

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.036

崩岗崩积体坡面糙度及其与侵蚀方式的耦合影响研究

廖义善^{1,2} 卓慕宁^{1,3} 唐常源² 谢真越^{1,3} 袁再健^{1,3} 李定强^{1,3}

(1. 广东省生态环境技术研究所, 广州 510650; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;
3. 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650)

摘要: 崩岗崩积体是崩岗的主要沙源地。基于人工模拟降雨试验及三维激光扫描技术, 研究崩岗崩积体坡面侵蚀过程。研究表明: 利用三维激光扫描的点云数据能定量分析降雨前后坡面水蚀特征。全坡面及各坡位均为片蚀总量大于细沟侵蚀总量, 但各坡位的侵蚀强度有所差异, 其细沟侵蚀强度由大到小表现为下坡、中坡、上坡, 片蚀强度由大到小表现为上坡、中坡、下坡。坡面空间糙度由大到小大致呈现下坡位、中坡位、上坡位, 坡面侵蚀方式可影响坡面糙度值及变化趋势, 而坡面糙度亦能影响各侵蚀方式的侵蚀强度。整个降雨时段内全坡面侵蚀量最大、产沙量次之, 沉积量最小, 受坡面糙度变化影响, 全坡面侵蚀、产沙量均呈现递减趋势。而上坡位的侵蚀、产沙量无明显变化, 中、下坡位的侵蚀、产沙量呈对数减小趋势。此外, 除上、下坡位沉积量间存在显著差异外, 各坡位间侵蚀量、产沙量均无显著差异。

关键词: 崩岗崩积体; 侵蚀方式; 糙度; 时空分异; 三维激光扫描

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0300-07

Coupling Effects of Slope Roughness and Erosion Pattern on Colluvial Deposits of Benggang

LIAO Yishan^{1,2} ZHUO Muning^{1,3} TANG Changyuan² XIE Zhenyue^{1,3} YUAN Zaijian^{1,3} LI Dingqiang^{1,3}

(1. Guangdong Institute of Eco-environmental Science and Technology, Guangzhou 510650, China
2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
3. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Benggang erosion is an important erosion type, which frequently occurs in Southeastern China. Colluvial deposits of Benggang is an important source of the Benggang sediment. Based on simulated rainfall experiments and three-dimensional (3D) laser scanning, the characteristics of spatial-temporal differentiation of soil erosion processes on the colluvial deposits of Benggang were investigated. An indoor rainfall experiment was conducted with a 30° slope of the Benggang deposit and a rainfall erosion intensity of 3.33 mm/min, which represented a typically higher rain intensity in the study region. Rainfall simulation experiments were conducted in 2016 in the rainfall simulation hall of Laboratory of Red Soil Erosion and Flow Hydraulic in South China in Guangzhou City, Guangdong Province. The results showed that point cloud data from the 3D laser scanning can reflect the characteristics of soil erosion, deposition and sediment yield before and after rainfall events. Total amount of rill erosion, sheet erosion were 0.036 6 m³ and 0.113 5 m³, respectively. Slope position had little influence on sheet erosion, while it had a significant impact on rill erosion. Roughness of soil surface was increased first and then decreased with time during the experiment. The values of roughness of soil surface were in a descending sequence of lower slopes, middle slopes and upper slopes, and it varied with time at different slope positions. Roughness of soil surface on lower and middle slope was increased firstly and then decreased with time

收稿日期: 2017-03-21 修回日期: 2017-06-12

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501047)、广东省自然科学基金研究团队项目(S2012030006144)、广东省科学院引进高层次人才人才专项资金项目(2060599)、省院创新平台建设专项(2016GDASPT-0105、2016GDASPT-0304)和农田重金属污染治理创新人才队伍建设项目(2016B070701015)

作者简介: 廖义善(1980—),男,助理研究员,中山大学博士生,主要从事土壤侵蚀研究,E-mail: ysliao@soil.gd.cn

通信作者: 李定强(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀研究,E-mail: dqli@soil.gd.cn

during the experiment, while it was increased constantly with time on the upper slope. No significant variation of soil erosion on upper slopes occurred with rainfall events. The soil erosion amount and sediment yield were decreased logarithmically with time. The difference of erosion amount between upper and lower slopes was significant, whereas slope positions showed insignificant influence on soil erosion and sediment yield.

Key words: colluvial deposits of Benggang; erosion pattern; soil surface roughness; spatial-temporal differentiation; 3D laser scanning

引言

崩岗是发育在我国南方热带及亚热带低山丘陵区的一种特殊侵蚀地貌^[1],崩岗侵蚀所造成的土壤流失强度远大于面状和沟状侵蚀,其侵蚀模数可高达 $1 \times 10^5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[2],严重威胁崩岗丘陵山区的生态环境安全^[3],被称为我国南方地区的“生态溃疡”^[4]。崩岗主要由崩壁、崩积体和洪(冲)积扇 3 部分组成,其中崩积体是由崩壁土体崩塌后堆积而成,具有土质疏松、粗颗粒含量高、坡度大、易侵蚀等特点^[5],是崩岗产沙的主要源地。目前已开展了降雨、径流、坡度等外部因素对整个崩积体坡面侵蚀影响的研究^[7],但对崩积体降雨侵蚀过程中的侵蚀方式、坡面微地貌变化特征及其之间的耦合关系,还较少关注。

