

基于三维激光扫描技术的喀斯特地表微地形特征及其侵蚀响应

张思琪¹, 马芊红¹, 朱 彤¹, 顾再柯², 张科利¹

(1.北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 2.贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

摘 要:为了探究喀斯特黄壤坡面微地形变化特征及其与土壤侵蚀的关系,基于人工模拟降雨试验,结合三维激光扫描技术,分析了坡面地表粗糙度和坑洼体积的变化特征及其与土壤侵蚀的响应关系。小区坡度 25°,共有 3 种雨强(30,60,90 mm/h)和 4 种块石出露度(0,5.4%,13.1%,42.9%)处理。结果表明:(1)坡面块石出露在小雨强下(30 mm/h)可明显促进产流,产流时间较裸土坡面提前 18.0%~57.2%,但大雨强下的影响被弱化。产流产沙随块石出露度的增大呈先增后减,最大值处块石出露度在小雨强和大雨强下分别为 5.4%~13.1%和 13.1%~42.9%。(2)裸土坡面地表粗糙度和坑洼蓄积量由坡上到坡下呈递增趋势,而块石出露坡面地表粗糙度沿坡面的分布规律不明显,坑洼蓄积量总体上也表现为由坡上到坡下逐渐增大。相同雨强下,块石出露坡面地表粗糙度较雨前的变幅大于裸土坡面,坑洼蓄积量较雨前增大的倍数随块石出露度的增大而减小。(3)当块石出露度小于 42.9%时,坑洼体积与产流率、产沙率有良好的线性关系。地表微地形因子可作为侵蚀结果预测的重要参数,也可为特大暴雨事件中漏测数据的补充提供理论基础。

关键词:喀斯特;模拟降雨;三维激光扫描;微地形;块石出露

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0008-07

Micro Topography Characteristic of Karst Slope and Its Response to Soil Erosion Based on 3D Laser Scanning Technique

ZHANG Siqu¹, MA Qianhong¹, ZHU Tong¹, GU Zaike², ZHANG Keli¹

(1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002, China)

Abstract: To explore the variation of micro topography condition and its relationship with soil erosion on slope of yellow soil in karst region, we analyzed the variation of surface roughness and depression storage as well as its response to soil erosion by means of simulated rainfall experiments and 3D laser scanning technology. The experiments were all implemented on the plots with 25° slope gradient. Three levels of rainfall intensity (30,60,90 mm/h) and four grades of boulder outcropping (0,5.4%,13.1%,42.9%) were designed as the treatments in experiments. The results show that: (1) under the light rainfall with intensity of 30 mm/h, the existence of boulder outcropping could promote runoff initiation, and the runoff-yielding time was brought forward by 18.0%~57.2%. However, this phenomenon was not obvious under heavy rainfalls. The production of surface runoff and soil loss tended to increase and then decrease with the increase of boulder outcropping; in light (30 mm/h) and heavy rainfall cases (60,90 mm/h), the production of surface runoff and soil loss reached the maximum when the boulder outcropping was in the range of 5.4%~13.1% and 13.1%~42.9%, respectively; (2) the surface roughness and depression storage tended to increase from the top to the bottom of the non-boulder outcropping slope. However, the distribution of surface roughness along the boulder outcropping slope was in a random. On the whole, the depression storage also tended to

收稿日期:2020-08-20

修回日期:2020-09-21

资助项目:国家自然科学基金重点项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748)

第一作者:张思琪(1997—),女,贵州纳雍县人,硕士,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:1134398589@qq.com

通信作者:张科利(1962—),男,陕西宝鸡人,教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:keli@bnu.edu.cn

increase from the top to the bottom along the boulder outcropping slope. Under the same rainfall effect, the variation amplitude of surface roughness on boulder outcropping slope was greater than that of non-boulder outcropping slope. Compared with before the rain, the multiple of depression storage decreased with the increase of boulder outcropping; (3) there were good linear relationships between depression storage and runoff and sediment rate when the boulder outcropping was less than 42.9%. Surface micro topography factors can be regarded as the important parameters for soil erosion prediction, and can provide theoretical basis for the supplement of missed data in heavy rainstorm events.

