

2 种雨型的黄土坡面侵蚀室内试验

朱建东, 吴礼舟, 李绍红, 沈朝辉, 鄢 好

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 为研究黄土边坡在连续与间断 2 种雨型下坡面侵蚀动态变化过程, 进行室内人工降雨试验。采用三维激光扫描获取坡面点云并生成 DEM, 分析坡面侵蚀特征。结果表明: 三维激光扫描生成的 DEM 可直观重现坡面侵蚀的动态过程, 采用自然邻点插值法生成的 DEM 误差最小; 间断降雨模式下距坡面 5 cm 处体积含水率出现与降雨周期一致的波动; 2 种降雨模式下土壤流失总量在土壤饱和后呈线性增加, 间断降雨产生的土壤流失总量(0.035 6 m³)大于连续降雨产生的土壤流失总量(0.024 9 m³); 间断降雨土壤流失过程可看作多个连续降雨土壤流失过程的组合; 2 种雨型下, 土壤流失速率在空间上分布不均, 由前缘至后缘逐渐降低; 间断降雨坡面变化区域为中部至前缘区域, 其过程为前缘下切→中前缘下切→前缘及中部下切; 连续降雨坡面变化区域集中于前缘, 表现为前缘逐渐后退。

关键词: 黄土边坡; 室内降雨试验; 坡面侵蚀; 点云
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)06-0092-07
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.013

Laboratory Experiment of Rainfall-induced Erosion on Loess Slopes Under Two Rainfall Patterns

ZHU Jiandong, WU Lizhou, LI Shaohong, SHEN Chaohui, YAN Hao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract: In order to study the dynamic process of erosion on the loess slope in both continuous and intermittent rainfall patterns, we carried out a laboratory rainfall experiment. We used the 3D laser scanning to acquire the point cloud of the slope and generated DEM to analyze the erosion characteristics of the slope. The results showed that the DEM generated by 3D laser scanning could visually reproduce the dynamic process of slope erosion. The error of DEM generated by natural neighbor interpolation method was the smallest. At the location of 5 cm from the slope surface, the fluctuation of volumetric water content under the intermittent rainfall mode was consistent with the rainfall period. The total amount of soil loss under two rainfall patterns increased linearly after soil was saturated. The total amount of soil loss caused by intermittent rainfall (0.035 6 m³) was greater than that caused by continuous rainfall (0.024 9 m³). The soil loss process of intermittent rainfall could be seen as a combination of multiple continuous soil loss processes. Under the two rainfall patterns, the soil loss rate was unevenly distributed in space, and gradually decreased from the front to the trailing edge. Under the intermittent rainfall, the slope surface changed from the central to the front, and the process was: the front cutting → the mid-front cutting → the front and central cutting. Under continuous rainfall, the change of slope surface concentrated on the front, which was characterized by the gradual retreat of the front.

Keywords: loess slope; laboratory rainfall experiment; slope erosion; point cloud

中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一^[1]。黄土高原沟壑纵横, 水土流失严重, 土壤冲刷侵蚀规律复杂, 对当地人民的生产生活产生了不利影响。坡面侵蚀是水土流失最直接最主要的形式^[2]。降雨是引起水土流失和土壤侵蚀的主要诱因之一。

边坡坡面侵蚀的研究方法主要有室内试验、现场

试验、数值模拟和理论分析等方法。覃超等^[3]采用摄影测量技术和室内人工模拟径流冲刷的方法研究了黄土坡面沟头溯源侵蚀过程及产沙特征, 表明产沙率和侵蚀率随流量和坡度的增加而增加; 黄晓虎等^[4]进行室内黄土边坡降雨侵蚀破坏模拟试验, 结果表明在一定的降雨强度下, 径流携沙能力和单位面积侵蚀泥

沙量随着试验坡度的增加逐渐增加,而径流总量、侵蚀干泥沙量随着坡度的增加而相应变小;刘俊娥等^[5]、吴冰^[6]采用人工降雨试验,对黄土坡面片蚀过程进行试验研究,揭示了坡面片蚀动力学过程机理;李小花等^[7]对新疆伊犁河流域的黄土边坡进行人工降雨现场试验,表明坡面产沙量随降雨强度的增强而增大;降雨强度越大,坡度对产沙量影响越明显;吴谦等^[8]针对 70°黄土边坡开展室内降雨冲刷试验,并运用 PFC^{3D}对降雨冲刷过程进行流—固耦合模拟,为土壤边坡侵蚀研究提供了新的思路;李军鹏等^[9]采用水力学计算公式,建立了降雨条件下细沟侵蚀模型,分析研究各参数对坡面侵蚀的影响,从力学角度揭示坡面侵蚀的演化过程;韩勇^[10]、张新和^[11]从现场试验、室内试验和力学机理方面研究了不同降雨模式下,黄土坡面侵蚀方式演变与产沙过程的变换,揭示坡面侵蚀产沙过程的动力学机理。随着科技的进步,高精度 GPS^[12]、三维激光扫描^[13-14]和摄影测量^[15-17]等新的观测手段开始引入到边坡侵蚀的研究中。徐锡蒙等^[13]结合三维激光扫描和立体摄影测量技术,揭示了 3 条具有不同上方汇水面积的坡面浅沟集水区的动态变化过程;冯林等^[15]采用无人机倾斜摄影测量与 GCP 建立了高精度的侵蚀沟三维模型,为精细化的侵蚀监测提供有益参考。