土壤侵蚀方式^[8]、坡面微地貌^[9]变化一直是土壤侵蚀过程研究的重要内容。现一般采用坡面糙度表征微地貌形态^[10],并采用三维激光扫描技术获取高分辨率地貌形态数据^[11]。已有研究证实三维激光扫描技术可有效应用于坡面细沟侵蚀^[12-13]及坡面糙度^[14]研究,为开展坡面侵蚀方式及坡面糙度研究提供了方法上的借鉴。鉴于此,本文在人工降雨条件下,利用三维激光扫描技术,定量分析崩积体坡面侵蚀过程中侵蚀方式与坡面糙度变化特征及其二者的耦合关系,以期研究结果能有助于加深对崩积体坡面侵蚀发育过程的认识,并据此提出行之有效的治理措施。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样采自于广东省五华县华城镇源坑水小流域,其位于东经 $115^{\circ}36'55.3''$,北纬 $24^{\circ}6'1.4''$,属亚热带海洋季风气候区,区域内降雨量大且集中,多年平均日照时数为 $1\,969 \text{ h}$,平均气温 20.5°C ,年平均降雨量 $1\,514.7 \text{ mm}$ ^[15]。该流域为崩岗密集发育区,在将近 5 km^2 的流域内分布有崩岗 64 处。流域内以条形、瓢形崩岗为主,其崩积体坡长相较于弧形崩岗要短,多分布在 5 m 以内,少数能达到 10 m 。所采集土样为花岗岩发育的崩岗崩积体土壤,质地疏

松,结构性差。

1.2 试验条件及试验设计

崩积体侵蚀模拟降雨试验在广东省生态环境技术研究所人工模拟降雨大厅内进行,其可实施的降雨强度范围为 $15 \sim 300 \text{ mm/h}$,降雨均匀度在 85% 以上,有效降雨面积 288 m^2 ,有效降雨高度为 13.4 m ,在加压泵的作用下可使雨滴达到自然降雨终点速度。试验土槽规格(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,坡度调节范围为 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$,土槽尾部设置 V 型汇流口,用于收集降雨含沙径流,土槽底部打孔,可保证土壤水的自由渗透。将采集土样分层填装至土槽中,每层 5 cm ,填土高度 35 cm 。土槽装填完毕后,将其土体表面抹平,并对土槽实施降雨强度为 30 mm/h 的降雨,直至土槽开始产流后停止。由于野外崩积体土体亦并非原状土,故本试验将土槽静置 30 d ,模拟崩岗崩壁崩塌后崩积土体在自然状况下的密实过程。在降雨试验前 2 d 采用环刀测得土壤容重为 $(1.24 \pm 0.05) \text{ g}/\text{cm}^3$,而野外测试的 5 个崩积体土体平均容重为 $(1.24 \pm 0.06) \text{ g}/\text{cm}^3$,两者十分接近。

通过对研究区 2012—2015 年的次降雨过程进行分析发现,区域内短时雨强较大,一般日降雨量主要集中于一个较短的时间段内产生。本试验依据野外调查及相关文献,将崩积体坡度及次降雨量分别设置为 30° 、 $200 \text{ mm}/\text{次}$,其降雨量与五华县 30 年一遇的降雨标准($201 \text{ mm}/\text{d}$)^[15]相近。持续进行 20 场次降雨试验,单次降雨时长为 60 min ,相邻次降雨间隔时间大于 6 h ^[16]。与野外自然降雨对比,其试验后崩积体坡面的微地形,大致相当于野外崩积体坡面历经 3、4 a 自然降雨侵蚀后的微地形。试验主要测定指标:径流量、泥沙量、坡面流速、降雨量。分别将容积为 25 L 的塑料集流桶置于土槽尾部 V 型汇流口处,以收集土槽不同时段内的含沙径流。在坡面产流后的 $0 \sim 1 \text{ min}$ 、 $2 \sim 5 \text{ min}$ 、 $5 \sim 60 \text{ min}$ 时段内,单个含沙径流样的采集时长分别为 1 、 2 、 5 min 。单次降雨试验结束后,用电子称称量各集流桶中含沙径流的质量,经 6 h 以上的沉淀后排掉集流桶上层清液,并再次称量此时集流桶中水沙的质量。然后将其充分搅匀,取其其中的部分水沙样置入铝质饭盒并进行称量,而后放入干燥箱。在 105°C 条件下

将水沙样干燥 6 ~ 8 h 后,称量饭盒中的泥沙质量,再依据集流桶及饭盒中的水沙质量,计算出各含沙径流收集时段内的坡面产流、产沙量。坡面径流流速采用高锰酸钾颜色示踪法。此外,采用索尼(SONY)FDR-AX30 4K 型高清数码摄像机实时拍摄坡面水蚀过程。并在初次降雨前及每次降雨后采用莱卡 HDS3000 型三维激光扫描仪,以 1 mm 间距对崩积体坡面进行扫描。扫描开始时间均为降雨过后 4 h,以保证土壤含水率近似一致。