Keywords: karst; simulated rainfall; 3D laser scanning; micro topography characteristics; boulder outcropping

地表微地形是指在一定尺度范围内地表微地貌的随机性和不规则性^[1],可作为地表起伏变化和侵蚀程度的重要指标^[2-3]。地表微地形会随雨滴击溅和径流剪切引起的土壤分离、泥沙搬运等侵蚀过程发生变化。同时,微地形的变化反过来也会影响径流的形成过程和产流量,进而影响侵蚀类型的发展演化及侵蚀结果^[4-5]。降雨前后地表微地形的变化同产流产沙一样,对于理解土壤侵蚀机理和分析侵蚀特征具有重要作用。目前,国内外学者主要是通过微地形因子的量化来表征地表微地形,从而分析微地形与土壤侵蚀间的关系。常用的微地形因子有地表粗糙度、地形起伏度、地表切割度和坑洼蓄积量^[6]。其中,地表粗糙度可用于描述由耕作管理或侵蚀引起地表高低起伏的微地形特征^[7]。吴发启等^[8]将地表粗糙度定义为地表在比降梯度最大方向上凹凸不平的状态或起伏状况。相关研究发现,地表粗糙度对侵蚀的影响表现出促进和阻滞两种特性:一方面,粗糙地表抗蚀性强,坑洼面积大,地表蓄水能力强,可有效促进水分入渗^[9],从而延缓径流形成^[10],削弱径流的侵蚀动力;另一方面,地表粗糙度的增大会促进水流的横向汇集,增大地表径流的潜在冲刷力,更易发生细沟侵蚀^[11]。地表粗糙度随降雨过程的进行会不断的变化,因此,分析地表微地形的变化有助于更好地理解坡面侵蚀过程。

中国西南喀斯特地区是世界上面积最大的喀斯特连续分布带。区内土层浅薄,地形破碎,大面积基岩裸露,水土流失严重,人地矛盾极为尖锐^[12]。开展喀斯特地区坡面土壤侵蚀研究对区域生态建设及水土资源合理利用具有重要价值。与其他侵蚀严重区相比,由于基岩出露普遍,喀斯特坡面形态更为复杂,微地形空间变异更大。现有喀斯特地区坡面土壤侵蚀研究多集中于坡面产流产沙的影响因素、过程及地表地下侵蚀特征分析^[13-15],对地表微地形与土壤侵蚀的关系研究较少。在区域尺度上,赵斯琦^[16]和王恒松等^[17]分别利用遥感影像数据和野外实地监测数据

分析地形因子对土壤侵蚀的影响。在小生境条件下,殷清慧等^[18]按坡形将微地形分为凸形、凹形和直形坡,得到微地形与土壤侵蚀显著相关的结论。在坡面尺度上,Li 等^[19-20]开展了人工模拟降雨条件下含砾石坡面地表粗糙度对土壤侵蚀的影响研究,但由于砾石很小且是混合在土壤中的,与喀斯特石漠化坡面大块基岩出露土壤特征大不相同。目前对喀斯特基岩出露坡面水蚀过程中的微地形变化及其与土壤侵蚀的关系研究未见报道。鉴于此,本文通过人工模拟降雨试验,结合三维激光扫描技术,选取地表粗糙度和坑洼蓄积量两个微地形因子,探讨喀斯特地区不同块石出露度坡面微地形因子的变化及其与土壤侵蚀的关系,旨在明确喀斯特块石出露坡面产流产沙特征及地表微地形对降雨的响应。研究结论可为喀斯特地区坡面侵蚀规律研究和水土流失防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 小区布设

本试验于 2019 年 7 月到 9 月在贵州省龙里水土保持科技示范园石漠化径流小区开展,共设计 4 个不同块石出露程度的径流小区。试验小区于 2000 年在天然坡面的基础上用水泥修建的,小区边壁高出土面 40 cm,土壤厚度约 1 m。坡面块石是在研究区野外坡面,经过调查筛选后,选择适宜的石块搬运至小区。根据野外喀斯特石漠化坡面基岩出露特征,将形状不规则、体积不等的石灰岩块石随机布设,埋入小区表土 50 cm 之下,块石出露高度 10~40 cm,坡面块石数量分别为 0,7,25,54 块。通过三维激光扫描得到坡面 DEM 数据,利用 ArcGIS 10.2 数字化及统计功能,测算小区块石的出露面积,分别占小区垂直投影面积的 0,5.4%,13.1%,42.9%,其中裸土小区为对照小区。各小区坡度均为 25°,水平投影面积为 10 m×2.2 m,土壤类型为黄壤,土壤容重为 1.16 g/cm³,土壤质地为粉壤土,黏粒含量为 6.02%,粉粒含量 50.89%,砂粒含量 43.10%。