对一定降雨强度下边坡土壤的坡面侵蚀过程及机理,前人已有较为清晰的认识,但对连续与间断强降雨下坡面侵蚀的特征异同有待进一步探究。因此,本文采用三维激光扫描,在相同试验时间内,对连续与间断降雨模式下黄土边坡坡面侵蚀过程进行研究,以期揭示黄土边坡在不同降雨模式下的坡面侵蚀规律。

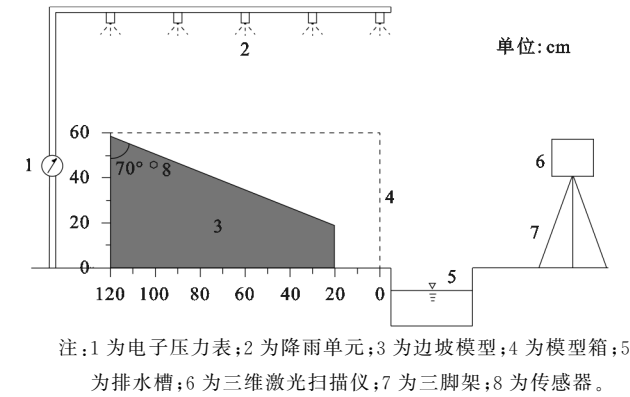
1 试验设计

1.1 试验装置与边坡模型

本次降雨坡面侵蚀试验场地位于成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室室内大型泥石流实验室,试验时间为 2017 年 11 月。试验装置主要由降雨系统、模型箱、排水通道及三维激光扫描仪组成(图 1)。

试验模型箱为 40 cm×60 cm×120 cm 的长方体,2 个侧壁及后壁为透明有机玻璃,方便观察侵蚀入渗过程,前部敞开排水,底部为钢板。整个模型箱采用角钢焊接并用螺丝钉固定,对接缝处采用玻璃胶

黏合密封。点云数据采用加拿大 Optech 三维激光扫描仪获取,试验中扫描精度设置为 5 点/mm。试验边坡模型长 100 cm,宽 40 cm,后缘高 55 cm,坡面坡度设置为 20°,前缘为竖直切面。试验过程中的雨水冲刷坡面产生的土体可通过模型箱开口排入实验室的排水槽中。体积含水率采用美国 Decagon 公司研制的 EC-5 体积含水率传感器监测,放置于坡体后缘,距离坡表 5 cm(图 1),用于监测试验过程中坡体体积含水率随时间的变化过程。



注:1 为电子压力表;2 为降雨单元;3 为边坡模型;4 为模型箱;5 为排水槽;6 为三维激光扫描仪;7 为三脚架;8 为传感器。

图 1 试验装置示意

1.2 试验材料

试验采用甘肃天水的第四系次生黄土。对野外现场采回的土样进行翻晒捶碎,剔除直径较大的碎石等,将干燥黄土敲碎后过 1 mm 标准筛。采用分层击实制作模拟边坡,分层厚度 5 cm,保证边坡密实度满足试验要求。试验土壤的干重度为 13.5 kN/m³,饱和重度为 17.3 kN/m³,初始体积含水率为 0.1,饱和体积含水率为 0.516,饱和渗透系数为 1.52×10⁻⁵ m/s。

1.3 降雨条件设计

共设计 2 组降雨模式,主要研究黄土边坡在连续及间断降雨模式下的侵蚀规律。各组试验条件见表 1。降雨模拟系统采用实验室自行设计的人工降雨模拟系统,该系统主要由压力表和降雨喷头组成。采用雾化喷头减小雨滴的影响,喷头间距 30 cm,试验前对降雨装置进行标定。保持试验过程中水压力为 40 kPa,试验测试降雨均匀度为 85.8%,符合>80%的要求,测试所得降雨强度分布见图 2。间断降雨试验共进行了 360 min,包括 3 个降雨期和 3 个间隔期,其中 0~60,120~180,240~300 min 为降雨期,60~120,180~240,300~360 min 为间隔期;连续降雨试验共进行了 360 min。

表 1 降雨试验条件

试验编号	试验类型	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	初始体积 含水率	降雨类型	降雨时间	总降雨 时间/min
S-1	间歇强降雨	75	0.1	间断	间隔 1 h 降雨 1 h	360
S-2	持续强降雨	75	0.1	均匀	连续降雨	360