1.3 数据分析及计算

运用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析,侵蚀量、产沙量、糙度等指标的差异显著性采用方差分析(ANOVA)检验,当各组数据方差齐次时采用 LSD 法,方差不齐次时采用非参数检验方法 Dunnett's T3,两两比较时的显著性水平,为 0.05。变量间的相关关系采用 Pearson 相关统计方法进行分析。三维激光扫描生成的点云数据经去噪处理(消除土槽边界效应)后,导入 ARCGIS 软件生成相应的数字高程模型(Digital elevation model, DEM),并依据靶点坐标将各场次 DEM 统一于同一坐标系统,然后对 DEM 进行空间分析,获取坡面侵蚀、产沙及糙度变化信息。其中次降雨坡面产沙量可通过对降雨前后坡面 DEM 进行相减运算,求取降雨后崩积体坡面的体积变化量,然后乘以所测得土壤容重 1.24 g/cm³ 即得。坡面糙度可基于坡面 DEM 先求出每个栅格的坡度(slope),然后在 ARCGIS 的 Spatial Analyst 菜单下使用 Raster Calculator 工具执行 1/cos(slope * 3.14/180) 算式求取。

2 结果与讨论

2.1 三维激光扫描结果精度分析

如图 1 所示,崩积体次降雨产沙量的实测值与计算值范围分别为 1.74 ~ 25.84 kg 和 0.32 ~ 24.15 kg,计算值与实测值的绝对值平均误差为 25.7%。由于不同次降雨间产沙量计算值此消彼长,增减相抵,其总产沙量实测值与计算值分别为 117.17、117.08 kg,相较于次降雨,其产沙量实测值与计算值更为接近。此外,次降雨产沙量实测值与计算值均呈现较好的 3 次方递减趋势,其中 1 ~ 5 场次降雨产沙量减小趋势明显,其产沙量实测值、计算值分别由第 1 场降雨时的 25.84、24.15 kg 急剧减少至第 5 场降雨时的 5.56、4.12 kg,其后 15 场降雨的产沙量虽存在一定波动,但波动范围不大,整体均呈现较为平稳的下降趋势。崩积体产沙量计算值与实测值间具有显著的正相关关系,其相关系数为 0.976 (N =

20, P < 0.01)。表明,基于三维激光扫描的产沙量计算值及其变化趋势与产沙量实测值及其变化趋势均较为一致,因而可利用三维激光扫描技术近似分析坡面侵蚀、沉积及产沙过程。MILAN 等^[17]的研究结果亦表明三维激光扫描技术具有较高的可信度。

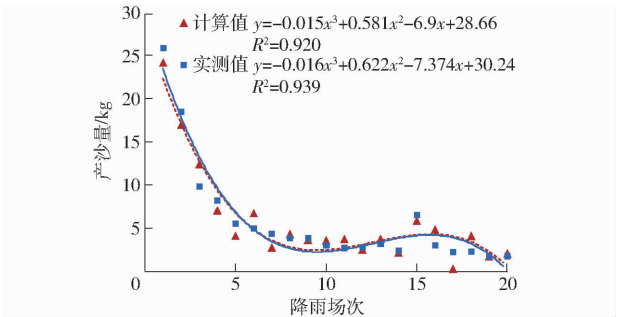


图 1 次降雨产沙量实测值与计算值
Fig. 1 Measured and calculated values of sediment yield during single rainfall

2.2 坡面侵蚀方式变化过程

细沟一般沟深几厘米至 10 ~ 20 cm^[18],刘元保等^[19]根据野外调查发现,细沟深度的下限值一般为 2 cm,而吴淑芳等^[12]认为细沟沟深下限值为 1 cm。由于三维激光扫描技术可准确地计算坡面细沟发育形态及侵蚀量^[20-21],因而可基于三维激光扫描的点云数据,对坡面侵蚀方式进行划分。图 2a、2b 分别为以 1、2 cm 作为细沟沟深的下限阈值,对第 1 场降雨后坡面侵蚀方式进行划分的结果图,图 2c 为相应坡面的实拍照片。如图 2 所示,相较图 2a 而言,图 2b 所提取的细沟与图 2c 的实际发育细沟较为近似。表明在本研究条件下,以 2 cm 作为细沟侵蚀的沟深阈值,能较好地地区分片蚀和细沟侵蚀。但笔者认为不同水蚀条件下,细沟沟深下限值可能并非一个固定的值,其值可能与沟深的量测方式及坡面土体的片蚀剥离厚度有关。常规量测中,一般将侵蚀沟沟壁高度视为细沟沟深,此细沟深度是在沟壁土体片蚀剥离基础上的下切深度。由于其未考虑降雨过程中沟壁因片蚀作用而减少的高度,使得侵蚀沟下切深度被低估。而本研究次降雨侵蚀沟下切深度为降雨前、后 DEM 间的差值,其坡面侵蚀沟下切深度是以雨前相应坡面高程为基准,此侵蚀沟测量值为细沟的实际下切深度,而非雨后沟壁高,使得本研究细沟沟深较常规测量值大。

通过降雨前、后 DEM 间的差值统计,整个降雨试验的全坡面累计片蚀量大于细沟侵蚀量,其值分别为 0.113 5、0.036 6 m³。而以往在单次降雨或供试土样土质均一的条件下,很多学者已观测到,当坡面细沟产生后,细沟侵蚀量大于片蚀量^[12],本研究