径流小区实拍

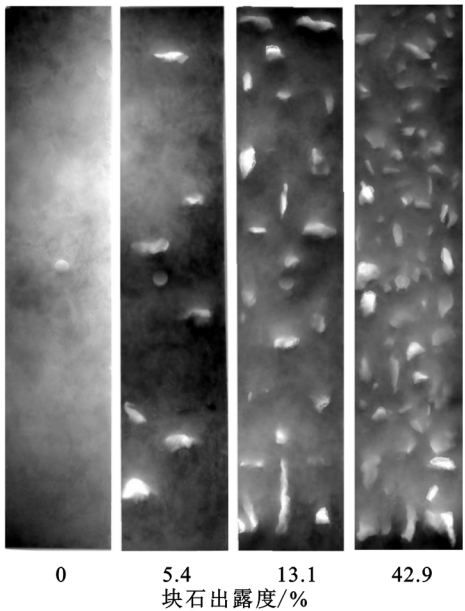


图 1 坡面径流小区实拍及三维建模

1.2 试验设计

人工模拟降雨设备由 8 台 Meyer 槽式摆动下喷人工模拟降雨机组组合而成,有效降雨高度 2.55 m,雨滴均匀度>80%,雨滴降落地表的速度达到天然降雨的终点速度。试验共设计 30,60,90 mm/h 3 个雨强,为保证每场试验降雨侵蚀力相同,降雨量均为 30 mm。为消除前期土壤含水量的影响,每场降雨试验开始前用小雨(雨强 5 mm/h)预湿润小区 30 min,覆上塑料布静置 12 h,保证土壤剖面中水分分布特征相同。降雨试验开始后,观察集流槽出水口处出现串状水流立即记录产流时间。坡面产流结束后,用精度为 1 mm 的尺子分别量测分流桶(7 孔分流)和集流桶的水位 3 次,取平均值,计算总产流量和产流率。用 1 000 ml 采样瓶收集分流桶和集流桶中各 2 个浑水样,用饭盒收集集流槽内的泥沙,静置 2~3 d 后,倒掉上层清液,将剩余的泥沙放入饭盒中置于 105℃ 的烘箱中烘干 24 h,计算总产沙量和产沙率。每场降雨试验结束后,在附近农地取土,回填小区至最初的地表条件,回填土与小区原始土壤性质相同。

1.3 三维激光扫描

本研究采用的设备为手持式三维激光扫描仪(Creaform Handy SCAN 700),由加拿大 Creaform 公司生产,其工作原理为将插座插入电源并连接到 USB 电缆,USB 一端连接到计算机,另一端连接到扫描仪,启动 VXelements 软件设置参数成功后即可开始扫描。扫描仪发射激光到地表,可在计算机上自动生成连续表面,扫描精度高达 0.03 mm,扫描分辨率为 0.05 mm。降雨前获取小区分段的地表点

云数据,待降雨结束后,地表水分完全入渗,地面无积水时,再次进行扫描。在保证点云数据质量且能清晰地表示坡面侵蚀形态结构特征的前提下,将扫描精度设定为 2 mm。在扫描过程中,应避免光线太强或太弱,保证数据精度。由于设备故障,未能获取块石出露度为 42.9%小区 90 mm/h 场次降雨后的地表点云数据,因此共获得 15 个地表点云数据,即各小区降雨前及每次降雨后的坡面点云数据。

1.4 数据处理

采用 Geomagic Wrap 软件对扫描的点云数据进行拼接、粗对齐、去噪等初始处理,并建立在同一坐标系下生成坡面点云数据。将处理后的点云数据导入 Cloud Compare 软件中进行精确对齐,再导入 ArcGIS 10.2 软件,创建 TIN 文件后,转换为分辨率 1 mm×1 mm 的栅格 DEM 数据,据此对坡面微地形进行定量分析。利用 ArcGIS 10.2 提取地表粗糙度、坑洼蓄积量指标来表征坡面微地形^[21]。

(1) 地表粗糙度是地表起伏状况和侵蚀程度的度量因子,可用地表单元的曲面面积与其投影面积的比值来表示。

$$R=1/\cos(S\times\pi/180) \tag{1}$$

式中:S 为坡度(°)。

(2) 坑洼蓄积量指坡面洼地被填满需要的雨水体积。运用 J&D 算法对原始 DEM 进行填洼,得到无洼地 DEM,将无洼地 DEM 减去原始 DEM,计算均值,再乘以小区的面积得到坑洼蓄积量,单位为 L。

