzhou¹, JIANG Yunzhong², GAO Hang¹, ZHANG Hongwu³

(1.School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024;

2.Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;

3.State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: To study the mechanism of vegetation affecting gravity erosion may provide the theoretical basis for the design of soil and water conservation on the Loess Plateau, China. This study explore the effects of vegetation on the gravity erosion using the models of loess gully sidewall with the slope degree of 70° and height of 1.5 m under a series of rainfall simulations, in which vegetational and bare lands were used, respectively. The experimental results are shown as follows: (1) The influence of the vegetation on the total amount of gravity erosion might be ignored. The average amount of gravity erosion for each event of rainfall on the vegetational sidewall was only decreased by 12% compared with that on the bare sidewall. (2) The vegetation had a positive effect on the gravity erosion after rainfalls. The ratio of the gravity erosion volume after rainfalls to the total on the planted slope was almost 12%, while the ratio on the bare slope was only 1%. (3) The vegetation on the gully sidewall had different influences on various types of gravity erosion. Compared with those on the bare land, the average amounts of the avalanche and mudslide on the vegetated slope was decreased by 72% and 69%, respectively. In the meantime, the average amount of landslide in the vegetated slope was increased by 220% compared with that on the bare slope. (4) The effects of vegetation on gravity erosion were caused by several factors. The plant roots might reinforce the soil and reduce the amount of gravity erosion, but the self-gravity of the plant and increase of the permeability on the planted slope might aggravate the gravity erosion. In addition, the soil permeability was increased by the plant roots.

收稿日期:2019-07-08

资助项目:中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-201707);延安市重大科技项目(2016CGZH-14-03);国家自然科学基金项目(51879032);国家重点研发计划项目(2016YFC0402504)

第一作者:赵兴阳(1992-),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:zhaoxingyang@mail.dlut.edu.cn

通信作者:徐向舟(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与可持续发展研究。E-mail:xz xu@dlut.edu.cn

which could intensify the landslides. As a result, the vegetation construction was preferable for the sidewall vulnerable to mudslide. The results might be referred to analyze the mechanism of mass failure and design the control of gravity erosion.

Keywords: loess gully sidewall; gravity erosion; vegetation; root-soil composite experiment; topography meter

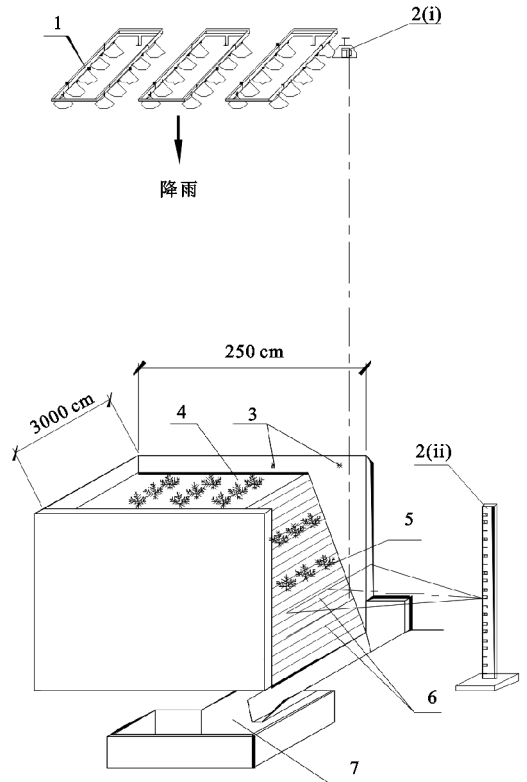
重力侵蚀是一种以重力为主引起的土壤侵蚀形式,是指坡面岩体、土体在重力作用下,失去平衡而发生位移的过程,包括滑坡、崩塌、泥石流等类型^[1]。滑坡是崩滑体在重力作用下沿一定的破坏面整体或局部保持岩土体结构而向下活动的过程和现象。滑坡的特点是滑块整体移动,即具有“原岩性”。崩塌是指由于重力的作用,崩滑体在斜坡面上运动的过程中发生倾倒是和碎裂的现象。泥石流是指具有明显流动特征的斜坡土体在重力作用下向下运移的现象,泥石流与崩塌、滑坡的区别在于其表面有明显的流动特征。黄土高原独特的气候及地形环境条件下,降雨、地形、植被等是影响重力侵蚀发生的主要因素。降雨是重力侵蚀的重要诱发因素,大多数重力侵蚀都是降雨过程中或降雨结束不久后发生。根据我国气象部门的规定,12 h 累计雨量为 30~69.9 mm,或 24 h 累计雨量为 50~99.9 mm 的降雨为暴雨^[2]。尤其在黄土高原地区,严重的水土流失主要是暴雨、大暴雨等强降雨引起的。植被对重力侵蚀的影响是复杂、多方面的。一方面,根系对土体的加固效应能够遏制面状水土流失及浅层崩滑;另一方面,当根系加固深度远小于深层滑坡的滑面埋深时,植被根系与土壤形成的大孔隙系统则会促进重力侵蚀的产生^[3]。