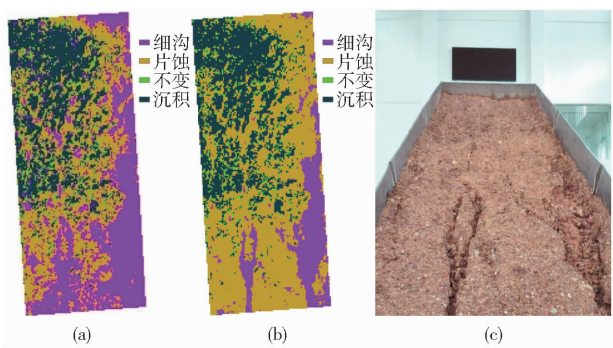


图 2 侵蚀方式划分图与实际照片

Fig. 2 Divisions of erosion pattern and its actual photo

第 1 场降雨试验结果亦表明细沟侵蚀量大于片蚀量。但由于本试验持续的降雨条件及供试土壤未过筛,其未完全风化的块砾含量较多,使得试验坡面更易于粗化,进而影响片蚀、细沟侵蚀的侵蚀量变化。如图 3a 所示全坡面在前 5 场次降雨中,细沟侵蚀量随次降雨场次急剧减小,而后小幅波动,但片蚀量随次降雨变化幅度不大,使得除第 1 场降雨外,其余次降雨事件均为片蚀量大于细沟侵蚀量。自坡顶而下,以 1 m 为间距将全坡面划分为上、中、下坡位。如图 3b~3d 所示,各坡位亦均表现为片蚀量大于细沟侵蚀量,其中上,中,下坡位细沟侵蚀量、片蚀量分别为 0.002 8、0.040 1 m³, 0.011 5、0.037 0 m³, 0.022 3、0.036 5 m³。细沟侵蚀量由大到小分别为下坡、中坡、上坡,片蚀量由大到小分别为上坡、中坡、下坡,可见细沟侵蚀量、片蚀量存在一定的坡位差异。而通过差异性分析发现,仅上、下坡位的细沟侵蚀量间存在显著差异 ($P < 0.05$),其余坡位间的细

沟侵蚀量及各坡位间的片蚀量均无显著性差异 ($P > 0.05$)。而侵蚀量的坡位差异主要受各坡位的径流量、流速及流态(股流、片流)影响。由于坡面汇流原因,径流量由大到小分别为下坡、中坡、上坡,加之在下、中、上坡位所测得的平均流速分别为 0.121 7、0.072 1、0.029 3 m/s,可知坡面径流的能量由大到小分别为下坡、中坡、上坡。而坡面径流能量直接决定了坡面细沟的发育程度,使得坡面细沟发育面积及强度由大到小分别为下坡、中坡、上坡。同时由于坡面由细沟和沟间地构成,因而沟间地侵蚀(片蚀)面积的多寡由细沟侵蚀面积决定,使得片蚀面积的坡面分布恰与细沟相反,则各坡位片蚀面积由大到小分别为上坡、中坡、下坡。而各坡位的片蚀量受片蚀面积影响,使得各坡位的片蚀面积与片蚀量相一致由大到小分别为上坡、中坡、下坡。此外,由于细沟侵蚀、片蚀的驱动径流分别以股流、片流为主,而坡位对股流流量、流速影响较大,而对片流流量、流速影响较小,使得上、下坡位差异对细沟侵蚀影响显著,而片蚀受坡位影响不显著。

从时间变化上看,全坡面细沟侵蚀、片蚀随降雨场次的变化趋势大致相同。第 1~5 场降雨细沟侵蚀量、片蚀量均呈一定的减小趋势,且细沟侵蚀量减小趋势尤为明显,其由第 1 次降雨时的 0.004 3 m³,急剧减小至第 5 次降雨时的 0.000 7 m³,减幅达 83.72%。其后细沟侵蚀量、片蚀量随次降雨场次呈现一定幅度的上下波动趋势,总体变化较为平稳。而不同坡位间各侵蚀方式的变化有所差异:其中上