(3) 产流产沙特征参数计算。

$$R_r=V/(A\cdot t) \tag{2}$$

$$S_r=W/(A\cdot t) \tag{3}$$

式中: R_r 为产流率 $[L/(m^2 \cdot h)]$; V 为次降雨总产流量 (L) ; S_r 为产沙率 $[kg/(m^2 \cdot h)]$; W 为次降雨总产沙量 (kg) ; A 为小区面积 (m^2) ; t 为降雨时长 (h) 。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙特征

坡面产流产沙特征见表 1,同一坡面产流时长均随着雨强的增大而减小。降雨前的预湿润过程保证小区坡面前期含水量一致,由于坡面土壤入渗能力一定,雨强越大,越容易达到土壤的入渗能力,则所需的产流时间越短。块石出露度指在垂直投影下坡面块石出露的面积占径流小区面积的百分比。在 30 mm/h 雨强下,裸土坡面的初始产流时间大于块

石出露坡面,这是由于坡面块石的出露增大了不透水面积,使得坡面容许入渗面积减小,更有利于产流,所以产流时间较短,块石出露坡面比裸土坡面产流时间提前 18.0%~57.2%。在 60 mm/h 雨强下,各块石出露度坡面初始产流时长较 30 mm/h 雨强有大幅度的减小,减小幅度在 33.5%~64.7%。当雨强增大至 90 mm/h 时,不同块石出露度坡面的初始产流时长较 60 mm/h 有小幅度的降低,减小幅度在 21.1%~36.4%。这是由于在大雨强下坡面的产流方式由蓄满产流转变为超渗产流,单位时间内坡面接收的雨水量超过土壤的入渗能力,此时坡面出露块石的不透水性对产流的影响弱化,因此坡面能快速产流且不同块石出露度坡面的产流时长差异较小。

表 1 块石出露坡面产流产沙特征

雨强/ (mm · h ⁻¹)	块石 出露度/%	初始产流 时长/min	产流率/ (L · m ⁻² · h ⁻¹)	产沙率/ (kg · m ⁻² · h ⁻¹)	总产流量/ L	总产沙量/ kg
30	0	4.67	10.49	1.00	230.88	22.09
	5.4	2.33	15.68	2.13	344.98	46.77
	13.1	3.83	15.13	1.77	332.80	38.86
	42.9	2.00	8.02	0.91	176.38	19.98
60	0	1.65	26.61	3.05	292.68	33.55
	5.4	1.14	36.91	4.06	406.02	44.71
	13.1	1.42	41.61	4.59	457.76	50.49
	42.9	1.33	22.69	2.72	249.59	29.96
90	0	1.05	48.37	6.01	351.17	43.65
	5.4	0.83	67.50	7.23	490.08	52.52
	13.1	1.12	72.90	9.11	529.26	66.17

块石的出露既能促进汇流同时又会削减径流的能量,从而改变坡面的侵蚀过程。在小雨强下,少量的块石出露对于坡面汇流主要表现为促进作用,使得坡面径流的集中程度更高,对坡面的侵蚀程度更强。然而,当坡面块石出露面积增大到一定程度时,坡面径流的能量因块石的阻挡而被削减,此时坡面块石对于径流的作用主要表现为拦截作用,增加入渗,延缓地表径流的流速,可在一定程度上减弱土壤侵蚀。在 30 mm/h 雨强下,坡面产流率、产沙率、总产流量和总产沙量随块石出露度的增大先增后减,且拐点处块石出露度为 5.4%。当雨强增大至 60,90 mm/h 时,雨滴能量增大,径流剪切力极大的增强,即使坡面块石出露度达 13.1%时,坡面径流仍能克服岩石阻力做功,携带大量的泥沙流出小区。据试验现场观察发现,在大雨强条件下,13.1%块石出露度坡面细沟发育程度较高,入渗量减少,坡面产流量和产沙量值较大。但当块石出露度达到 42.9%时,在各个雨强条件下,产流率、产沙率、总产流量和总产沙量都大幅减小。这是由于当块石出露度较小时,坡面微地貌较为完整,此时地表径流所受到的阻力较小,且坡面可供侵

蚀的面积大,然而当块石出露度增加到 42.9%时,坡面大量的块石出露使得地表微地形破碎程度高,极大地分散了径流的能量,促进泥沙的沉积。同时土石软硬界面大大增加,促进入渗,减少地表径流。由于块石出露程度高,坡面可供侵蚀的面积小,此时出露块石对土壤的保护作用远超过径流对土壤的冲刷作用,因而在一定程度上也限制了坡面的产沙量^[22]。