坡度等级受地质条件、坡性等因子的影响,具有一定的规律性。在常规立地分类系统中,坡度等级分为缓坡($<15^\circ$)、斜坡($15^\circ\sim 25^\circ$)、陡坡($25^\circ\sim 35^\circ$)、急坡($35^\circ\sim 55^\circ$)和悬坡($55^\circ\sim 90^\circ$)。根据黄土丘陵沟壑区小流域地貌特征,可将小流域分为坡面、沟坡、沟面 3 个部分,其中沟坡位于沟缘线以下坡脚线以上^[4]。沟坡的特点在于坡陡,坡度大部分在 40° 以上。沟坡部分由于坡度大、植被稀疏,是重力侵蚀发生的主要坡段。本研究通过对特定坡度和坡高条件下黄土沟坡裸地模型和根土模型降雨模拟试验,对比分析暴雨条件下植被对沟坡重力侵蚀的影响,以期对黄土高原水土保持规划提供科学依据。

1 材料与方法

沟坡重力侵蚀过程模拟试验于 2016 年 8—10 月在位于北京市顺义区的清华大学黄河研究中心试验基地进行,试验装置包括沟坡模型、降雨模拟装置及地貌观测装置 3 部分,见图 1。裸地模型试验和根土模型试验在同一试验槽中进行,2 组模型的下垫面地形、降雨条件完全一致,但后者在黄土沟坡的缓坡面

和沟坡面上种植了植被。



注:1 为降雨模拟器;2 为地貌仪((i)为带瞄准器的摄像机;(ii)为主机);3 为控制点;4 为模型坡面;5 为植被;6 为等距水平投影;7 为集流池。

图 1 沟坡重力侵蚀过程试验布置示意

根据黄土沟坡的地貌特征设计概化坡面,下垫面的上部缓坡坡度为 3° ,下部沟坡坡度为 70° ,模型的平面投影长 300 cm、宽 250 cm。试验黄土采用物理、化学性质与原型黄土接近的李各庄基地附近黄土^[5]。经率定,该黄土的干土体积质量为 $1.56 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。试验前,土样先经过 1 cm 孔径的筛,除去土样中的杂草、碎石和大颗粒,下垫面地形采用水平分层填土、手工拍实的方法构筑。根土模型是在裸地沟坡模型上,埋植黄土高原地区典型植被。以黄土高原沟坡段常见植物棣棠为例,研究植被对沟坡重力侵蚀的影响。试验用棣棠取自试验基地附近苗圃。植被单株平均株高 42 cm、平均冠幅 31 cm,根系平均埋深 16 cm。植被分别布置于缓坡和沟坡上,其中沟坡上布置 2 排,其间距 53 cm,且第 1 排距缓坡与沟坡交界处 53 cm,每排埋设 3 棵,单颗间距 100 cm;缓坡上布置 3 排植被,第 1 排植被距缓坡与沟坡交界处 35 cm,随后每间隔 60 cm 布置 1 排,每排埋设 3 棵,单颗间距 100 cm。