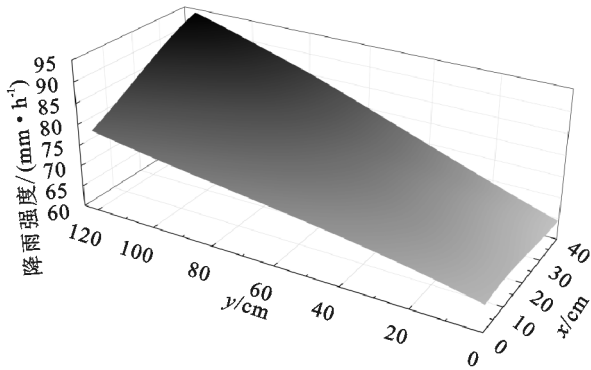


图 2 降雨强度分布

1.4 点云数据处理及体积计算方法

三维激光扫描仪获取的点云区域大于边坡区域,间断降雨模式,分别在降雨期与间隔期进行三维激光扫描;连续降雨则间隔 30 min 左右对边坡扫描 1 次,对坡面进行了 12 次扫描。因此需对点云进行分割、裁剪以提取出分析所用的点云模型区域,调整点云坐标系原点至左下角。对提取出的点云数据进行插值栅格化,并导入 ArcGIS 进行体积及土壤流失量计算。