2.2 坡面微地形特征

2.2.1 全坡面微地形变化特征 地表粗糙度能够反映坡面微地形起伏状况,坑洼蓄积量的产生是由于坡面地表有起伏,坑洼处具有一定的蓄水能力,因此坑洼蓄积量与地表粗糙度关系密切。降雨前后地表粗糙度和坑洼蓄积量的变化是降雨以及坡面径流泥沙搬运的结果,可有效表征坡面侵蚀形态的变化特征。坡面地表粗糙度和坑洼蓄积量变化情况见图 2,地表粗糙度随块石出露度的增大而增大。经历 30,60,90 mm/h 降雨后,随块石出露度的增大,坡面地表粗糙度较降雨前的变幅分别为 0.01%~4.55%,1.53%~8.46%,3.97%~16.55%,3.89%~15.68%。坑洼蓄

积量变化趋势与地表粗糙度相似,但变化幅度大于地表粗糙度。在 30,60,90 mm/h 雨强下,坑洼蓄积量在裸土坡面为 17.77~52.63 L,较降雨前增加 20.67~63.18 倍;在 5.4% 块石出露度坡面为 27.47~55.24

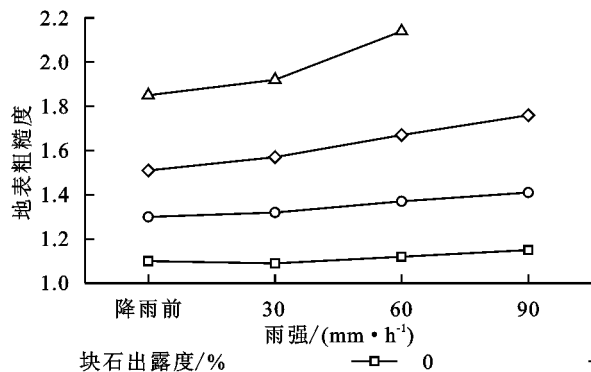
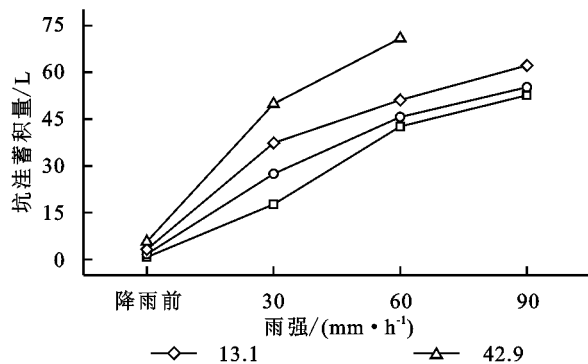


图2 全坡面地表粗糙度和坑洼蓄积量变化特征

由于小雨强(30 mm/h)条件下雨滴动能小,对坡面的打击力度小,坡面上方出现鳞片状小坑,坡面形成的薄层水流搬运能力弱,细沟发育不明显。当雨强增大至 60 mm/h 及以上时,雨滴对坡面的打击能力增强,径流能量增大,坡面细沟发育程度提高,细沟的下切和横向作用增强,坡面地形起伏度增大,地表蓄水能力增强,因此地表粗糙度和坑洼蓄积量相对于降雨前的增幅随雨强的增大而增大。相同降雨条件下,裸土坡面粗糙度增幅小于有块石出露的坡面,这可能是由于裸土坡面径流较为分散,侵蚀动力弱,而在有块石出露的坡面,块石的拦截作用使得径流比较集中,径流能量大,搬运能力强,因此整个坡面地表粗糙度较降雨前的变幅比裸土坡面稍大。坡面块石出露使得地表微地形破碎程度提高,土壤与块石相间分布,微地形起伏度较大。降雨前坡面坑洼蓄积量随块石出露度的增大分别为 0.82,1.73,3.25,5.75 L,块石出露坡面坑洼蓄积量分别为裸土坡面的 2.11,3.96,7.01 倍。降雨过程中块石对径流的聚集作用使得块石间形成临时的局部洼地,可储蓄一定的水量,因此相同雨强下,坑洼蓄积量随坡面块石出露度的增大而增大,但与降雨前相比,其增幅随块石出露度的增大而减小。