采用大连理工大学研制的 SX2009 微喷头组合下喷

式降雨器进行模拟降雨。模拟降雨的均匀度约为 80%。每组地形进行 5 场降雨, 每场降雨后在前次侵蚀地形的基础上继续降雨, 各场降雨间隔约 12 h。每场降雨的降雨强度为 0.8 mm/min, 降雨历时为 60 min, 即单次降雨量为 48 mm。降雨过程中下垫面含水量采用 RR-1008 水分自动监测仪, 每隔 30 s 自动采集 1 次, 监测仪的 5 个传感器探头自上而下埋设于模型中, 各传感器之间的垂直距离与位于最上方的传感器至梁坡坡面的垂直距离相等。采用本文作者自主设计的地貌仪实时观测沟坡地形的动态变化, 并定量评价降雨过程中及雨后 20 min 内历次重力侵蚀量。地貌仪中的激光一字仪与摄像机配合, 可获取坡面的等值线图; 然后在 GIS 软件中赋值形成三维立体图, 进而可提供坡体的体积、投影面积和各点坐标等参数。重力侵蚀发生前、后瞬间坡体的体积差, 就是该次重力侵蚀量。地貌仪测量的体积相对误差可控制在 $\pm 10\%$ 以内^[6-7]。本研究中统计单次崩滑量为 300 cm³ 以上的重力侵蚀事件。采用人工观测和地貌仪监测相结合的判断重力侵蚀类型。试验人员在降雨过程中及雨后 20 min 内现场判断沟坡面上重力侵蚀的类型、发生时间、发生的地点(沟坡面上的网格位置); 降雨试验后, 根据地貌仪录像, 对上述人工现场判断的重力侵蚀类型进行校核。

2 结果与分析

2.1 植被对次降雨重力侵蚀总量的影响

根土模型和裸地模型降雨过程中及雨后 20 min 的重力侵蚀量见图 2。在侵蚀量最大的第 2 次降雨中, 裸地模型和根土模型的重力侵蚀量分别为 472.4×10^3 cm³, 361.5×10^3 cm³, 裸地模型重力侵蚀量较大; 但在侵蚀量较大的第 3 次降雨中, 裸地模型和根土模型的侵蚀量却分别为 4.0×10^3 cm³, 133.9×10^3 cm³, 根土模型重力侵蚀量更大。总体来看, 5 场降雨后, 裸地模型和根土模型降雨过程中及雨后 20 min 的次降雨重力侵蚀量总量分别为 626.5×10^3 cm³, 552.6×10^3 cm³, 根土模型比裸地模型小 12%。考虑到试验中模拟和观测误差, 上述差异并不显著。

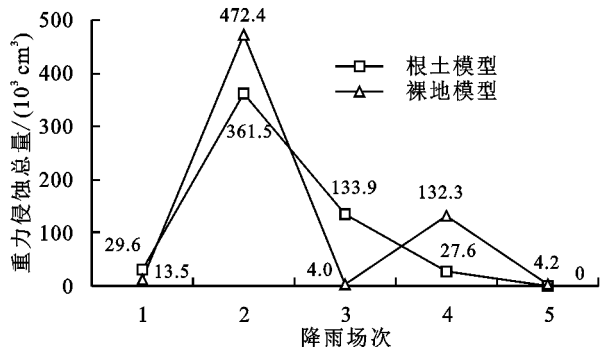


图 2 历次降雨的重力侵蚀总量

如前所述: 一方面, 植被可能作为保护屏障, 保护

土壤免受重力侵蚀或其他土壤侵蚀的影响; 另一方面, 植被可能会加剧重力侵蚀^[8]。根土模型缓坡上栽植的植被有效地改善了土壤的水文效应, 提高了土壤入渗性能^[9], 并且植被对缓坡的坡面流有一定的阻滞作用^[10], 这也增加了雨水下渗, 减缓了坡面向沟坡的流量。如果陡坡上栽植的植物根系深入土层内部, 则能够增加抗剪强度, 稳定边坡, 减小重力侵蚀^[11-12]。但是, 当植被根系长度没有到达重力侵蚀的滑动面的深度时, 陡坡上植被的自重则会加剧重力侵蚀^[13]。在试验中发现, 陡坡上的植被往往随较大规模的崩滑体一起滑落到陡坡底部。本研究表明, 植被布置对沟坡重力侵蚀的抑制或促进作用并不显著, 说明在本试验条件下, 植被对重力侵蚀的上述正、负 2 种作用基本接近。