2 结果与分析

2.1 黄土边坡侵蚀过程

间断降雨与连续降雨模式下,坡面高程变化见图

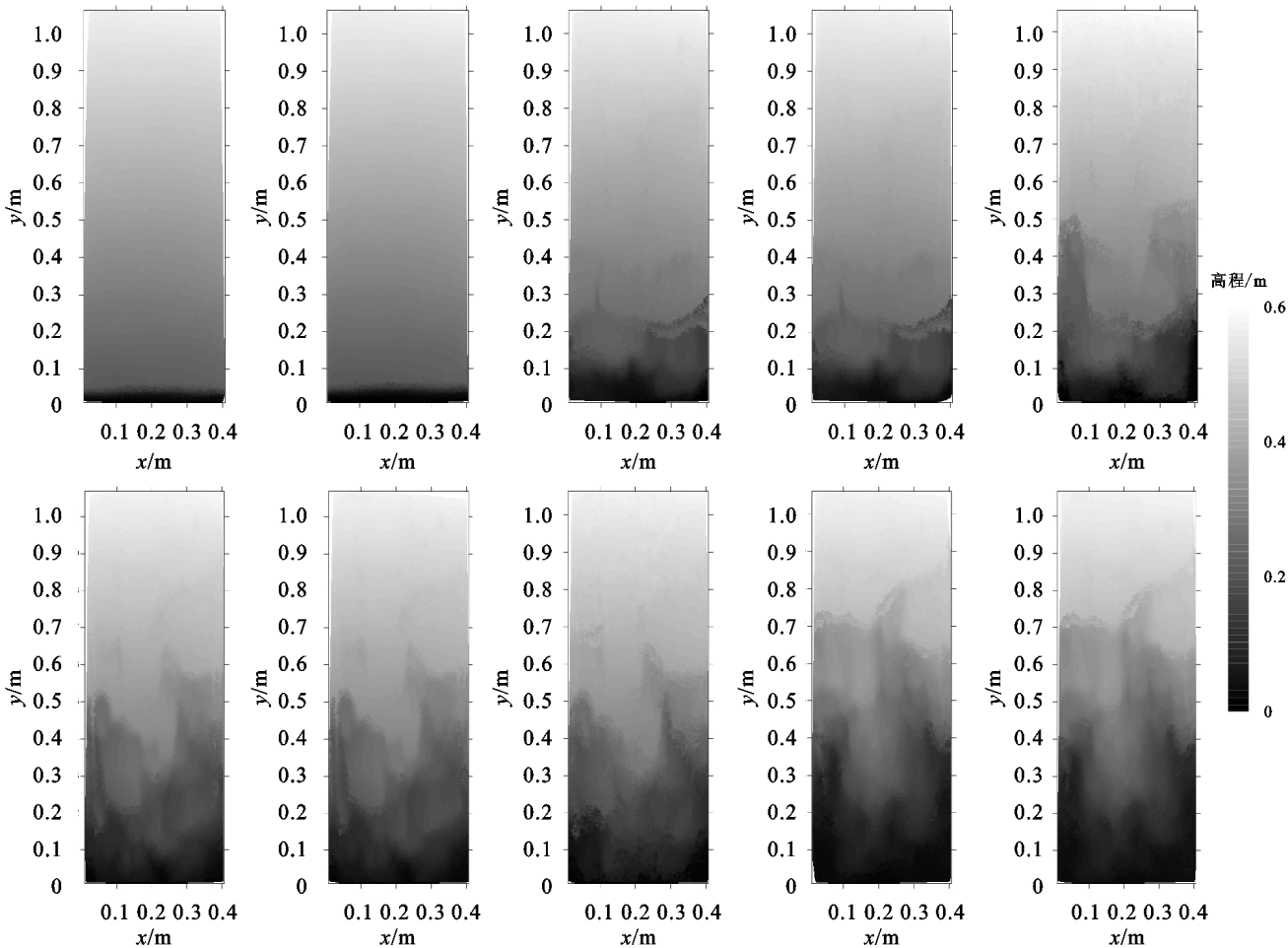


图 3 间断降雨坡面数字高程模型

3 和图 4。
2.1.1 间断降雨 由图 3 中 0~93 min 可知,第 1 次降雨前 37 min 主要发生面蚀,土壤流失量约 0.002 m³,随后在坡体前缘中点出现切沟。在第 1 次间隔期,降雨停止,坡面形态保持不变,侵蚀停止。随着第 2 次降雨的进行,由 112~207 min 可知,坡面侵蚀程度较第 1 次降雨大,坡体前缘土壤流失量进一步增加,并在边坡前缘两侧出现侵蚀沟。第 2 次降雨间隔期,坡面侵蚀停止。由 223~331 min 可知,随着降雨的进行,坡体前缘的侵蚀沟被后缘坡面侵蚀产生的黄土所覆盖。
2.1.2 连续降雨 在试验进行至 30 min 时因设备原因,未获取到三维点云数据。因此结合间断降雨第 1 次降雨期的点云数据,对连续降雨模式下前期的侵蚀过程进行补充分析。由图 4 可知,连续降雨模式下,先产生面蚀,随着时间的推移,坡面出现细沟,前缘出现切沟。图 4 中 55 min 可见 3 条明显的侵蚀沟,且中部侵蚀沟宽度相较两边的侵蚀沟大。降雨继续进行,前缘侵蚀沟向坡体中部发展,坡面水流产生溯源侵蚀和下蚀,细沟逐渐发展为切沟。试验结束时,前缘切沟的倾角由最初约 90°发展到试验结束时约 24°,坡度平均变化率为 0.183°/min。

