

# 暴雨条件下植被对沟坡重力侵蚀速率和规模的影响

高 航<sup>1</sup>, 徐向舟<sup>1</sup>, 肖培青<sup>2</sup>, 张红武<sup>3</sup>

(1.大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003; 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:**为明确不同植被对沟坡重力侵蚀作用的机理,对 7 组坡高 1.5 m、缓坡 3°、沟坡 70°、不同植被覆盖的黄土沟坡模型进行降雨模拟试验。结果表明:(1) 在暴雨条件下,沟坡系统上植被对崩滑事件的发生有一定的延缓作用,裸地沟坡和植被覆盖沟坡第一次发生重力侵蚀平均时间分别为 30.6、35.1 min;(2) 植被会减少极大规模重力侵蚀的侵蚀量,增加小规模重力侵蚀的发生频率;(3) 短期内植被会增加重力侵蚀速率,长期会减缓重力侵蚀的发展。植被覆盖沟坡的最大重力侵蚀速率是裸地沟坡的 3 倍,但平均重力侵蚀速率小于相应的裸地沟坡,平均值分别为 4.13、5.11 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s);(4) 布置在沟缘线(缓坡和沟坡交界处)附近的植被对重力侵蚀强度及速率有一定的促进作用,沟缘线附近有植被覆盖的最大及平均重力侵蚀速率分别为无植被覆盖的 7.6、1.3 倍;(5) 连翘覆盖沟坡的重力侵蚀强度和速率要高于棣棠覆盖沟坡。因而,在离沟缘线较远处种植根茎较小的灌木并配合工程措施,有助于在植被恢复初期防止沟坡重力侵蚀发生。

**关键词:**降雨模拟; 重力侵蚀; 植被; 重力侵蚀速率; 黄土沟坡

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0017-08

## Effects of Vegetation on Scale and Rate of Gravity Erosion on the Gully Sidewall Under Heavy Rainfalls

GAO Hang<sup>1</sup>, XU Xiangzhou<sup>1</sup>, XIAO Peiqing<sup>2</sup>, ZHANG Hongwu<sup>3</sup>

(1.School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 3.State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to demonstrate the mechanism of the effects of the vegetation on the gravity erosion from the gully sidewall, a series of rainfall-simulation experiments were conducted on seven conceptual landforms with a height of 1.5 m, gentle upper slope of 3°, steep lower slope of 70°, and different coverage types of shrubs. The results showed that: (1) under heavy rain conditions, the vegetation coverage on the gully sidewall played a certain role in delaying the occurrence of mass failure; the average times for the first event of gravity erosion on bare-land models (BLMs) and shrubland models (SLMs) were 30.6 min and 35.1 min, respectively; (2) vegetation on the gully sidewall reduced the volume of the extremely large-scale gravity erosion and increased the frequency of small-scale erosion; (3) shrubs increased the rate of the gravity erosion in the short term, and slowed the down development of gravity erosion in the long term; the maximum rate of the gravity erosion on SLMs was 3 times of that on the BLMs, but the average rate of the gravity erosion on the SLMs was lower than that on the corresponding BLMs, of which the average values were 4.13, 5.11 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s), respectively; (4) the vegetation arranged near the junction of the steep slope and gentle slope (gully-edge line) had a certain promotion effect on the intensity and rate of gravity erosion; the maximum and average rates of the gravity erosion on the SLMs with the vegetation coverage near the gully edge line were 7.6 and 1.3 times of those under no vegetation, respectively; (5) the intensity and rate of gravity erosion on the SLMs with *Forsythia suspensa* coverage were higher than those with *Kerria japonica*

收稿日期:2020-10-19

修回日期:2020-11-20

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402504);国家自然科学基金面上项目(51879032);水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金(201903)

第一作者:高航(1986—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,研究方向为水土保持研究。E-mail:gaohang525@mail.dlut.edu.cn

通信作者:徐向舟(1969—),男,浙江龙游人,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

coverage. Hence, planting vegetation with smaller rhizomes far away from the gully-edge line together with structural practices can help to prevent the gravity erosion on the gully sidewall in the initial stage of vegetation restoration.

**Keywords:** rainfall simulation; gravity erosion; vegetation; gravity erosion rate; sidewall of loess gully

重力侵蚀是指斜坡上的岩土体在重力作用下发生变形、破坏、移动和堆积的过程,其形式包括崩塌、滑坡、泥石流等<sup>[1]</sup>。黄土高原是世界上重力侵蚀最严重的地区之一,重力侵蚀不仅破坏黄河流域的生态健康,还严重威胁当地人民的生命财产安全。随着退耕还林(草)及其他水土保持措施的实施<sup>[2]</sup>,黄土高原生态环境明显好转<sup>[3]</sup>。但仍需看到的是,目前黄土高原的水土流失仍旧严重。2019 年习近平总书记明确提出将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略。黄土高原作为黄河流域最重要的组成部分,对其生态保护修复也是未来研究的重点。