2.2 植被对不同类型重力侵蚀的影响

本研究的重力侵蚀过程模拟试验中发生了滑坡、崩塌和泥石流等 3 种重力侵蚀现象。历次降雨中, 裸地与植被条件下的各类重力侵蚀量次降雨总量和最大值见表 1。可以看出, 5 次降雨后, 根土模型崩塌、滑坡、泥石流的重力侵蚀总量分别为 138.2×10^3 cm³, 411.2×10^3 cm³, 3.1×10^3 cm³, 较裸地模型分别变化了 -72%, 220%, -69%。从上述试验结果可以看出, 在本试验条件下, 植物措施对崩塌和泥石流有一定的控制作用, 而对滑坡却有一定的正向作用。根土模型与裸地模型崩塌量和滑坡量的峰值均出现在第 2 次降雨过程中, 其中根土模型崩塌量峰值为 26.9×10^3 cm³, 较裸地模型减小 88%; 根土模型滑坡量峰值为 97.8×10^3 cm³, 较裸地模型增大 45%。通过历次降雨中, 根土模型与裸地模型中各类重力侵蚀的次降雨侵蚀总量对比(图 3)发现。植被对泥石流和崩塌抑制作用明显。裸地沟坡模型和根土复合模型各类重力侵蚀量相差最大的降雨场次在第 1 次和第 4 次降雨中, 裸地模型的泥流量分别为 3.2×10^3 cm³, 4.4×10^3 cm³, 而根土模型的相应泥流量仅为 0, 1.3×10^3 cm³; 第 2 次降雨中, 裸地模型的崩塌量为 398.7×10^3 cm³, 而根土模型的相应崩塌量仅为 66.2×10^3 cm³。然而植被对滑坡有显著的促进作用, 5 次降雨中, 根土模型和裸地模型, 在滑坡侵蚀量相差最大的第 2 次降雨中, 裸地模型的滑坡量为 73.1×10^3 cm³, 而根土模型却达 295.3×10^3 cm³。

植被根系通过剪切带加固土壤, 增加土壤的抗剪强度, 对水力侵蚀和泥石流有显著的控制作用。本研究中, 相对裸地模型, 根土模型的次降雨泥石流侵蚀总量减小 69%, 次降雨最大泥石流侵蚀量减小 78%。因此, 在易于发生泥石流的沟坡带, 可用植被措施作为水土保持工程措施的重要补充。此外, 除作为一般的生态基础结构外, 植被还将会促进生态系统结构和功能的恢

复;另一方面,已有现场调查成果证实,林木根系对垂直节理发育的黄土土体的崩塌有促进作用。但本试

验中,植被对崩塌有一定的控制作用,这可能是由于模型试验是重塑土、没有垂直节理造成的。

表 1 5 次降雨后根土模型与裸地模型中各类重力侵蚀量的变化

重力侵蚀类型	重力侵蚀量总量			次降雨重力侵蚀量最大值		
	根土模型/ (10^3 cm^3)	裸地模型/ (10^3 cm^3)	根土模型较 裸地模型变化/%	根土模型/ (10^3 cm^3)	裸地模型/ (10^3 cm^3)	根土模型较 裸地模型变化/%
崩塌	138.2	488.0	-72	26.9	224.1	-88
滑坡	411.2	128.3	220	97.8	67.5	45
泥石流	3.1	10.2	-69	0.7	3.0	-78