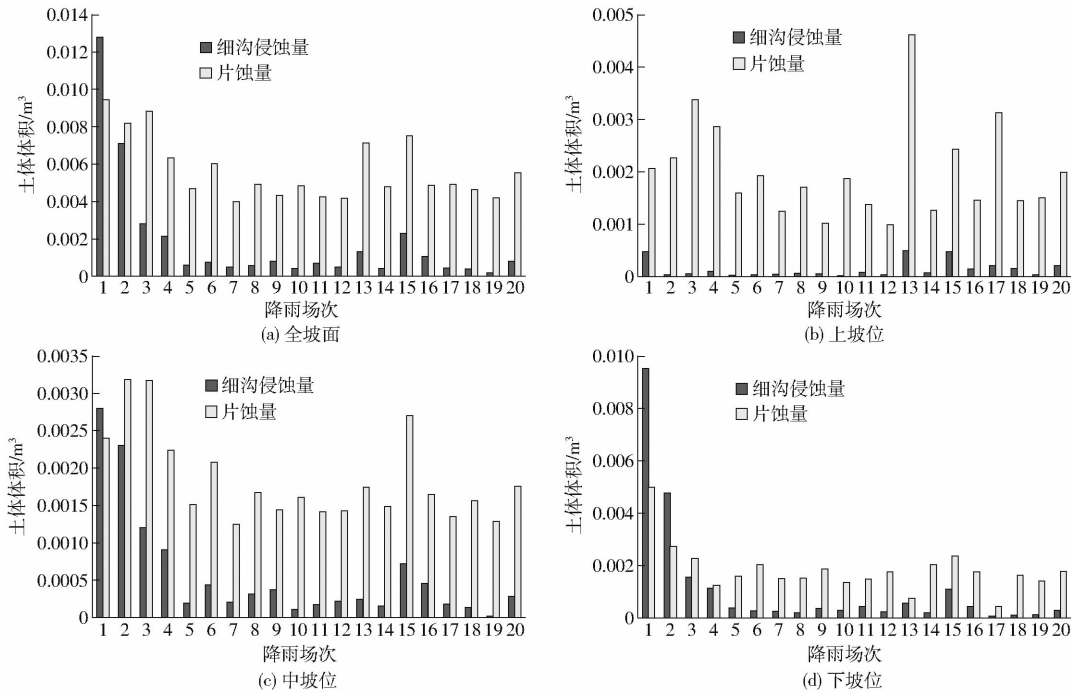


图 3 次降雨坡面侵蚀方式变化

Fig. 3 Erosion pattern evolvement of slope in total precipitation

坡位的细沟侵蚀量及其变化幅度在整个降雨时段内均较小,片蚀量在第 1~3 场降雨呈现增大趋势,而后第 4~12 场降雨间呈现下降趋势,其后在第 13 场降雨由于坡面径流流路发生变化,出现一个峰值后呈现下降趋势;中坡位的细沟侵蚀量在第 1~5 场降雨间急剧减小,其后较为平稳的上下波动,而片蚀量在第 1~2 场降雨表现为增大,其后在第 3~5 场降雨急剧减小,而后以一定幅度上下波动;下坡位的变化趋势和全坡位近似。可见,在坡面侵蚀外部驱动力(降雨)近似等同的条件下,各次降雨间坡面细沟侵蚀、片蚀强度及其变化趋势仍有所差异,其主要缘于坡面糙度差异的影响。

2.3 坡面糙度变化过程及其与侵蚀方式的耦合关系

坡面糙度是一个地表形态指标,其值为坡面表面积与其投影面积之比。由图 4 可知,坡面糙度整体呈现先增大后减小的趋势,其糙度由初次降雨前的 1.157 2,持续增大至第 12 场降雨之后的 1.283 7,而后在波动中减小。从各坡位的糙度差异看,上、中、下坡位的初始糙度较为接近,分别为 1.160 0、1.151 5、1.160 0,而雨后上、中、下坡位的糙度范围分别变为 1.177 4~1.283 7、1.197 5~1.292 1、1.278 4~1.311 8。坡面糙度在空间上由大到小分别为下坡位、中坡位、上坡位,其中下坡位与中坡位糙度无显著性差异($P>0.05$),而上坡位与中坡位、下坡位糙度间均存在显著差异($P<0.05$)。由于坡面糙度变化的诱因主要为坡面粗颗粒富集与侵蚀沟发育,而糙度的坡位顺序与细沟侵蚀强度的坡位顺序相同。可见,相较于坡面粗颗粒富集而言,侵蚀沟更易使坡面局部落差增大,致使坡面糙度增加。

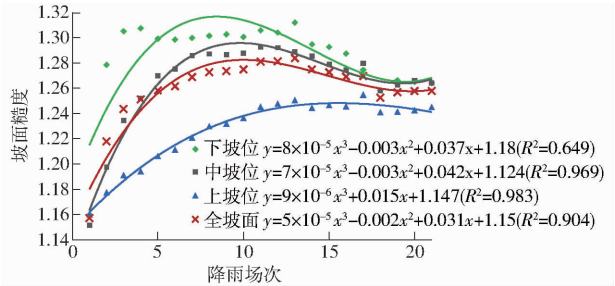


图 4 次降雨坡面各部位糙度变化情况
Fig. 4 Variation of soil surface roughness of different slope positions in total precipitation

此外,不同坡位糙度随时间的变化趋势亦有所差异,下、中坡位与全坡面的糙度变化趋势相同,均呈现先增大后减小的趋势,而上坡位糙度呈现持续增大趋势。其缘于各坡位致使糙度变化的主要侵蚀方式有所不同,下、中坡位的糙度主要受细沟侵蚀影响。在第 1~5 场降雨时段内,下、中坡位的细沟纵向(沟深)、横向(沟宽、沟长)同时发育,使得该坡位

糙度持续增大。而在第 6~20 场降雨时段内随着坡面侵蚀沟道逐步粗化,细沟纵向(沟深)发育受限,其细沟发育主要表现为沟壁随机崩塌、侵蚀沟宽加大。随着侵蚀沟沟壁逐步崩塌至土槽左右边缘,侵蚀沟沟壁逐渐消失,侵蚀沟亦逐渐变得无明显沟形,其坡面糙度也随之减小。而上坡位的糙度主要受片蚀影响,该坡位的侵蚀过程,是一个粗颗粒不断富集的过程,即坡面不断粗化、坡面糙度持续增大的过程。可见坡面侵蚀方式可影响坡面糙度的大小及变化趋势。