降雨是诱发重力侵蚀重要的外部因素之一。我国气象部门将 12 h 累计雨量 30~69.9 mm 或 24 h 累计雨量为 50~99.9 mm 定义为暴雨<sup>[4]</sup>。植被作为影响重力侵蚀的内部因素之一,它与重力侵蚀间复杂的相互作用是地表过程研究领域中的一个重要但尚未解决的问题<sup>[5]</sup>。杨吉山等<sup>[6]</sup>认为沟坡上的植被发育对小型重力侵蚀有比较明显的遏制作用。但孙尚海等<sup>[7]</sup>认为植被根系对黄土有分离的作用,所以治理程度较高后,重力侵蚀还是相当活跃。已有研究利用模型试验或者数学分析探讨了不同植被的护坡效应,以及不同植被的布置方式对沟坡侵蚀的影响<sup>[8-9]</sup>。如李国荣等<sup>[10]</sup>对寒旱黄土区不同灌木根系进行了力学性质的测量选出最佳护坡植被。张霞等<sup>[11]</sup>利用模型试验探讨了坡沟系统中草带的种植位置与侵蚀的关系。但上述研究对植被对沟坡的重力侵蚀的影响关注较少。笔者曾对植被影响下沟坡发生在雨中、雨后以及不同重力侵蚀类型的侵蚀量有初步探讨,但对不同植被及不同布置方式对沟坡重力侵蚀的作用没有进一步量化研究<sup>[12]</sup>。特别是在暴雨情况下,不同灌木以及不同布置方式影响下的沟坡重力侵蚀发生的时间、侵蚀强度、发展速率等规律仍需要更深入的探讨。

本研究以黄土高原沟壑区的沟坡系统为主要研究对象,采用室内降雨模拟的方法,通过设计不同灌木及其不同布设方式探讨植被对沟坡重力侵蚀发生时间、强度和侵蚀速率的影响,为揭示植被影响下沟坡重力侵蚀规律、确定黄土高原水土保持治理方针提供参考。

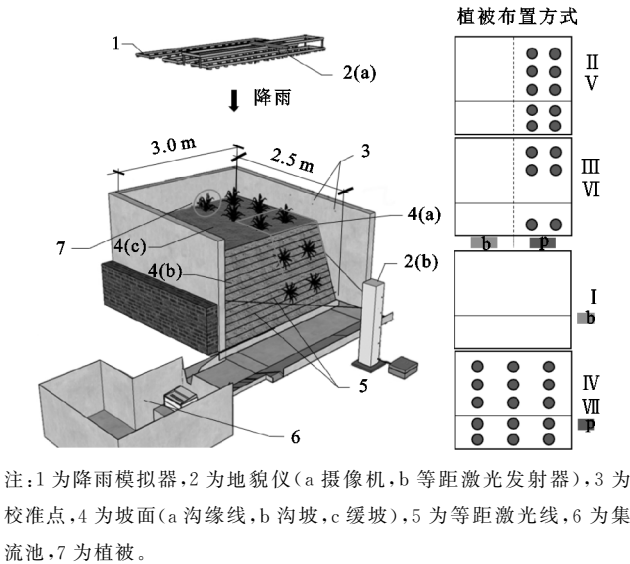
## 1 材料与方法

本试验于 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(116°48'E,40°11'N)进行。根据黄土高原沟壑区的地貌特征,设计沟坡坡度为 70°、缓坡坡度 3°的沟坡系统概化物理模型,模型长宽为 2.5 m×3.0 m,高为 1.5 m。采用的模型土壤是一种与原型土壤接近的李各庄试验场附近的黄土,粒径分布与黄土高原的午城黄土和马兰黄土粒径分布相似<sup>[13-14]</sup>。模型土壤的干容重为  $1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。采用经过 1 cm 孔隙筛网筛选的模型土壤,将筛选好的材料用手工拍实的方法分层构筑裸地沟坡模型。植被覆盖沟坡是在裸地沟坡建成后埋植植被构筑的,是一种大型的根土复合模型<sup>[15]</sup>。试验设计 4 种植被布置方式,选取黄土高原两种常见的乡土灌木——连翘 [*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl] 和 棣棠 [*Kerria japonica* (L.) DC] 进行试验,共计 7 组不同的下垫面类型(图 1 和表 1)。不同植被的根系特征按照径级进行分类,平均根茎及根面积比(Root area ratio, RAR)统计指标见表 2, RAR 被认为与土壤抗剪强度的大小有一定的正相关性<sup>[16]</sup>。其中连翘根系表现出更为成熟的根系,主根、侧根和须根完整,棣棠根系处于年幼期,侧根发育不完整。裸地沟坡模型和植被覆盖沟坡模型分别布置在同一个试验水槽中,放置几小时后,在严格控制地形和降雨条件下进行。根据黄土高原沟壑区的降雨特点,设计每场降雨总量为 48 mm 的暴雨,共 5 场,依次应用于每一个下垫面。降雨强度和降雨历时分别为 0.8 mm/min 和 60 min。相邻两次连续降雨间的时间间隔约为 12 h。在每次模拟降雨试验前,先利用小强度降雨湿润地形,以获得一致的土壤初始含水量。

本试验利用自行研发的 SX2009 微喷头式降雨模拟器模拟降雨过程。利用自行设计的地貌仪实时观测地形动态变化。采用地貌仪记录和人工现场判断相结合的方式记录了降雨过程中和降雨后 20 min 内的重力侵蚀发生时间和地点、重力侵蚀类型和崩滑面形式等。每个滑坡体的体积是通过比较每次侵蚀事件前后坡体的体积差得到的。其中对重力侵蚀量的观测误差在  $\pm 10\%$  以内<sup>[17]</sup>。利用 RR-1008 自动测湿监测系统,每 30 秒记录一次降雨过程中的土壤含水量。在上述 7 组模型中,Ⅳ,Ⅶ为全植被覆盖沟坡(p),Ⅰ为裸地沟坡模型(b),分别与Ⅳ,Ⅶ进行组间比较(图 1);Ⅱ,Ⅲ,Ⅴ,Ⅵ为混合模型,分成左右两侧