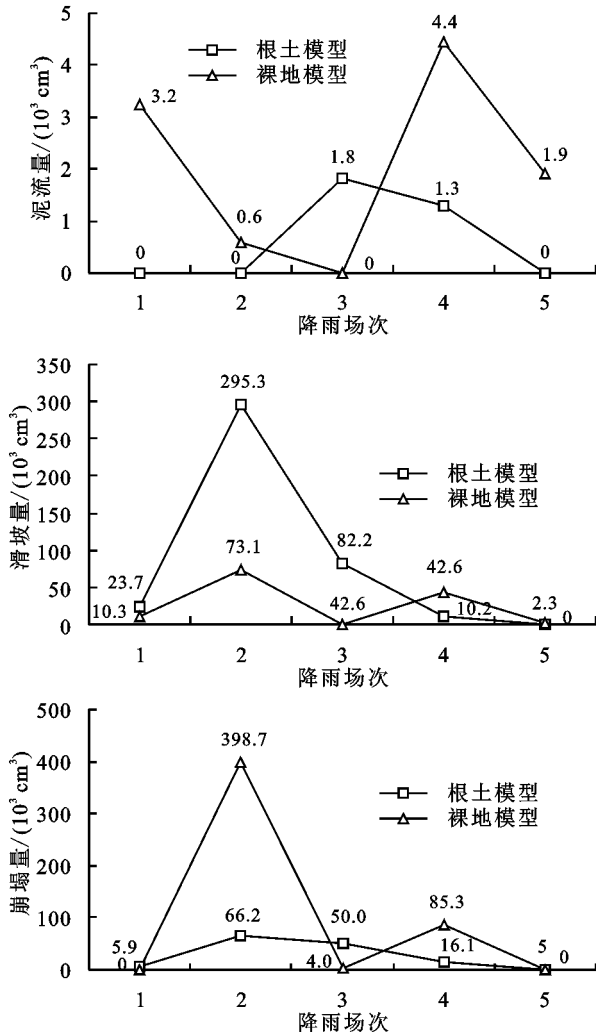


图 3 历次降雨中根土模型与裸地模型中各类重力侵蚀的次降雨侵蚀总量对比

根土模型的滑坡量大于裸地模型,其主要原因是植物根系的根劈作用。植被根系增加了沟坡土体的孔隙度和渗透性^[14],在降雨的条件下,土壤含水量增加导致抗剪强度降低,当土体下滑力大于抗滑力时,则会引发黄土滑坡^[15]。自然界的根系长度多生长于土体 2 m 范围内,对于深层滑坡,大部分植被根系并不能扎根到潜在滑动面以下,所以植被对边坡深层加固影响较弱^[12,16]。对其他地区的现场调查也得出类似结论,如对土耳其黑海西部地区发生的滑坡进行调查发现,该滑坡区域植被根系没有达到滑坡的破坏滑动面,植被增加了滑坡体的重量,对该地区山坡的稳

定反而产生了不利的影响^[13]。通过我国森林地区的遥感资料^[17]分析得知,植被覆盖率低和覆盖率高的地区都有可能发生滑坡,在同等地质环境条件下,当降水强度达到诱发滑坡的临界值时,植被会加剧滑坡的发生。通过现场调查对陕北富县“7·21”特大暴雨滑坡侵蚀灾害的研究^[18]也发现,当降水量阈值达到可诱发滑坡灾害发生时,植被可能会加重滑坡侵蚀的发生。

2.3 植被对沟坡雨后崩滑量的影响

重力侵蚀现象的发生具有滞后性的特点。试验中发现,降雨结束后 20 min 内,仍可能发生重力侵蚀事件。根土模型与裸地模型雨中和雨后重力侵蚀量的测定结果(表 2)可知,5 次降雨后,根土模型累计雨后重力侵蚀量占重力侵蚀总量的 12%,而裸地模型仅为 1%,前者比后者大 11%。根土模型雨后发生了 2 次重力侵蚀,其侵蚀量较大,在各自次降雨重力侵蚀总量中占据的比例分别 23%和 27%。而裸地模型雨后仅发生 1 次重力侵蚀,并且其侵蚀量较小,仅为裸地模型同场次降雨重力侵蚀总量的 3%,说明植被可能会加剧雨后重力侵蚀的发生。本试验中楝棠根系增加了土壤的孔隙率,提高了土壤的蓄水能力,降雨结束后,缓坡和陡坡上的雨水持续下渗,当饱和和土体的下滑力大于抗剪强度时,发生重力侵蚀。另外,植物的自重变化可能是导致雨后重力侵蚀的重要原因。降雨结束后约 10 min 时间内,沟坡表层的含水量接近饱和,抗剪强度接近最小值。在植物自重的拖拽下,仍有可能发生重力侵蚀。

2.4 植被对土壤含水量的影响

如本文 2.1 节所述,植被可以促进缓坡面上的水分下渗到土壤中,减少流向沟坡面的坡面流,进而影响重力侵蚀的发生。在降雨过程中,植被可以调节下渗到土壤中的降雨量。与裸地土壤相比,即使在植被种植的初始阶段,植被对地表水下渗也有着重要的影响。以往研究^[19]发现,植被的发育增加了坡面土壤的渗透性和坡面的糙率,增加了雨水下渗量,显著地减少了坡面径流。

本试验中沟坡模型和裸地模型第 5 次降雨的重力侵蚀量都很小,故只对比分析前 4 场次降雨过程中土壤含水量的变化。由 2 种模型缓坡面地表以下 15,45 cm

土层降雨前、后土壤含水量及雨后增幅(表 3)可知,根土模型缓坡面浅层地表(地面以下 15 cm)的含水量增幅低于裸地模型,平均值分别为 31%和 40%;但对于缓坡地表较深底层(地面以下 45 cm)的含水量,根土模型的增幅高于裸地模型。前 2 场降雨中根土模型缓坡地表以下 45 cm 的含水量的增幅均为 2%,说明前 2 场降雨中,雨水已经渗入到 45 cm 深度地层;而相应的裸地模型增幅为 0,也就是说在前 2 场降雨中,裸地模型雨水还没有