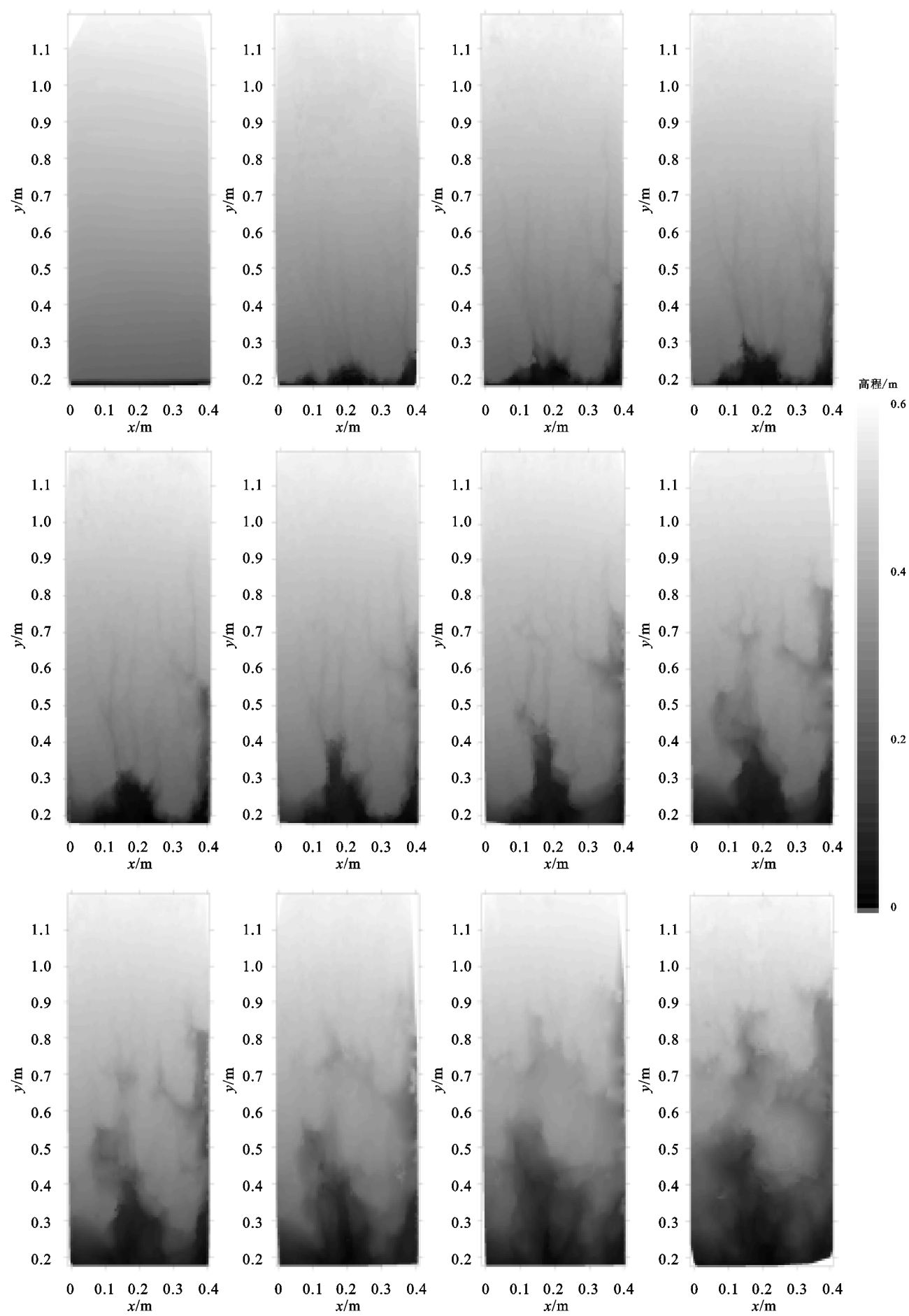


图 4 连续降雨坡面数字高程模型

2.2 点云插值方法选取

三维激光扫描仪获取的地形数据为边坡表面的离散点。为了能对整个坡体的体积进行计算,需要采用插值的方法将非连续的点云生成连续的栅格数据。不同的插值方法有不同的适用环境。为尽量减少点云插值栅格化的误差,本文采用 Surfer 软件 (Version 11.0.642, 64bit) 预设的 11 种插值方法对三维激光扫描仪获取的数据进行插值栅格化处理。将栅格化后的数据导入 ArcGIS 计算不同的插值方法计算出的坡面的体积,并计算相对误差,计算结果见图 5。采用降雨前获取的点云,体积的真值通过坡体填筑完成后测量值进行计算。由图 5 可知,在各种方法中,自然邻点插值法的相对误差最小,仅为 0.8%,其精度与张鹏等^[18]的研究结果相差不大。因此本文采用自然邻点插值法进行点云插值生成 DEM。

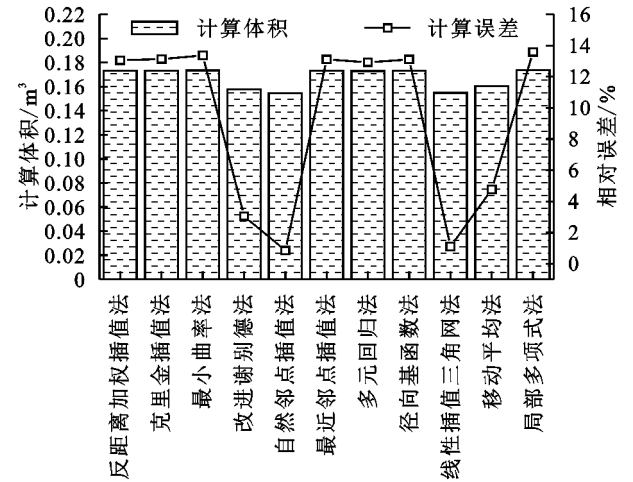


图 5 不同插值方法计算体积及相对误差

2.3 降雨对土壤体积含水率的影响

2 种降雨模式下,5 cm 处土壤体积含水率与降雨时间关系见图 6。试验开始约 60 min 后达到饱和体积含水率,湿润峰到达传感器时间为 25 min。由此可计算出 0—5 cm 土体湿润峰迁移平均速率约为 0.2 cm/min。间断降雨体积含水率出现阶段性波动,对应降雨的 3 个阶段。降雨期间土壤体积含水率增加,间隔期土壤水分蒸发,体积含水率降低。因传感器埋置深度的影响,土壤体积含水率的变化存在滞后性。