反之,坡面糙度亦能影响坡面侵蚀强度。全坡面糙度与其对应次降雨细沟侵蚀量、片蚀量的相关系数分别为 -0.929、-0.690 ($N=20, P<0.01$),表明坡面糙度的增大可在一定程度上抑制坡面细沟侵蚀及片蚀强度,且其对细沟侵蚀的影响要强于对片蚀的影响。但各坡位糙度与其侵蚀量的关系有所不同,上坡位糙度与细沟侵蚀量、片蚀量无显著相关关系;中坡位糙度与细沟侵蚀量、片蚀量的相关系数分别为 -0.932、-0.641 ($N=20, P<0.01$);下坡位糙度与细沟侵蚀量、片蚀量的相关系数分别为 -0.792、-0.737 ($N=20, P<0.01$)。究其原因,坡面糙度主要通过影响坡面径流的侵蚀、挟沙能力,进而影响坡面侵蚀强度。中、下坡位,受上坡位径流汇入影响,其径流为该坡位侵蚀产沙的主要驱动力。该坡位糙度增大对坡面径流的消能作用尤为明显,使得中、下坡位的糙度值与其侵蚀量呈现较好的负相关关系。此外,由于细沟沟道处的土体剥离厚度大于沟间,使得沟道中更多的块砾裸露,而富集于沟道的正长石、石英对沟道径流具有较大的消能作用,进而抑制了细沟的纵向(沟深)发育。使细沟以横向(沟宽)发育为主,侵蚀沟沟宽进一步增大,沟道径流深随之减小,致使沟道径流侵蚀产沙力减弱。故相较于片蚀而言,糙度对细沟侵蚀量的消减强度更大,并使得片蚀总量大于细沟侵蚀总量。此外,上坡位由于无外部径流汇入,该坡位径流量较小,其侵蚀方式以降雨溅蚀等片蚀作用为主,坡面糙度对上坡位径流深及其侵蚀产沙能力的影响较小,使得坡面糙度对片蚀强度的影响有限,二者在上坡位的相关关系不明显。

2.4 坡面侵蚀量对侵蚀方式及坡面糙度耦合作用的响应

通过对降雨前、后的坡面 DEM 进行相减运算,可定量分析坡面次降雨的侵蚀、产沙过程。由图 5 可知,就整个降雨时段而言,坡面泥沙输移比为 0.63,全坡面呈现侵蚀量最大,产沙量次之,沉积量最小。在次降雨尺度,其侵蚀量范围为 0.004 4~

0.022 2 m³,其侵蚀变化趋势与产沙趋势一致,均呈现先急剧减小而后小幅度波动变化,其侵蚀量最大、最小值的次降雨事件分别为第 1、19 场;次降雨沉积量的范围为 0.001 3 ~ 0.005 4 m³,呈现一定的增大趋势,其中沉积量最大、最小值的次降雨事件分别是第 13、6 场。随着降雨场次的递增,其产沙量与沉积量愈发接近,相对于沉积量而言,产沙量有所下降,且在第 11 场降雨之后沉积量的数值已基本超过产沙量。具体表现为在第 1 ~ 11、16、18 场次降雨坡面呈现侵蚀量最大,产沙量次之,沉积量最小,而在第 12 ~ 15、17、19 ~ 20 场次降雨坡面呈现侵蚀量最大,沉积量次之,产沙量最小。随着降雨的持续,受坡面糙度变化的影响,坡面径流的侵蚀、挟沙能力均出现不同程度的下降,致使坡面侵蚀、产沙量均有所下降。

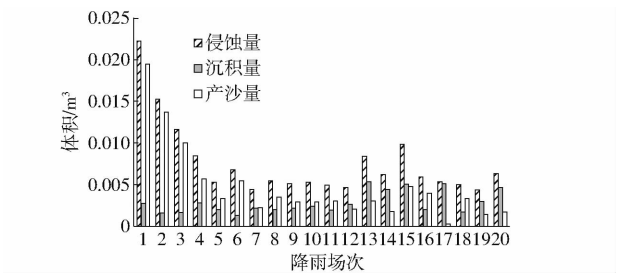


图 5 次降雨坡面侵蚀过程

Fig. 5 Erosion processes of total precipitation

如图 6 所示,随着降雨场次的变化,不同坡位的水蚀过程均发生一定程度的变化。但相较于中坡位与下坡位而言,上坡位的水蚀受降雨场次变化的影响较小,其侵蚀量、产沙量和沉积量随降雨场次的改变无明显变化规律。而中坡位侵蚀量、产沙量随降雨场次呈对数减小趋势($R^2 = 0.65$ 、 $R^2 = 0.73$),沉积量大致呈现指数增大趋势($R^2 = 0.37$)。下坡位侵蚀量、产沙量随降雨场次亦呈现对数减小趋势($R^2 = 0.62$ 、 $R^2 = 0.62$),沉积量大致呈现幂函数增大趋势($R^2 = 0.40$)。中、下坡位的水蚀变化趋势较为一致。通过差异性分析发现,各坡位间侵蚀量、产沙量均无显著性差异($P > 0.05$),仅上、下坡位的沉积量间存在显著差异($P < 0.05$),坡位差异对水