进行统计:一侧是植被覆盖沟坡(p),一侧是裸地沟坡(b)。在混合模型中进行植被覆盖率统计时,只计算模型一半的面积,以进行植被侧和裸地侧的对比。而且Ⅲ,Ⅵ中的植被覆盖沟坡(p)与对应同种植被的Ⅱ,Ⅴ中的植被覆盖沟坡(p)相比,在沟坡和缓坡的交界附近的位置缺少了 4 棵植被覆盖。对各组重力侵蚀发生时间、侵蚀量以及重力侵蚀速率进行统计。其中侵蚀速率分成平均重力侵蚀速率和瞬时重力侵蚀速率进行计算。计算公式为:



注:1 为降雨模拟器,2 为地貌仪(a 摄像机,b 等距激光发射器),3 为校准点,4 为坡面(a 沟缘线,b 沟坡,c 缓坡),5 为等距激光线,6 为集流池,7 为植被。

图 1 试验装置及植被布局

表 1 试验设计方案

组别	植被 高度/cm	冠幅/ cm	埋深/ cm	数量/ 株	植被 覆盖率/%	种类
I					0	裸地
II				10	40	连翘
III	50±3.4	49±6.3	16.3±0.3	6	24	
IV				15	30	
V				10	16	棣棠
VI	42±7.1	31±8.8	15.7±3.7	6	10	
VII				15	12	

表 2 植被根系特征

根茎/mm	连翘		棣棠	
	平均 根茎/mm	RAR/ %	平均 根茎/mm	RAR/ %
≥5	5.87	4.45	5.41	2.74
3~5	4.01	3.86		
1~3	1.66	2.91		
≤1	0.69	0.74	0.26	0.09

(1) 平均重力侵蚀速率

$$\bar{V}=\frac{G}{T \cdot A}$$

(2) 瞬时重力侵蚀速率

$$\bar{v}=\frac{g_{i+1}}{\left(t_{i+1}-t_i\right) \cdot A}$$
$$v=\max (\bar{v})$$

式中: $\bar{V}$  为每组试验的平均重力侵蚀速率 [ $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]; $G$  为每组模型的发生的重力侵蚀总量 ( $\text{cm}^3$ ); $T$  为总降雨时长,即 300 min; $A$  为模型面积 ( $\text{m}^2$ ); $\bar{v}$  为瞬时重力侵蚀速率 [ $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]; $g_{i+1}$  为第  $i+1$  次发生的重力侵蚀量 ( $\text{cm}^3$ ); $t_{i+1}$  为第  $i+1$  次发生重力侵蚀的时间(s); $t_i$  为第  $i$  次发生的重力侵蚀时间(s),其中  $i=1,2,3 \cdots$ ;  $v$  为该模型发生的最大重力侵蚀速率 [ $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]. 平均重力侵蚀率代表了在长时间降雨中,植被对重力侵蚀速率的影响,而瞬时重力侵蚀速率模拟了植被在短时间降雨中对重力侵蚀速率的影响。

2 结果与分析

2.1 植被对重力侵蚀发生时间及累积量的影响

7 组试验分别分成 5 组裸地和植被进行比较,各组重力侵蚀累积量随时间的变化见图 2。其中在混合模型Ⅱ,Ⅲ,Ⅴ,Ⅵ组的比较中,图 2A—D 中,裸地侧第一次发生重力侵蚀的时间总是早于植被侧,相差的时间分别为 23.7,17.8,9.5 以及 4.6 min。而Ⅳ,Ⅶ第一次重力侵蚀发生时间均要早于Ⅰ的。图 2E 中Ⅳ组第一次重力侵蚀早于Ⅰ组 8.6 min 发生,而Ⅶ组则早半个多小时发生。平均几组数据,重力侵蚀在裸地沟坡中第一次发生时间在降雨 30.6 min 左右,而在植被覆盖沟坡中时间则为 35.1 min 左右。整体来讲,沟坡系统上的植被对第一次重力侵蚀的发生有一定的延后作用。两种植被进行比较发现,连翘覆盖沟坡第一次发生重力侵蚀的平均时间为 44.8 min,而种植棣棠的沟坡发生第一次重力侵蚀的平均时间为 25.4 min。由此可见,在本试验条件下,连翘覆盖的沟坡对重力侵蚀的延后作用要长于棣棠覆盖的沟坡。

如图 2 所示,裸地处理(Ⅱ-b,Ⅲ-b,Ⅴ-b,Ⅵ-b,Ⅰ)比植被覆盖处理(Ⅱ-p,Ⅲ-p,Ⅴ-p,Ⅵ-p,Ⅳ和Ⅶ)的次降雨重力侵蚀总量分别多 3.84 万,9.13 万,5.76 万,7.81 万,5.05 万,9.48 万  $\text{cm}^3$ 。通过对不同植被覆盖沟坡模型进行对比,连翘植被覆盖的沟坡模型的次降雨重力侵蚀总量的平均值为 39.71 万  $\text{cm}^3$ ,比棣棠覆盖的沟坡模型的重力侵蚀总量多 7.22 万  $\text{cm}^3$ 。此外,Ⅲ-p 与Ⅱ-p 相比,Ⅵ-p 和Ⅴ-p 相比,种植模式均是靠近沟缘线(缓坡和沟坡交界处)附近的沟坡和缓坡上缺少植被,但是Ⅲ-p 中总重力侵蚀量为 21.65 万  $\text{cm}^3$ ,要少于Ⅱ-p 中侵蚀总量 39.88 万  $\text{cm}^3$ ;而Ⅴ-p 中重力侵蚀量为 23.74 万  $\text{cm}^3$ ,