2.2.2 不同坡位微地形及其变化特征 图3表示不同坡位地表粗糙度和坑洼蓄积量的变化。由图3可以看出,裸土坡面地表粗糙度沿坡上到坡下逐渐增大,不同坡位地表粗糙度较降雨前的变化有所差异。坡上、坡中、坡下地表粗糙度较降雨前的变幅,在 30 mm/h 雨强下分别为 -2.72%,0.93%,0.91%,在 60 mm/h 雨强下分别为 -0.90%,3.70%,4.54%,在 90 mm/h 雨强下分别为 0.91%,5.56%,9.09%。对于有块石出露的坡面来说,由于出露块石随机分散布设,使得地表粗糙度沿坡面的变化受块石出露的主导

L,较降雨前增加 14.88~30.93 倍;在 13.1% 块石出露度坡面为 37.38~62.21 L,较降雨前增加 10.50~18.14 倍;在 42.9% 块石出露度坡面为 49.86~70.89 L,较降雨前增加了 7.67~11.32 倍。



作用较强,结合图1可以看出,不同坡位地表粗糙度与该坡位块石出露情况密切相关。总体上块石出露坡面不同坡位地表粗糙度较降雨前的变幅大于裸土坡面。如块石出露度 5.4% 坡面的坡上、坡中、坡下地表粗糙度较降雨前的变幅在 30 mm/h 雨强下分别为 4.31%,3.28%,3.20%,在 60 mm/h 雨强下依次为 14.66%,5.74%,1.60%,在 90 mm/h 雨强下依次为 12.07%,9.83%,12.00%。不同块石出露度坡面地表粗糙度沿坡面的变化与主要与该坡面块石分布情况有关。块石出露度 13.1% 坡面的坡上、坡中、坡下地表粗糙度较降雨前的变幅在 30 mm/h 雨强下分别为 9.87%,4.80%,0.63%,在 60 mm/h 雨强下依次为 12.50%,8.00%,1.25%,在 90 mm/h 雨强依次为 15.13%,14.40%,8.17%。相比于 5.4% 块石出露度坡面,总体上 13.1% 块石出露度坡面在相同雨强下地表粗糙度变幅在坡上和坡中部较大,在坡下部较小。这是由于块石出露度 13.1% 坡面的坡下方块石出露高度和面积大,对于上方来水来沙的拦截作用强,促进泥沙在坡下方的沉积,因此地表粗糙度变幅较小。

当降雨发生后,坡面上部位于坡面的集水区,主要是发生雨滴击溅侵蚀,土壤团聚体被破坏,地表夯实,地面的光滑程度有所提高;在雨滴打击和径流冲刷的共同作用下,坡中侵蚀强度增大,微地形起伏程度较降雨前有所增大;坡下部位的汇水面积大,径流剪切力大,径流量和流速远大于坡面上部,坡面细沟优先在坡面下部形成,并随降雨过程的进行不断向坡上部延伸^[23]。细沟的形成,增大地表粗糙度,同时部分较大的土块在坡下部沉积也会增大地形起伏度,因此裸土坡面地表粗糙度沿坡上到坡下呈逐渐增大的趋势。相比于裸土坡面,块石出露度 13.1% 的坡面坡上部的基岩出露度较高,在降雨过程中使坡

面产流时间提前,产流位置上移,因此坡上部的地表粗糙度变幅较裸土坡面大。坡面坑洼蓄积量与地表粗糙度密切相关,地表起伏程度增大,坡面蓄水能力增强,相同降雨条件下,各块石出露度坡面坑洼蓄积量总体上也表现为由坡上到坡下逐渐增大。从图 3 中可发现一个特殊情况,即块石出露度 13.1% 的坡面

在 60 mm/h 和 90 mm/h 雨强下,坡中的坑洼蓄积量大于坡下。据现场观察主要是坡中部横向分布的块石对于径流的拦蓄作用使径流的运移路径集中分布于块石两侧,由于集中径流的能量大,在岩石两侧的下方形形成较大的侵蚀穴,从而使得坡中的坑洼蓄积量大于坡下。