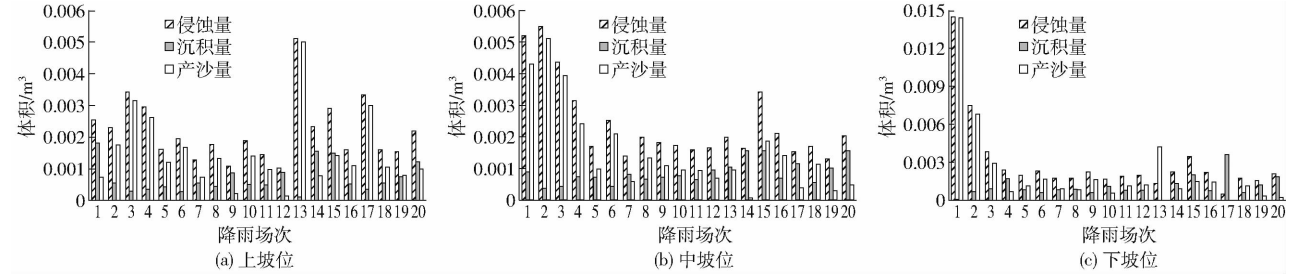


图 6 次降雨坡面不同部位侵蚀过程

Fig. 6 Erosion processes of different slope positions in total precipitation

蚀的影响主要表现为其对沉积量的影响。此外在整个水蚀过程,上、中坡位均以侵蚀为主,其侵蚀量大于沉积量。而下坡位由于坡面径流挟沙能力的减小,使得部分中、上坡位的来沙在下坡位沉积。随着降雨试验的持续,下坡位土壤侵蚀与泥沙沉积此消彼长,在第 13、17 场次降雨时,由于上坡径流流路发生变化,致使由上坡输入到中、下坡位的泥沙量增大,使得该时段下坡位的沉积量甚至超过了其侵蚀量。

此外,全坡面糙度与相应次降雨侵蚀量、产沙量的相关系数分别为 -0.885 、 -0.907 ($N = 20$, $P < 0.01$),均具有较好的负相关关系。其原因为坡面糙度越大,其对坡面径流的消能作用越显著,使得其坡面侵蚀、产沙量越小。不同坡位的糙度对坡面水蚀的影响有所不同:上坡位糙度与其侵蚀、产沙量的相关性均不显著;而中、下坡位的糙度与其侵蚀、产沙量均具有较好的负相关关系,其相关系数分别为 -0.854 、 -0.832 , -0.796 、 -0.820 ($N = 20$, $P < 0.01$);而各坡位糙度与其沉积量的相关性亦均不显著。可见坡面糙度对中、下坡位的侵蚀、产沙量影响较大,而对上坡位影响较小。究其原因:①由前分析可知,坡面糙度可影响坡面径流的侵蚀、挟沙能力,而中、下坡位侵蚀、产沙主要受径流影响,上坡位侵蚀、产沙主要受降雨溅蚀影响,因而糙度对中、下坡位的侵蚀、产沙有显著影响,而对上坡位侵蚀、产沙无显著影响。②受坡面汇流及坡位流态差异影响,中、下坡位的径流搬运能力强于上坡位,使得富集于中、下坡位的粗颗粒较上坡位较大,其糙度亦较大。中、下坡位随着坡面粗颗粒的富集,其对径流能量的消减作用不断增强,加之适于坡面径流搬运及雨滴溅蚀的细颗粒沙源亦不断减少,使得中、下坡位侵蚀、产沙量随之减小。故糙度对中、下坡位的侵蚀、产沙有显著影响。而富集于上坡位的粗颗粒相对较小,其在雨滴的溅蚀作用下部分粗颗粒依然能发生位移,使粗颗粒之下的细颗粒出露,依然能为坡面片流提供新的沙源,因而坡面糙度对上坡位侵蚀、产沙的影响较小。

3 结论

(1)坡面侵蚀方式差异可影响坡面糙度及其变化趋势。坡面片蚀过程,是一个粗颗粒不断富集、坡面糙度持续增大的过程。而细沟的纵向(沟深)、横向(沟宽)发育对坡面糙度的影响有所不同。其中细沟的纵向(沟深)发育,使沟道局部落差增大,使得坡面糙度增加,而细沟的横向(沟宽)发育,使得沟壁不断崩塌,沟道局部落差减小,坡面糙度随之减小。

(2)坡面糙度对坡面侵蚀方式及其侵蚀量具有重要影响。在持续降雨条件下,坡面粗颗粒不断富集,其对坡面径流的消能作用进一步加强,进而抑制坡面细沟发育,使得除第1场降雨以细沟侵蚀为主

外,其余均以片蚀为主,整个降雨时段内全坡面及各坡位均为片蚀量大于细沟侵蚀量,坡面产沙量呈下降趋势。

(3)坡位差异对坡面侵蚀方式、糙度及侵蚀产沙量具有一定影响。试验过程中不同坡位间细沟侵蚀、片蚀的变化趋势有所不同,且坡位差异对细沟侵蚀影响较大,而对片蚀影响较小。受坡面侵蚀方式影响,坡面糙度由大到小大致呈现为下坡位、中坡位、上坡位,全坡面及下、中坡位糙度均呈现先增大后减小的趋势,而上坡位糙度值呈现持续增大趋势。受坡面糙度影响全坡面及下、中坡位侵蚀、产沙量均呈现递减趋势,坡位差异除显著影响上、下坡位的沉积量外,其对各坡位侵蚀、产沙量无显著影响。

参 考 文 献

1 XIA D, DENG Y S, WANG S L, et al. Fractal feature of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. Nat Hazards,2015,79:455 – 478.

2 XU J X. Benggang erosion: the influencing factor[J]. Catena,1996,27:249 – 263.

3 DENG Y S, XIA D, CAI C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China[J]. Journal of Integrative, 2016, 15(8):1863 – 1873.

4 刘希林,张大林,贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义——以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. 地球科学进展,2013,28(7): 802 – 811.

LIU Xilin,ZHANG Dalin, JIA Yaoyao. Soil physical properties of collapsing hill and gully and their indications for soil erosion: an example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua county of Guangdong[J]. Advances in Earth Science,2013,28(7): 802 – 811. (in Chinese)

5 JIANG F S, HUANG Y H, WANG M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(5): 1741 – 1752.

6 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 崩岗崩积体土壤渗透性分析[J]. 水土保持学报,2013,27(3):49 – 54.

JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Study on soil permeability of slumping deposits in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(3):49 – 54. (in Chinese)

7 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. 水土保持学报,2013,27(1):86 – 89.

JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. The dynamic characteristics of soil detachment of slumping deposit by surface runoff in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1):86 – 89. (in Chinese)

8 马小玲,张宽地,董旭,等. 黄土坡面细沟流土壤侵蚀机理研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):134 – 140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160920&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.020.

MA Xiaoling, ZHANG Kuandi, DONG Xu, et al. Study of rill flow soil erosion mechanism on loess slope surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):134 – 140. (in Chinese)

9 GÓMEZ J A, NEARING M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J]. Catena, 2005, 59(3): 253 – 266.

10 HUANG C H, BRADFORD J M. Applications of a laster scanner to quantify soil microtopogropy[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(1):14 – 21.

11 HERITAGE G, HETHERINGTON D. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(1): 66 – 74.

12 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报,2015,52(1):48 – 56.

WU Shufang, LIU Zhenghong, HUO Yunyun, et al. Development of rill erosion on loess slope and its simulation[J]. Acta Pedologica Sinica,2015,52(1):48 – 56. (in Chinese)

13 覃超,吴红艳,郑粉莉,等. 黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):146 – 154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160819&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.019.

QIN Chao, WU Hongyan, ZHENG Fenli, et al. Temporal and spatial variation characteristics of rill erosion and hydrodynamic parameters on loessial hillslope[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(8):146 – 154. (in Chinese)

SHI Wei, WANG Jingyan, WEI Youbo, et al. Effects of water and temperature on soil nitrogen mineralization of *Cryptomeria fortunei* plantations in rainy area of western China[J]. *Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1430–1436. (in Chinese)

29 DESSUREAULT-ROMPÉ J, ZEBARTH B J, GEORGALLAS A, et al. Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3): 97–108.

30 FIERER N, CRAINE J M, MACLAUCHLAN K, et al. Litter quantity and the temperature sensitivity of decomposition[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 320–326.

31 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2245–2250.

REN Xiue, TONG Chengli, SUN Zhonglin, et al. Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2245–2250. (in Chinese)

32 BOSATTA E, AGREN G I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(13): 1889–1891.

33 HEUMANN S, BÖTTCHER J. Temperature functions of the rate coefficients of net N mineralization in sandy arable soils. Part I: derivation from laboratory incubations[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(4): 381–389.

34 花可可, 朱波, 杨小林, 等. 长期施肥对紫色土汉坡地团聚体与有机碳组分的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 167–173. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141026&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.026.

HUA Keke, ZHU Bo, YANG Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 167–173. (in Chinese)

35 虎瑞, 王新平, 张亚峰, 等. 温度对生物土壤结皮斑块土壤氮矿化作用的影响[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 522–528.

HU Rui, WANG Xiping, ZHANG Yafeng, et al. Effects of temperature on soil net nitrogen mineralization under different biological soil crusts in Shapoto, northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 522–528. (in Chinese)

36 高俊琴, 欧阳华, 张锋, 等. 若尔盖高寒湿地土壤氮矿化对温度和湿度的响应[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2): 229–234.

GAO Junqing, OUYANG Hua, ZHANG Feng, et al. The response of soil nitrogen mineralization to soil temperature and soil moisture in Zoige alpine wetland[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 229–234. (in Chinese)

37 TIAN Yuqiang, OUYANG Hua, GAO Qiong, et al. Responses of soil nitrogen mineralization to temperature and moisture in alpine ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(6): 218–224.

38 TEKLAY T, ZHENG S, ATTAEIAN B, et al. Temperature and substrate effects on C & N mineralization and microbial community function of soils from a hybrid poplar chronosequence[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 413–421.

(上接第 306 页)

14 张利超, 杨伟, 李朝霞, 等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 155–162.

ZHANG Lichao, YANG Wei, LI Zhaoxia, et al. Quantification of soil surface roughness during soil erosion using laser micro-topographical scanner[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(22): 155–162. (in Chinese)

15 钟美英, 李凤梅. 五华县近 52 年降水统计分析 & 最大降水量重现期的估算[J]. *广东水利水电*, 2010(12): 37–40.

ZHONG Meiyang, LI Fengmei. Statistical analysis of the precipitation during recent 52 years and the estimation of recurrence period for the maximum precipitation in Wuhua County[J]. *Guangdong Water Resource and Hydropower*, 2010(12): 37–40. (in Chinese)

16 HUFF F A. Time distribution of rainfall in heavy storms[J]. *Water Resources Research*, 1967(3): 1007–1019.

17 MILAN D J, HERITAGE G L, HETHERINGTON D. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32: 1657–1674.

18 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–482.

19 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(7): 9–18.

LIU Yuanbao, ZHU Xianmo, ZHOU Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau[J]. *Memoir of NISWC Academia Sinica*, 1988(7): 9–18. (in Chinese)

20 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 坡度对坡面细沟侵蚀的影响——基于三维激光扫描技术[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 1–5.

CHEN Junjie, SUN Liying, LIU Junti, et al. Effects of slope gradients on rill erosion: study based on three-dimensional laser technology[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3): 1–5. (in Chinese)

21 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 204–211.

LIU Xilin, ZHANG Dalin. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 204–211. (in Chinese)