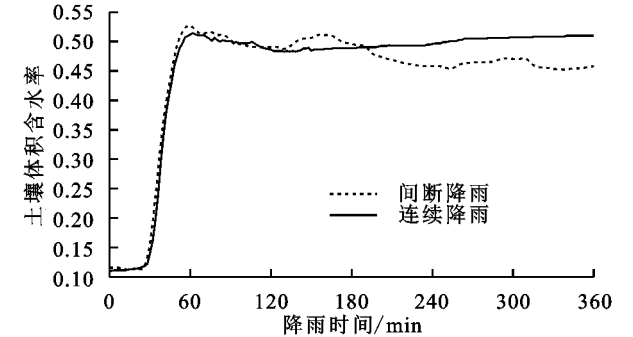


图 6 5 cm 处土壤体积含水率与时间关系曲线

2.4 降雨模式对土壤流失量影响

连续与间断降雨模式下,土壤流失量随时间变化

见图 7。间断降雨模式下,边坡土壤流失量随降雨时间的增加逐渐增加,变化趋势与降雨的阶段性一致,且土壤流失过程存在滞后性。第 1 次降雨的土壤流失量约为 0.009 8 m³,第 2 次降雨的土壤流失量约为 0.013 9 m³,第 3 次降雨的土壤流失量约为 0.012 0 m³。在每次降雨初期土壤流失量增加较小,随着降雨的进行,土壤流失速率逐渐增大,后一降雨阶段的土壤流失速率大于前一阶段。考虑到降雨过程中发生雨水入渗导致土体强度降低,坡体表面水流的侵蚀能力随着入渗过程的发展而加强。

连续降雨模式下,降雨初期土体强度较高,坡面水流的侵蚀能力低。随着雨水入渗过程的发展,土体的含水率逐渐升高,强度逐渐降低,坡面水流的侵蚀能力逐渐增强,土壤流失量也逐渐升高。当土体达到饱和后,土体的抗侵蚀能力降到最低,土壤流失速率达到最大值并保持基本不变,侵蚀量随时间的推移呈现线性增加。

对线性段采用 Origin 软件进行线性拟合,相关性系数 R^2 为 0.981 48,显著性水平 α 为 0.05,拟合结果为:

$$V = -0.00371 + 7.49 \times 10^{-5} \cdot t \quad t > 60 \quad (1)$$

式中: V 为土壤流失量 (m³); t 为试验经过的时间 (min)。

对比间断降雨与连续降雨,二者在降雨初期,土壤流失量均较低,随着降雨的持续进行,雨水入渗,土体的含水率升高,强度降低,土壤流失量逐渐增大。当土体达到饱和含水率后,土壤流失速率基本保持不变。间断降雨土壤流失过程可以看作多个连续降雨过程的组合,其影响土壤流失速率的主要因素为边坡土体的体积含水率。

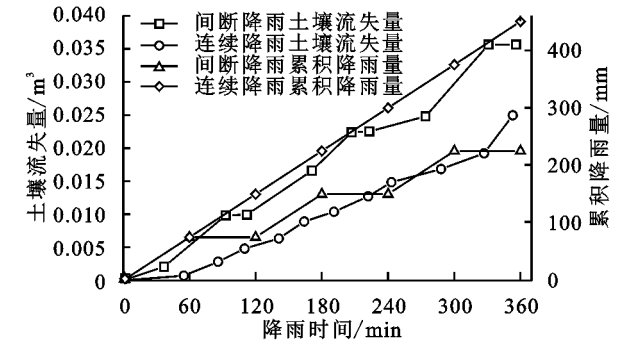


图 7 坡面土壤流失量随降雨时间的变化曲线

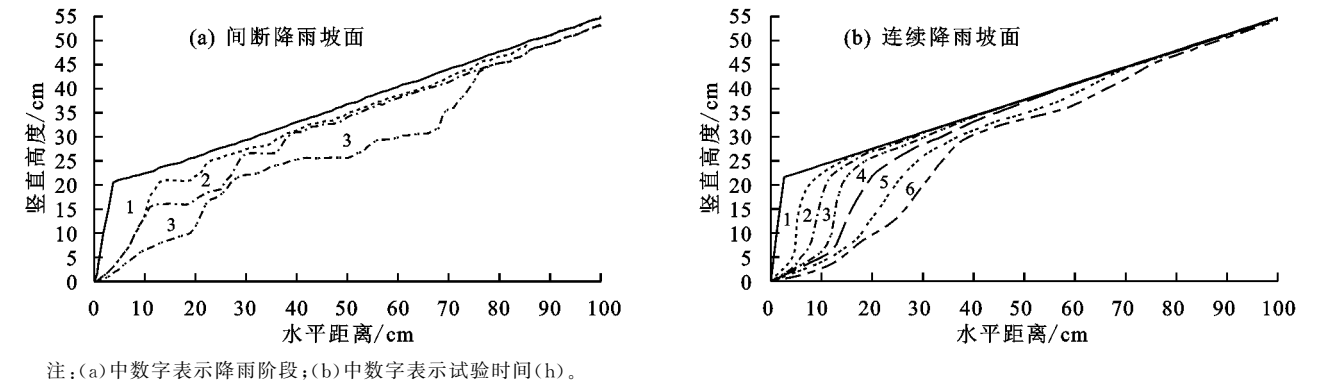
2.5 降雨模式对坡面形态的影响

为分析不同降雨模式下水流对坡面地形的改造情况,对生成的 DEM,提取坡面中轴线对应的地形线。由图 8a 可知,间断降雨模式下,地形变化存在明显的阶段性,这与降雨的 3 个阶段相对应。第 1 个降雨阶段,坡面变化的主要区域为 0~85 cm,变化强度由前缘至后缘逐渐增大;第 2 个降雨阶段,0~10 cm 范围坡型保持不变,坡形变化强烈区域为 10~40 cm,40~100 cm 产生平行下切;第 3 个降雨阶段,坡面形态变化最为明显,从 0~75 cm 范围坡面均下切,其中 25~75 cm 范围内下切量明显高于前 2 次降雨。间断降雨模式下坡面变化过程