下渗到地表以下 45 cm 处。在第 3 场降雨中,根土模型缓坡地表以下 45 cm 的增幅高达 18%,而裸地模型仅为 1%,这说明在该场降雨中,雨水已经大幅渗透到根土模型较深层,而对于裸地模型,才刚刚下渗到该土层。总体来说,根土模型地表下 45 cm 地层历次降雨后含水量增幅的平均值为 8%,而裸地沟坡相应的增幅只有 1%,即植被根系有较好地促进雨水下渗的作用,从而影响重力侵蚀的发生。

表 2 雨中与雨后重力侵蚀量的对比

降雨场次	根土模型次降雨重力侵蚀量			裸地模型次降雨重力侵蚀量		
	雨中/ (10^3 cm^3)	雨后/ (10^3 cm^3)	雨后占总量 百分比/%	雨中/ (10^3 cm^3)	雨后/ (10^3 cm^3)	雨后占总量 百分比/%
1	29.6	0	0	13.5	0	0
2	279.0	82.5	23	472.4	0	0
3	97.9	36.0	27	4.0	0	0
4	27.6	0	0	128.6	3.7	3
5	0	0	0	4.2	0	0
平均	86.8	23.7	12	124.6	0.7	1

表 3 植被对土层下渗的影响

缓坡面地表 以下深度/cm	观测 时间	降雨 场次	根土模型		裸地模型	
			含水量 P/%	雨后含水量 增幅 δ /%	含水量 P/%	雨后含水量 增幅 δ /%
15	雨前	1	15.65		12.25	
		2	24.03		22.27	
		3	26.14		22.22	
		4	25.02		23.56	
	雨后	1	27.57	76	23.90	95
		2	27.60	15	28.16	26
		3	29.62	13	27.12	22
		4	29.74	19	27.61	17
	平均		31		40	
45	雨前	1	7.63		14.32	
		2	14.48		14.29	
		3	18.97		23.19	
		4	23.87		25.09	
	雨后	1	7.75	2	14.32	0
		2	14.76	2	14.32	0
		3	22.41	18	23.50	1
		4	25.91	9	25.93	3
	平均		8		1	

注: $\delta = (P_{\text{雨后}} - P_{\text{雨前}}) / P_{\text{雨前}} \times 100\%$

3 结论

(1) 植被对沟坡重力侵蚀总量的影响不显著。在本试验中,根土模型 5 次降雨后次降雨重力侵蚀量平均值仅较裸地模型减小 12%。

(2) 暴雨条件下黄土沟坡植被对不同重力侵蚀类型有不同的影响。在本试验中,相同下垫面地形条件下和同样的 5 次降雨后,根土模型发生崩塌、滑坡、泥流量总量较裸地模型变化了 -72%, 220%, -69%。

(3) 植被能够一定程度上促进沟坡雨后重力侵蚀的增长。本试验条件下,根土模型雨后重力侵蚀量占次降雨重力侵蚀总量的比例为 12%,而裸地模型相应的比例仅为 1%。

本研究是根据黄土沟坡典型灌木降雨模拟试验得出的初步结论。建议今后开展更多场景的裸地模型和根土模型对比试验,深入分析不同坡度和降雨强度条件下不同植被布设对沟坡重力侵蚀的影响,以克服试验误差和重力侵蚀随机性对研究结论准确性的影响。

参考文献:

- [1] Xu X, Liu Z, Wang W, et al. Which is more hazardous: Avalanche, landslide, or mudslide? [J]. Natural Hazards, 2015, 76(3): 1939-1945.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28592—2012 中华人民共和国国家标准—降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