也比Ⅵ-p 中累计重力侵蚀量多 3.20 万  $\text{cm}^3$ 。虽然Ⅱ-p, V-p 组的植被覆盖率高于相应的Ⅲ-p, Ⅵ-p 组, 但是重力侵蚀量并没有减少反而有所增多。

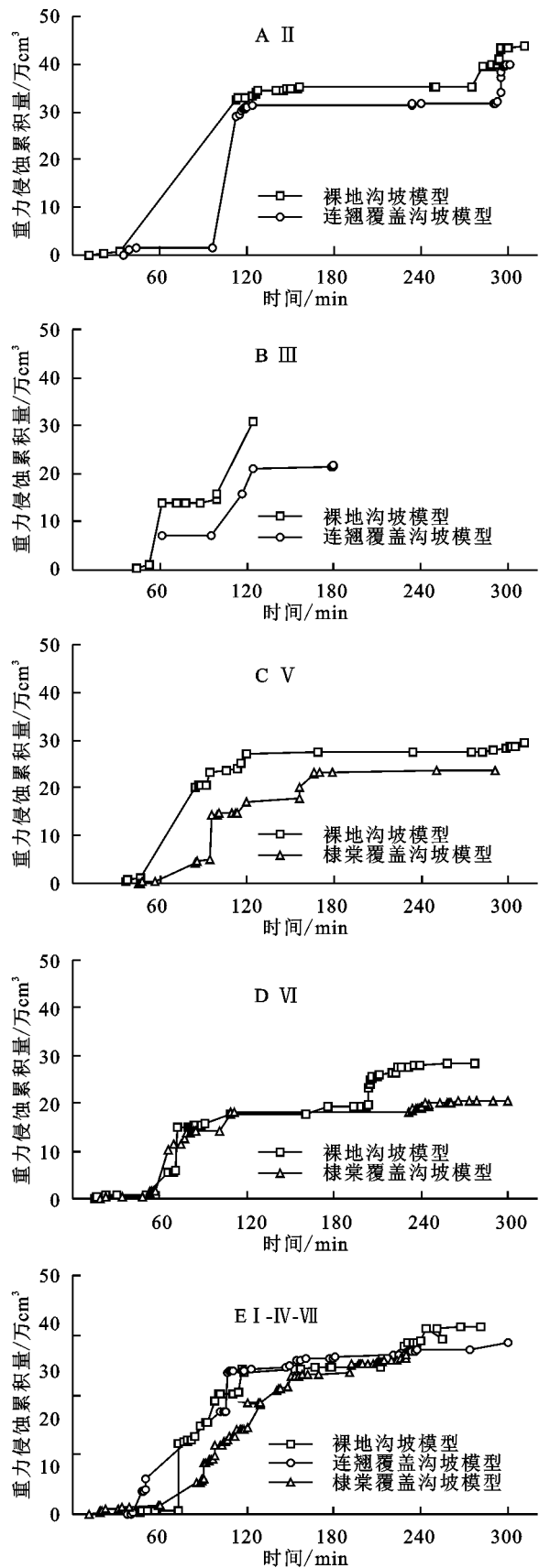


图 2 不同下垫面重力侵蚀累积量随降雨时间的变化

2.2 植被影响下重力侵蚀规模分布的变化

重力侵蚀的发生具有很强的随机性, 规模大小也不同, 重力侵蚀规模的大小对后续沟道的输沙问题有很大的影响。试验中重力侵蚀规模数量级大小不等, 按照由小到大 4 个数量级规模进行统计, 分别为:  $<0.1$  万  $\text{cm}^3$ ,  $(0.1\sim1)$  万  $\text{cm}^3$ ,  $(1\sim10)$  万  $\text{cm}^3$ ,  $>10$  万  $\text{cm}^3$ , 对应等级分别为小、中、大、极大规模。表 3 为各沟坡系统在植被覆盖和裸地情况下在不同等级规模内发生的重力侵蚀总量。计算各组裸地沟坡中发生小、中、大、极大侵蚀规模的重力侵蚀总量的平均值分别为 0.57 万, 4.77 万, 13.18 万, 20.12 万  $\text{cm}^3$ , 而相应的植被覆盖沟坡为 0.89 万, 4.76 万, 16.56 万, 10.50 万  $\text{cm}^3$ , 可见植被覆盖显著降低了沟坡在极大规模等级内重力侵蚀的崩滑量。此外, 沟缘线有植被的Ⅱ-p, V-p 比相应与Ⅲ-p, Ⅵ-p, 发生的极大、大规模重力侵蚀量要多。

为了进一步研究植被对重力侵蚀规模分布影响的变化规律, 并且使对比更加精确, 仅使用混合模型中裸地沟坡共发生的 111 次重力侵蚀和植被覆盖沟坡中共发生的 107 次重力侵蚀, 分别计算不同沟坡系统中重力侵蚀规模的概率密度(图 3)。其中图 3A 表示重力侵蚀体积分布的累积频率, 图 3B 为概率密度增长最快区域不同重力侵蚀体积分布展示图。由图 3B 可知, 裸地沟坡和植被覆盖沟坡中重力侵蚀的发生频率随着规模的增大而减小。当单个崩滑体体积  $<0.25$  万  $\text{cm}^3$  时, 植被覆盖沟坡中发生重力侵蚀累积频率已经达到了 0.72, 而裸地沟坡则仅为 0.65。相比而言, 在本试验条件下, 植被覆盖降低了极大规模重力侵蚀的发生频率, 增加了小规模重力侵蚀的发生。图 4 代表连翘、棣棠两种植被覆盖沟坡重力侵蚀发生情况, 图 4A 中, 在 10 万  $\text{cm}^3$  规模处, 棣棠累计发生频率已达到 1, 而连翘为 0.97。图 4B 中在单个崩滑体积  $<0.25$  万  $\text{cm}^3$  时, 棣棠覆盖沟坡的累积频率达到了 0.77, 而连翘覆盖沟坡仅为 0.63。由此可见, 棣棠覆盖沟坡在小规模重力侵蚀发生频率要高于连翘覆盖沟坡, 而大规模侵蚀发生频率上要低于连翘覆盖沟坡。