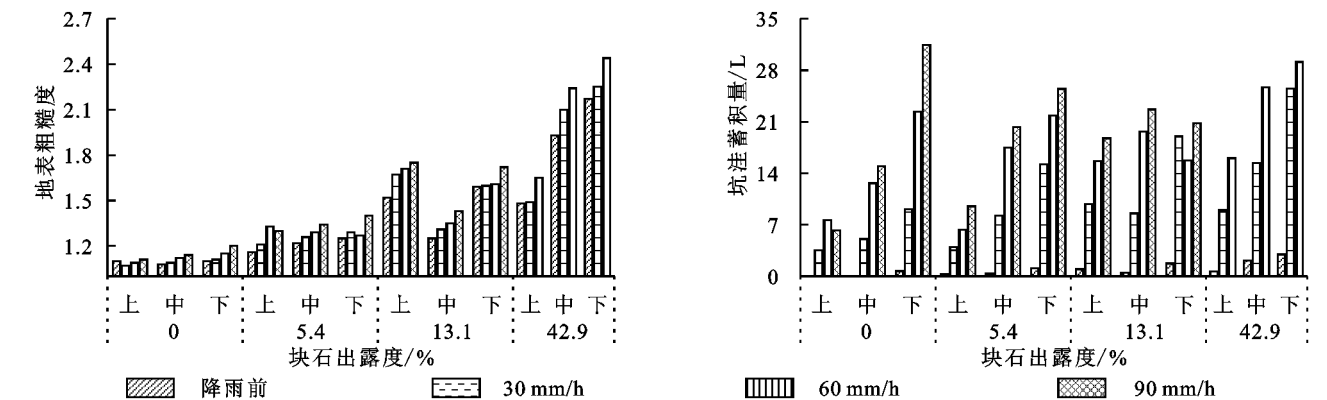


图 3 不同坡位地表粗糙度和坑洼蓄积量变化特征

2.3 微地形变化与产流产沙的关系

由前面的分析可知,坑洼蓄积量可在一定程度上反映坡面的侵蚀结果。通过相关分析得到坑洼蓄积量与坡面产流率、产沙率显著相关($R^2 > 0.90$, $p < 0.05$),因此可将各块石出露度坡面次降雨后坡面坑洼蓄积量与产流率、产沙率进行回归拟合,分析微地形与产流产沙间的关系。将 4 个坡面数据全部参与拟合时,与坑洼蓄积量拟合关系很差,方程不显著,这是由于当块石出露度增大到 42.9% 时,坡面微地形极为破碎,产流率和产沙率的变化都出现拐点,侵蚀规律与低石漠化坡面不同。当剔除块石出露度 42.9% 坡面数据后,将各次降雨结束后坡面坑洼蓄积量与产流率、产沙率进行回归分析,拟合结果良

好,结果见图 4。坑洼蓄积量和产流率、产沙率呈线性关系,坑洼蓄积量与产流率的关系式为 $y = 1.47x - 26.70$ ($R^2 = 0.81$);坑洼蓄积量与产沙率的关系式为 $y = 0.17x - 3.29$ ($R^2 = 0.80$)。径流作为坡面侵蚀的动力和泥沙运移的载体,对坡面微地形的演化具有重要影响。当坡面产流后,径流运移过程中会携带泥沙流出小区,从而增大坡面的地形起伏度。尤其在大雨强下,雨滴的打击密度和径流强度增大,坡面的土块更易被击散和搬运,坡面细沟发育程度提高,产流率和产沙率增大,坡面坑洼处的面积增大,地表蓄水能力增强。由此可以看出,坑洼蓄积量可作为坡面侵蚀结果预测的一个重要参数。