- [3] Chirico G B, Preti F, Borga M, et al. Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 19 (19): 932-941.
- [4] 李小曼,王刚,李锐.基于 DEM 的沟缘线和坡脚线提取方法研究[J].水土保持通报,2008,28(1):69-72.
- [5] 徐向舟,张红武,许士国,等.建坝顺序对坝系拦沙效率影响的试验研究[J].北京林业大学学报,2009,31(1):139-144.
- [6] Xu X Z, Zhang H W, Wang W L, et al. Quantitative monitoring of gravity erosion using a novel 3D surface measuring technique: Validation and case study [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2):1927-1939.
- [7] 赵超,徐向舟,徐飞龙,等.实验地貌的动态观测装置[J].中国水土保持科学,2012,10(1):65-69.
- [8] Caviezel C, Hunziker M, Schaffner M, et al. Soil-vegetation interaction on slopes with bush encroachment in the central Alps - adapting slope stability measurements to shifting process domains [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(4):509-521.
- [9] 陈璟,杨宁.衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应[J].中国生态农业学报,2013,21(5):590-597.
- [10] 肖培青,姚文艺,李莉,等.植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J].泥沙研究,2013(3):1-5.
- [11] 赵玉娇,李华坦,刘昌义,等.植物根-土复合体剪切试验及其力学模型研究现状与展望[J].中国水土保持,2015(10):51-55.
- [12] 宋庆丰,黄小芸.植被护坡功能分析[J].路基工程,2010(1):104-106.
- [13] Ocakoglu F, Gokceoglu C, Ercanoglu M. Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey [J]. *Geomorphology*, 2002, 42(3):329-341.
- [14] Rengers F K, McGuire L A, Coe J A et al. The influence of vegetation on debris-flow initiation during extreme rainfall in the northern Colorado Front Range [J]. 2016, 44(10):823-826.
- [15] 王晓娅,焦姗.正城滑坡滑带土抗剪强度参数试验研究[J].矿业研究与开发,2018,38(10):47-51.
- [16] 姚成成.土质浅层边坡的草本植物防护加固效应分析[D].成都:成都理工大学,2017.
- [17] 魏丽,单九生,朱星球.植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析[J].气象与减灾研究,2006,29(1):29-33.
- [18] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系:以富县“7·21”特大暴雨为例[J].生态学报,2016,36(15):4635-4643.
- [19] 杨吉山,姚文艺,马三保,等.黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析[J].水土保持研究,2010,17(6):5-8.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 刘正恩.河北坝上生态退化现状、原因及对策措施[J].生态经济,2010(1):166-169.
- [2] 海春兴,付金生,王学萌.气候和人类活动对河北坝上丰宁县土壤风蚀沙化的影响[J].干旱区资源与环境,2003,17(1):69-76.
- [3] 王玫.河北坝上生态脆弱性及治理思路建议[J].经济论坛,2018(10):11-15.
- [4] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,2003.
- [5] 刘红,王卫,郝彦莉,等.基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价[J].水土保持通报,2016,36(2):12-17,349.
- [6] Chen Z, Mcbean E A. Estimation of desertification risk from soil erosion: A case study for Gansu Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2015, 30(8):1-15.
- [7] 王翔宇,原鹏飞,丁国栋,等.不同植被覆盖防治土壤风蚀对比研究[J].水土保持研究,2008,15(5):38-41.
- [8] Jia H, Gang W, Li G, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 153:112-119.
- [9] 尚润阳,祁有祥,赵廷宁,等.植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J].水土保持研究,2006,13(4):37-39.
- [10] 李昂,高天鹏,张鸣,等.西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):120-123.
- [11] 陈娟.荒漠草原人工柠条林防治土壤风蚀效应研究[D].银川:宁夏大学,2014.
- [12] 李玄姝,常春平,王仁德.河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):23-28.
- [13] 杨钦,郭中领,王仁德,等.河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
- [14] 夏梦婷,马礼.生态建设对坝上土壤风蚀治理的后效及其年际变化:以河北省张家口市康保牧场为例[J].河北师范大学学报(自然科学版),2015,39(3):268-272.
- [15] 梁利红,马礼.生态建设工程对坝上农用地土壤风蚀治理的后效:以河北省张家口市康保牧场为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2014,35(1):80-83.
- [16] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.北京市农田风蚀的野外观测研究[J].中国沙漠,2011,31(2):400-406.
- [17] 康玉梅,王仁德,常春平,等.河北坝上农田时空变化特征对土壤风蚀的影响[J].湖北农业科学,2012,51(23):5301-5306.
- [18] 王翔宇,赵名彦,丁国栋,等.天然灌草植被防治土壤风蚀机理[J].水土保持通报,2008,28(5):55-59.
- [19] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):1-7.
- [20] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.