2.3 植被作用下的重力侵蚀速率的发展

为研究植被对重力侵蚀发展的影响, 分别对裸地沟坡、植被覆盖沟坡中不同下垫面的重力侵蚀速率变化进行统计。并对发生重力侵蚀时地表以下 15 cm 的土壤含水率数据进行统计。由于 V 组降雨中水分仪出现故障, 所以该组的含水率数据没有记列。通过瞬时重力侵蚀速率得到每组重力侵蚀的最大重力侵蚀速率, 见表 4。其中Ⅱ-p, V-p 中最大重力侵蚀速率约是Ⅱ-b, V-b 的 3 倍和 15 倍。而Ⅲ-b, Ⅵ-b 中最

大重力侵蚀速率是Ⅲ-p,Ⅵ-p 的 16 倍和 13 倍。组间的对比中,Ⅰ 的最大重力侵蚀速率为 711.29 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s),约是Ⅳ组的 3 倍,但是却是Ⅶ组的 1/2。可见,在暴雨情况下的某些时刻,植被可能会加快重力侵蚀的发展。通过计算各组的平均重力侵蚀速率可知,Ⅱ,Ⅲ,Ⅴ,Ⅵ,Ⅰ 中的裸地沟坡模型的平均侵蚀速率分别为 6.48,4.56,4.37,5.48,4.64 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s),

平均值为 5.11 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)。而相应植被覆盖沟坡模型为 5.91,3.21,3.52,3.97,4.27,3.94 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s),平均值为 4.13 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)。在各组比较中,裸地沟坡中的平均重力侵蚀速率均要高于相应的植被覆盖沟坡。也就是说,在一组试验经过了 5 场累积 300 min 的降雨后,植被降低了平均重力侵蚀速率,减缓了重力侵蚀的发展。

表 3 不同下垫面中不同等级规模内发生重力侵蚀总量 万 cm<sup>3</sup>

规模划分	Ⅱ		Ⅲ		Ⅳ	Ⅰ	Ⅶ	Ⅴ		Ⅵ		b 平均	p 平均
	b	p	b	p	p	b	p	b	p	b	p		
<0.1	0.74	0.73	0.25	0.04	0.93	0.62	1.74	0.32	0.33	0.92	1.58	0.57	0.89
0.1~1	5.24	4.15	2.86	0.66	6.22	7.12	11.19	4.18	3.11	4.44	3.25	4.77	4.76
1~10	6.23	7.26	0.00	0.66	15.16	32.50	40.24	4.18	20.30	22.99	15.72	13.18	16.56
>10	31.50	27.74	27.67	0.00	35.29	22.41	0.00	19.02	0.00	0.00	0.00	20.12	10.50