为:前缘下切→中前缘下切→前缘及中部下切。

连续降雨模式下坡面变化情况见图 8b。降雨前 243 min,坡面主要变化范围为 0~40 cm,按时间先后顺序由前缘向后缘逐渐后退;从 243 min 至试验结束,除 0~40 cm 范围坡面持续后退外,在 50~80 cm

范围内坡面也出现变化。产生这种变化的主要原因在于在此位置的坡面产生了 1 条斜向细沟。在连续降雨模式下,坡面存在持续水流,坡面主要变化区间为 0~40 cm,其他区域变化不明显。连续降雨坡面变化过程表现为前缘逐渐后退。



2.6 降雨模式对不同位置土壤流失率的影响

坡体土壤流失速率在空间分布上存在不均匀性。单位时间内坡体表面一点竖直方向高度变化可反映此时间内的土壤流失速率。本文在水平方向间隔 20 cm,分别计算在不同降雨模式下坡面土壤流失速率。计算公式为:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$
 (2)

式中: v 为平均土壤流失速率(cm/min); Δl 为剖面计算点竖向坐标差(cm); Δt 为对应剖面的时间差(min)。

2 种降雨模式下,坡面不同部位平均土壤流失速率

见图 9。2 种降雨模式下,土壤流失速率均由边坡前缘至后缘逐渐降低。间断降雨由前缘最高 0.046 cm/min 降至后缘 0.012 cm/min;连续降雨由前缘最高 0.063 cm/min 降至后缘最高 0.014 cm/min。出现该现象的主要原因是坡面径流由边坡后缘来水与降雨共同补给,同时侵蚀产生的泥沙也跟随径流流动,造成越靠近边坡前缘,径流侵蚀坡面能力越强。同一竖直面,随着时间的增加,间断降雨边坡前 60 cm 土壤流失速率较为均匀,连续降雨土壤流失速率则逐渐增加;边坡后 40 cm 2 种降雨模式土壤流失速率均逐渐降低。