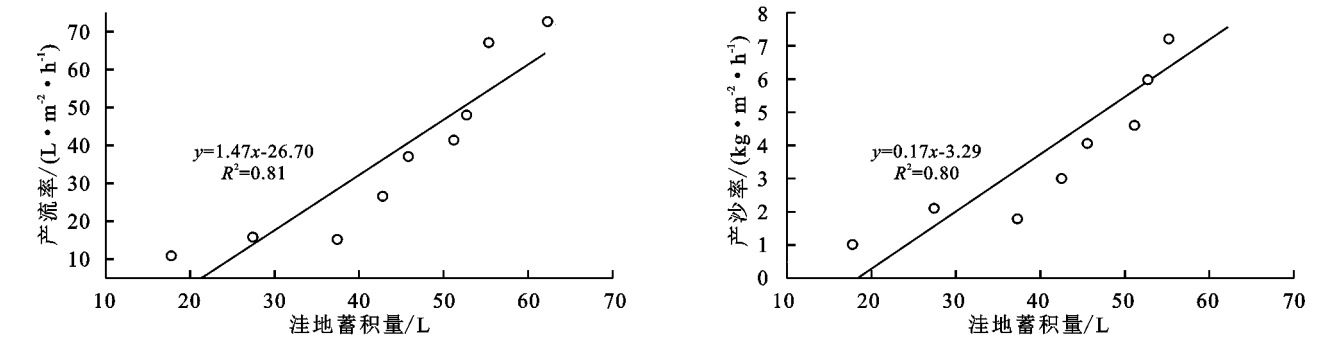


图 4 坑洼蓄积量与产流率、产沙率的关系

根据熊康宁^[24]、蒋忠诚^[25]等以裸岩率划分石漠化强度等级标准的结果,认为裸岩率至少达 30% 时坡面才算发生轻度石漠化。本研究中块石出露度为 42.9% 时坡面坑洼蓄积量和产流率、产沙率的关系不好,可能是因为喀斯特石漠化坡面地形高度破碎,土层不连续,坡面的产流产沙过程较为复杂,

因此无石漠化或潜在石漠化坡面所得结果在石漠化程度较高的坡面并不适用。由于条件限制,在本次试验中设置的 4 个块石出露度均小于 50%,未达到严重石漠化程度,在今后的试验中,应考虑增设更高的块石出露度坡面以深入探讨喀斯特石漠化坡面土壤侵蚀机理。

3 结论

(1) 块石出露在小雨强下可促进产流,明显缩短产流时间,但在大雨强下对坡面产流时间的影响不明显。相同降雨条件下坡面产流率和产沙率随块石出露度的增大先增后减,最大值处块石出露度在 30 mm/h 雨强下为 5.4%~13.1%,在 60 mm/h 和 90 mm/h 雨强下为 13.1%~42.9%。

(2) 裸土坡面地表粗糙度和坑洼蓄积量由坡上到坡下逐渐增大,块石出露坡面地表粗糙度沿坡面的变化与块石的出露分布情况有关。总体上,块石出露坡面不同坡位地表粗糙度较雨前变幅大于裸土坡面,坑洼蓄积量整体沿坡上到坡下逐渐增大。同一雨强下,块石出露坡面地表粗糙度较雨前的变幅大于裸土坡面,坑洼蓄积量较雨前增大的倍数随块石出露度的增大而减小。

(3) 当坡面块石出露度小于 42.9%时,坑洼体积变化与坡面产流率和产沙率有良好的线性关系,可以通过测定坑洼体积来估算坡面侵蚀量。这一结果对特大暴雨过程中常规方法出现漏测时的数据补救提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 郑子成,吴发启,何淑勤,等.片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J].土壤学报,2011,48(5):931-937.
- [2] 郑子成.坡面水蚀过程中地表糙度的作用及变化特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [3] 朱良君,张光辉.地表微地形测量及定量化方法研究综述[J].中国水土保持科学,2013,11(5):114-122.
- [4] 张青峰,王健,赵龙山,等.基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.
- [5] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.
- [6] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报,2019,27(10):1587-1595.
- [7] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
- [8] 吴发启,赵晓光,刘秉正.地表糙度的量测方法及对坡面径流和侵蚀的影响[J].西北林学院学报,1998,13(2):15-19.
- [9] Zhao L S, Hou R, Wu F Q, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. Soil

and Tillage Research, 2018,179:47-53.

- [10] Ding W F, Huang C H. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution[J]. Geomorphology, 2017,295:801-810.
- [11] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4):400-409.
- [12] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [13] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. Catena, 2017,152:218-226.
- [14] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸土坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013,27(5):12-16.
- [15] 纪启芳,张兴奇,张科利,等.贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J].水土保持研究,2012,19(4):1-5.
- [16] 赵斯琦.基于多尺度 DEM 的喀斯特地区土壤侵蚀地形因子研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [17] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.
- [18] 殷清慧,谢世友,蔡先立.喀斯特石漠化皆伐迹地不同微地形和小生境下的土壤侵蚀差异[J].水土保持通报,2019,39(4):44-47.
- [19] Li L, Nearing M A, Nichols M H, et al. Temporal and spatial evolution of soil surface roughness on stony plots[J]. Soil and Tillage Research, 2020,200.DOI:10.1016/j.still.2019.104526.
- [20] Li L, Nearing M A, Polyakov V O, et al. Evolution of rock cover, surface roughness, and its effect on soil erosion under simulated rainfall[J]. Geoderma, 2020, 379.DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114622.
- [21] 张磊.基于核心地形因子分析的黄土地貌形态空间格局研究[D].南京:南京师范大学,2013.
- [22] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena, 1992, 19(5):451-474.
- [23] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报,2019,35(9):114-120.
- [24] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感 GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [25] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清.广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M].北京:科学出版社,2011.