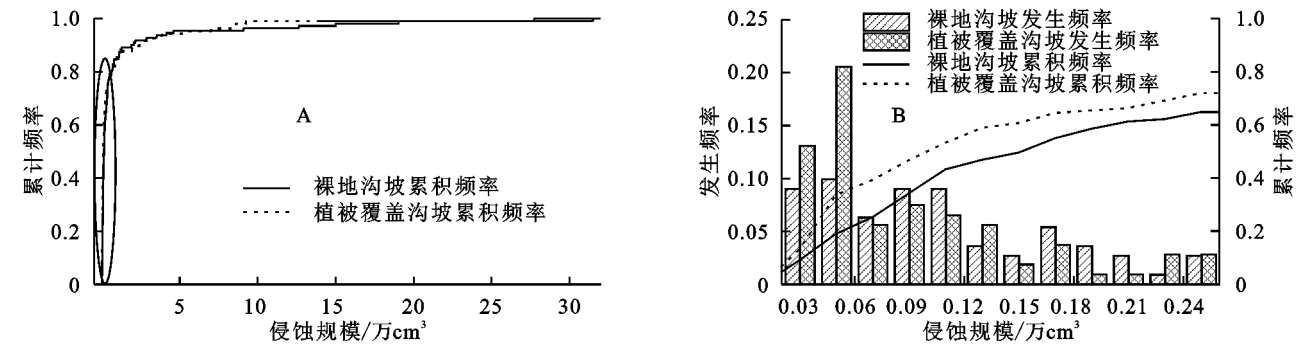


图 3 裸地沟坡模型和植被覆盖沟坡模型中发生不同规模重力侵蚀的概率分布

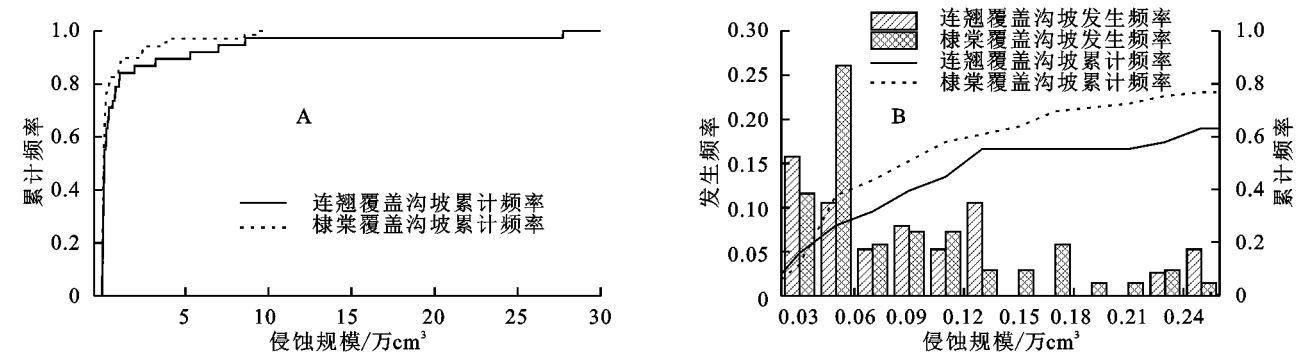


图 4 不同植被覆盖沟坡模型发生不同规模重力侵蚀的概率分布

表 4 不同下垫面重力侵蚀速率

裸地沟坡模型				植被覆盖沟坡模型			
组别	含水率/%	最大值/ (cm <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均值/ (cm <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	组别	含水率/%	最大值/ (cm <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均值/ (cm <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Ⅱ	25	492.30	8.94	Ⅱ	29	1378.47	5.91
Ⅲ	26	514.06	6.29	Ⅲ	24	32.97	3.21
Ⅴ		20.30	6.03	Ⅴ		308.35	3.52
Ⅵ	28	2427.66	7.56	Ⅵ	28	189.73	3.97
Ⅰ	25	711.29	6.40	Ⅳ	29	237.18	4.27
				Ⅶ	26	1551.32	3.94
平均	26	833.12	5.11	平均	27	616.34	4.13

注:含水率为发生重力侵蚀时的地面以下 15 cm 处土壤平均含水率。

连翘覆盖沟坡的最大侵蚀速率为 579.84 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s),略低于槲栎覆盖沟坡。但是平均侵蚀速率

为 4.46 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s),要高于槲栎覆盖的沟坡。总的来说,连翘覆盖沟坡的侵蚀发生发展要比槲栎组更

快一些。此外,沟缘线附近有植被的Ⅱ-p, V-p 中的瞬时最大重力侵蚀速率分别是相应位置无植被覆盖的Ⅲ-p, VI-p 组的 41.8, 1.6 倍。计算平均值可知,沟缘线附近有植被覆盖沟坡模型的最大重力侵蚀速率、平均重力侵蚀速率分别是该位置上无植被覆盖沟坡模型的 7.6, 1.3 倍。可见在强降雨条件下,布置在沟缘线附近的植被无论在长期和短期对重力侵蚀发展均可能有一定的促进作用。

3 讨论

在黄土高原沟壑区的调查中发现,该区 2015 年平均林草覆盖率 56.17%<sup>[18]</sup>。该区在生态建设下,植被覆盖已经有了很大的提高,但植被覆盖率偏低的地区仍存在。如在对陕西某县的 1997—2016 年植被覆盖度比例面积比例统计发现,1997 年植被覆盖 0~40% 的面积比例占到 53%,到了 2016 年虽然有所下降,但仍有 36% 左右<sup>[19]</sup>。本模型主要模拟的是沟坡系统靠近沟缘线的一部分,所以在这部分的植被覆盖度整体较小。而且植被对重力侵蚀的影响复杂,是植被冠层、根系对土壤水文、机械综合作用的结果。在某些情况下,当大量的高强度降雨直接落在土壤表面并超过水渗入土壤的速度时,灌木可以起到屏障的作用。在降雨事件初期,植物冠层上的临时降雨储存会减弱降雨强度<sup>[20-21]</sup>,从而起到延缓雨水进入土壤的时间。植被根系对土壤进行机械加固,有助于山坡的稳定性。在相同的含水量条件下,根土复合提供的加固强度比单独的土壤大得多。对每组重力侵蚀发生时缓坡面下 15 cm 的含水率进行统计(表 4)。除了Ⅲ中重力侵蚀发生时植被侧的平均含水率要低于裸地侧以外,其余各组植被覆盖沟坡中重力侵蚀发生时的平均含水率都要高于相应的裸地沟坡。所以在有植被存在时,发生重力侵蚀需要更高的土壤含水率,这种情况在植被覆盖率高的组别下表现更加明显。

对比不同植被的作用,连翘的 RAR 系数要高于棣棠,其抗剪强度也较高。所以发生崩滑需要更大的下滑力,并且连翘的覆盖要高于棣棠,所以与棣棠覆盖沟坡相比,连翘覆盖沟坡发生重力侵蚀要滞后。此外,两种植被对土壤含水率的影响也不同,图 5 为在初始含水率相同的情况下两种植被覆盖沟坡中地表以下 15 cm 处土壤含水率随时间的变化情况。连翘覆盖沟坡的含水率在第 19 min 时开始上升,比棣棠覆盖沟坡的早 8.5 min。由表 2 可知,连翘在各个径级均有根系分布,并且平均径级要大于棣棠组,所以根系的渗透速度要比棣棠快。黄土的水敏性使得其抗剪强度随着土壤含水率的升高急剧下降<sup>[22]</sup>,所以