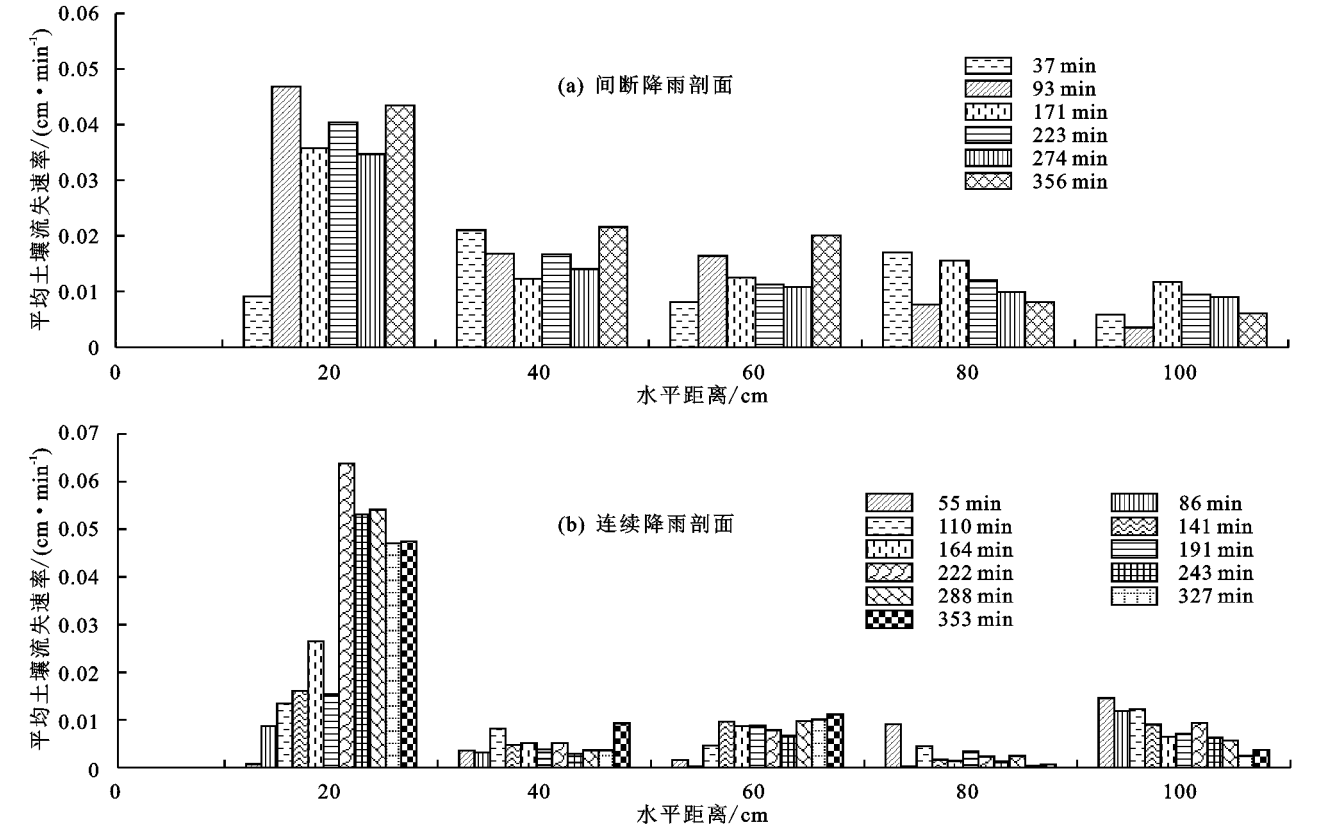


图 9 2 种降雨模式下坡面不同部位土壤流失速率

3 结 论

(1)连续三维激光扫描可直观反映黄土边坡坡面侵蚀动态过程;采用自然邻点插值法生成数字高程模型的误差最小。

(2)边坡 0—5 cm 土壤平均入渗速率为 0.2 cm/min;间断降雨坡体受水分蒸发影响,体积含水率呈周期性波动,进而促进坡面侵蚀的发展。

(3)相同试验时间内,间断降雨所产生的土壤流失总量(0.035 6 m³)大于连续降雨所产生的土壤流失总量(0.024 9 m³);土体未饱和时土壤流失总量呈非线性增加,饱和后呈线性增加;间断降雨土壤流失过程可看作多个连续降雨土壤流失过程的组合;2 种降雨模式下,土壤流失速率在空间上分布不均,由前缘至后缘逐渐降低。

(4)间断降雨下,坡面侵蚀发生于坡面中部至前缘,其过程为:前缘下切→中前缘下切→前缘及中部下切;连续降雨坡面变化区域集中于前缘,表现为前缘逐渐后退。

参考文献:

[1] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J].*Geomorphology*,2012,138(1): 404-414.

[2] 郑粉莉.黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J].*土壤学报*,1998,35(1):95-103.

[3] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].*农业工程学报*,2018,34(6):160-167.

[4] 黄晓虎,王常明,宋朋燃,等.黄土边坡降雨侵蚀特征的物理模拟试验研究[J].*工程地质学报*,2015,23(4):725-730.

[5] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J].*农业工程学报*,2012,28(7):144-149.

[6] 吴冰.黄土坡面片蚀动力学过程试验研究[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2018.

[7] 李小华,曹月娥,杨建军.人工模拟降雨条件下伊犁河流

域黄土区土壤侵蚀试验分析[J].*水土保持学报*,2016,30(1):36-40.

[8] 吴谦,王常明,宋朋燃,等.黄土陡坡降雨冲刷试验及其三维颗粒流流—固耦合模拟[J].*岩土力学*,2014,35(4): 977-985.

[9] 李军鹏,董卫国,孟惠芳,等.降雨条件下坡面细沟侵蚀模型及临界坡度研究[J].*灾害学*,2016,31(1):207-212.

[10] 韩勇.侵蚀性降雨雨型对黄土区浅沟坡面侵蚀特征的影响[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.

[11] 张新和.黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2007.

[12] Cheng H, Zou X Y, Wu Y Q, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J].*Soil and Tillage Research*,2007,94(1):4-14.

[13] 徐锡蒙,郑粉莉,覃超,等.黄土丘陵沟壑区浅沟发育动态监测与形态定量研究[J].*农业机械学报*,2019,50(4):274-282.

[14] Wu H Y, Xu X M, Zheng F L, et al. Gully morphological characteristics in the loess hilly-gully region based on 3D laser scanning technique[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2018,43(8):1701-1710.

[15] 冯林,李斌兵.利用无人机倾斜影像与 GCP 构建高精度侵蚀沟地形模型[J].*农业工程学报*,2018,34(3):88-95.

[16] Smith M W, Vericat D. From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2015,40(12):1656-1671.

[17] 李俊利,李斌兵,柳方明,等.利用照片重建技术生成坡面侵蚀沟三维模型[J].*农业工程学报*,2015,31(1): 125-132.

[18] 张鹏,郑粉莉,王彬,等.高精度 GPS、三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J].*水土保持通报*,2008,28(5):11-15.