在降雨后期,即使有根系的存在,但是根土复合体提供的抗滑力也会减小,再加上之前积攒的能量,连翘覆盖沟坡更容易发生大规模的重力侵蚀。这可能也是在本试验条件下,连翘覆盖沟坡的重力侵蚀比棣棠覆盖沟坡更为严重的原因。由此可见,恢复初期灌木的固土作用对沟坡的稳定性作用的贡献不大。本试验也表现了植被种植初期时的状态,这与以往种植初期灌丛对边坡稳定性影响小的结论是一致的<sup>[23]</sup>。所以在植被种植初期,沟坡上的植被要选择根茎较小的植被以防过高的水分渗透,或与其他工程措施联合配置,以发挥沟坡稳定的最大效益。

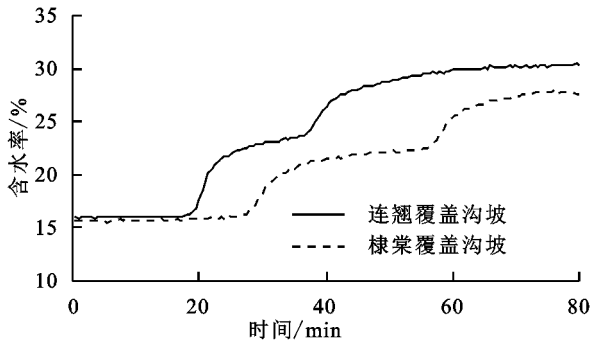


图 5 不同植被覆盖地表下 15 cm 处含水率随时间变化

在本试验中还发现大规模的重力侵蚀虽然发生频率小,但是侵蚀量却很高。在调查中也发现大规模重力侵蚀在确定一个地区的重力侵蚀总量上有重要性的地位,一旦大规模侵蚀发生,对重力侵蚀量的贡献会很大<sup>[24-25]</sup>。本试验中,在暴雨条件下,植被存在并没有显著减少重力侵蚀发生次数,植被仅降低重力侵蚀的侵蚀规模总量,但却增加了小型重力侵蚀规模的发生频率。有研究表明植被的根系形成的孔隙流可能使得水从表面快速转移到潜在滑移面,导致破坏面的孔隙压力增加,从而增加了破坏的风险<sup>[26]</sup>。这也是植被没有降低重力侵蚀发生次数的重要原因。此外,植被增加中小重力侵蚀规模分布其实在一定程度上增加了土壤的破碎程度,黄土的易侵蚀性使得当降雨来临时可能会更容易形成高含沙水流,高含沙水流会造成高强度的坡面与沟道侵蚀<sup>[27]</sup>,进一步促进小型重力侵蚀的发生。

在本试验中发现,暴雨初期,植被由于延缓重力侵蚀发生而积攒了发生重力侵蚀的能量,而随着暴雨的持续,沟坡上的植被的根土复合起不到作用时,沟坡上的植被会带着大量的土壤滑落到沟坡底部,此时沟坡上会发生大规模的崩滑,增加了瞬时重力侵蚀速率。这可能也是本试验中的某些组最大侵蚀速率出现在植被覆盖沟坡模型中的原因。对黄土高原延河流域的野外调查发现,植被覆盖率较高的南部小流域的侵蚀要大于植被覆盖率相对较低的北部小流



域<sup>[28]</sup>。在某次暴雨后植被覆盖率较好的地区,重力侵蚀更加严重<sup>[29]</sup>。在本试验中经历长序列的降雨时间5场降雨情况下,植被的存在还是会使得平均重力侵蚀速率降低的。对黄土高原较大流域长时间的监测中发现,重力侵蚀总量与植被覆盖度有较好的负相关关系<sup>[6]</sup>。可见植被对重力侵蚀速率的影响与统计的范围和时间有关。在对世界其他流域进行统计时发现,当退耕还林的开始阶段,重力侵蚀是在增加的,40 a之后这种趋势停止<sup>[26]</sup>。所以当计算侵蚀速率时,在短时间内,植被影响下重力侵蚀速率可能会增加,但以40 a或者更长时间为统计时间段,植被可能就会降低重力侵蚀速率。换句话说,在暴雨条件下,由于统计时空范围的差异,植被对重力侵蚀的短期和长期发展可能会起到不同的效应,造成不同的结果。

在本试验中,植被覆盖率的增加与重力侵蚀在规模和强度上没有一定的线性关系。与植被覆盖率相比,植被布局是影响重力侵蚀的更重要的因素。沟缘线附近的植被布置可能会对重力侵蚀有一定促进作用。沟缘线附近有植被的两组与对应无植被的两组相比,次降雨重力侵蚀总量和重力侵蚀平均速率均有增加。一般来说沟缘线附近是很少种植植被的,因为在该位置的植被根系很容易形成水流通渠道,导致边坡失稳,造成水土流失<sup>[30]</sup>。而且沟坡上部植被的自重影响要大于坡脚的位置,也会促进重力侵蚀的发生<sup>[31]</sup>。而且有试验表明,将植被布设在缓坡面的中下部而不是缓坡的下部,既可以有效减缓坡面水力侵蚀强度,还能够有效抑制减缓径流流速,降低对坡面下部和沟道范围的侵蚀<sup>[31]</sup>。所以在布设植被时,考虑到植被对水力侵蚀和重力侵蚀控制的双重功效,要将植被布设在距离沟缘线有一定距离的地方才能达到更好地防止沟坡侵蚀的效果。

## 4 结论

(1) 在同样降雨条件下沟坡模型上的植被对重力侵蚀发生在时间上有一定的延后作用。裸地沟坡和植被覆盖沟坡第一次发生重力侵蚀平均时间分别为30.6,35.1 min。

(2) 在对应植被覆盖沟坡模型和裸地模型对比中,植被降低了极大规模重力侵蚀的崩滑量,增加了小型重力侵蚀规模分布。侵蚀规模量级大,占总重力侵蚀比重大,次数少是两种模型中重力侵蚀发生的共同特点。

(3) 由于统计时间的差异,暴雨条件下植被对重力侵蚀发生速率影响结果会有所不同。在某一时间点可能会增加重力侵蚀速率。但5场降雨后,植被覆

盖沟坡和裸地沟坡侵蚀速率平均值分别为4.13,5.11  $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,植被的存在降低了重力侵蚀速率,减缓重力侵蚀发展。

(4) 与沟缘线附近无植被的模型相比,在此处种植植被对重力侵蚀发生规模、发展速率均有促进作用。沟缘线附近有植被覆盖的最大及平均重力侵蚀速率分别为无植被覆盖的7.6,1.3倍。

(5) 在沟坡进行植被恢复初期,选择根茎较小的灌木,并配合以工程措施,防止水分通过根系渗入土壤而导致边坡失稳,从而发生重力侵蚀。

本文是基于模型试验得到的以上结论。鉴于植被在不同生长周期对土壤影响不同,并且黄土高原不同地区的暴雨特征有所区别,在暴雨条件与植被的耦合作用下,野外沟坡的植被布置对重力侵蚀的发生发展的长期影响如何,还需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Xu X Z, Liu Z Y, Wang W L, et al. Which is more hazardous: avalanche, landslide, or mudslide[J]. *Natural Hazards*, 2015,76(3):1939-1945.
- [2] Fu B, Liu Y, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011,8(4):284-293.
- [3] 高海东,庞国伟,李占斌,等.黄土高原植被恢复潜力研究[J].*地理学报*,2017,72(5):863-874.
- [4] 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.降水量等级 GB/T28592—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [5] Haigh M J, Rawat J S, Rawat M S, et al. Interactions between forest and landslide activity along new highways in the Kumaun Himalaya[J]. *Forest Ecology & Management*, 1995,78(1/3):173-189.
- [6] 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.
- [7] 孙尚海,张淑芝,张丰.中沟流域的重力侵蚀及其防治[J].*中国水土保持*,1995(9):25-27.
- [8] 于国强,李占斌,张茂省,等.水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J].*土壤学报*,2012,49(4):646-654.
- [9] Kim D, Im S, Lee C, et al. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed[J]. *Ecological Engineering*, 2013,61:658-668.
- [10] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.寒旱环境黄土区灌木根系护坡力学效应研究[J].*水文地质工程地质*,2008,35(1):94-97.
- [11] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J].*农业工程学报*,2019,35

- (7):122-128.
- [12] Gao H, Xu X, Zhang H, et al. How effective is vegetation in reducing gravity erosion on loess gully side-wall under intense rainfalls[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(17):2605-2619.
- [13] 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.
- [14] 刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [15] 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.
- [16] 郭翬, 王云琦, 王青兰, 等. 根系逐渐破坏过程中固土效果研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(6): 85-92.
- [17] 赵超, 徐向舟, 徐飞龙, 等. 试验地貌的动态观测装置[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(1): 65-69.
- [18] 郭胜利, 姬洪飞, 郝明德, 等. 黄土高原沟壑区综合治理试验示范成果评述与高质量发展研究展望: 以陕西省长武县王东沟小流域 30 a 多治理实践为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 318-324.
- [19] 罗舒元, 朱清科, 辛云玲, 等. 陕北吴起县植被覆盖度时空特征及其影响机制[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 146-154.
- [20] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 974-986.
- [21] Wang X, Zhang Y, Hu R, et al. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455: 152-159.
- [22] Zhuang J, Peng J, Wang G, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi province[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236(S1): 89-96.
- [23] 张栋. 灌丛垫固土作用机制及其生态护岸效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [24] Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1/2): 105-122.
- [25] 郭文召. 黄土沟坡重力侵蚀与产沙过程试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [26] Erik C, Rens Van B, Annemieke K. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 135-147.
- [27] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(1): 28-35.
- [28] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 等. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 159-167.
- [29] 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.
- [30] Wu W, Switala B M, Acharya M S, et al. Effect of Vegetation on Stability of Soil Slopes: Numerical Aspect[M] // Wu W. *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [31] Morgan R P C. *Soil Erosion and Conservation*[M]. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2009.

(上接第 16 页)

- [27] 梁秀娟, 肖长来, 杨天行, 等. 密云水库中氮分布及迁移影响因素研究[J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(增刊 I): 272-280.
- [28] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J]. *中国科学: B 辑*, 2001, 31(2): 131-137.
- [29] 陈静生, 高学民, 夏星辉, 等. 长江水系河水氮污染[J]. *环境化学*, 1997, 18(4): 289-293.
- [30] Haggardb E, Stanley E H, Hyler R. Sediment phosphorus relationships in three northcentral Oklahoma streams[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1999, 42(6): 1709-1714.
- [31] Smith D R, Wamemuenda E A, Haggardb E, et al. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(1): 71-78.
- [32] 金鑫, 单宝庆, 李思敏, 等. 北方典型干旱缺水型河流氮磷时空分布特征与富营养化评价[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3538-3544.
- [33] 冉祥滨. 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [34] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海上覆水不同形态氮时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 874-880.
- [35] Desprez M. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: Short and long-term post-dredging restoration[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57: 1428-1438.
- [36] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. *环境科学*, 2017, 38(6): 2326-2335.