

雨强和坡度对嵌套砾石工程边坡侵蚀特征的影响^①

杨 兴^{1,2}, 谭利平³, 彭培好^{1,3}, 白 海³, 李 伟²

1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

3. 成都理工大学 生态资源与景观研究所, 成都 610059

摘要: 为探究不同雨强和坡度对西南高山—亚高山地区急陡、高砾石含量工程边坡土壤侵蚀的影响, 采用室内模拟降雨及人工配置土壤等方法, 在5种雨强(25, 40, 45, 65, 85 mm/h), 5种坡度(35°, 40°, 45°, 50°, 60°)条件下进行模拟实验。研究表明: 工程坡面产流率随着雨强的增加呈对数增加。不同雨强下坡面平均产流率变化过程随着坡度的变化差异性具有统计学意义。随着雨强的增加, 同一坡面工程边坡侵蚀率明显增多。当雨强为40 mm/h时, 工程坡面侵蚀率随坡度变化较小(<0.015 g/s); 当雨强为65 mm/h时, 同一坡面的侵蚀率随着坡度的增加而减少。工程坡面侵蚀率整体呈现出迅速增长至峰值后缓慢下降的趋势。同一边坡随着雨强的增加, 坡面击溅侵蚀率在产流前和产流时都有明显的增加, 不同粒径土壤增速具有明显差异, 同一坡面随着坡度的增加, 坡面泥沙侵蚀率存在临界值(40°~45°)。降雨强度与土壤侵蚀相关性有统计学意义, 不同雨强下坡度与径流过程和侵蚀过程的相关性具有明显差异性。结论: 工程边坡中砾石具有增加下渗率和抗侵蚀作用, 工程坡面土壤侵蚀率随降雨历时逐渐下降; 坡度的增加在增大坡面流速的同时会降低坡面实际承雨面积, 工程坡面土壤侵蚀率随坡度的增加呈非线性关系。

关键词: 降雨强度; 坡度; 土壤侵蚀; 工程创面; 土壤溅蚀

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)03-0101-08

近年来, 随着国家对交通基础设施建设投入的不断提高, 区域交通运输条件和经济发展得到了显著提高^[1]。然而西南高山—亚高山地区在交通建设过程中形成了大量的工程边坡, 原有山体的植被、土壤和坡体结构被破坏, 边坡生态环境受到严重影响。在研究区裸露坡面土壤受到的侵蚀问题更为突出, 地质灾害频发, 对生态环境的恢复和沿线公路的正常运行产生了巨大的影响^[2-3]。西南高山—亚高山地区土壤中含有大量砾石, 工程坡面坡度较大、坡体裸露、气候条件复杂, 从而该地区的水土流失问题较为严重且难以恢复^[4]。因此, 对工程边坡土壤侵蚀的影响因素进行分析, 辨识工程边坡土壤侵蚀机制对工程边坡土壤重建和生态恢复具有重要的意义。

雨强和坡度是裸露工程边坡土壤侵蚀的两大关键影响因素^[5-6], 降雨是影响坡面土壤侵蚀最主要的驱动力, 影响降雨的因素中, 尤其以降雨强度对坡面土壤侵蚀的影响最为明显^[7]。专家学者们对影响黄壤、紫色土、黑土等土壤坡面土壤侵蚀的相关研究表明^[8-10], 坡面产流率和土壤侵蚀力随雨强的增加而增加。坡度作为主要的地貌形态因素, 直接影响着径流冲刷力的大小^[11-12], 同时对土壤剪切力也具有重要作用。由于各区域土壤和地质地貌的状况不同, 目前对边坡坡度和土壤侵蚀状况的研究结果存在一定差异性^[13-18]。坡面砾石覆盖对于减轻坡面土壤侵蚀具有一定的作用, 坡面产沙、侵蚀率随坡面砾石覆盖度增大而减少; 曼宁糙率、Dracy-weisbach阻力系数、坡面径流剪切力和径流功率均与坡面砾石覆盖度呈线性正

① 收稿日期: 2019-05-23

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFC0504903); 中国科学院关键技术人才项目(CAS201665)。

作者简介: 杨 兴(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤地球化学研究。

通信作者: 李 伟, 高级工程师。

相关^[19-21]. 前人关于雨强和坡度对边坡土壤的侵蚀研究极大地丰富了人们对土壤侵蚀影响因素的认知, 推动了边坡创面人工土壤研究的发展. 然而, 目前对于降雨条件复杂、坡度较大、砾石含量较多的高山—亚高山工程边坡土壤侵蚀过程研究较少. 因此研究雨强和坡度对工程边坡土壤侵蚀特征的影响, 保持工程创面人工土壤稳定性, 对维护西南高山亚高山地区的生态环境具有重要的意义. 本研究通过室内模拟降雨实验和人工配置土壤等方法, 对不同雨强和坡度下, 工程边坡的产沙产流状况、土壤侵蚀方式及其特点进行分析, 可为西南高山—亚高山地区工程创面土壤重建提供部分基础理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试验土壤为山地棕壤, 采自四川省泸定县二郎山西坡 G318 国道工程边坡(102°14′36.00″E, 29°49′08.65″N), 海拔 2 145 m, 是西南高山—亚高山地区工程边坡主要土壤之一. 结合研究区工程坡面土壤理化性质调查分析配置土壤, 每层土壤进行过筛、分选、混合等处理, 分别通过 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6 cm 共 6 种样品筛, 制备<0.2 cm 土壤和[0.2, 0.5), [0.5, 1), [1, 2), [2, 4), [4, 6) cm 共 5 种粒径砾石并按照体积比 2.2 : 3 : 2.3 : 1.7 : 0.8 比例混合砾石, 土壤与砾石比例为 4 : 6.

1.2 试验设计

研究通过室内人工模拟降雨试验的途径予以实施, 试验在中国科学院万州典型区生态环境监测重点站人工模拟降雨大厅进行, 采用 4m 高下喷式降雨装置, 降雨强度通过压力表调节, 雨强可调至 20~150 mm/h. 试验在自主设计的可移动式聚丙烯土槽内进行, 土槽长×宽×高为 100 cm×40 cm×25 cm, 底部打孔, 下端分别安装收集地表径流和溅蚀泥沙的收集槽, 坡度可以在 0°~75°范围内连续调节. 通过结合研究区工程边坡地形、气候条件, 设置 35°, 40°, 45°, 50°, 60°5 种典型坡度, 雨强设置为 25, 40, 45, 65, 85 mm/h 5 种典型雨强. 实验根据二郎山工程边坡具体土壤状况, 将不同粒径的实验土壤、砾石按照一定的比例混合, 并用喷壶喷雾及 Delta-T 便携式水分测试仪 HH2 将土壤相对含水率控制在 7.8%~8.5% 范围内. 为使土壤透水状况接近天然坡面, 底层铺设粒径 2~4 cm 砾石及少量土壤. 土壤采取分层填土的方式进行装填, 每层 5 cm, 填充后压实并通过称质量法使土壤容质量控制在 1.21~1.32 g/cm³ 范围内. 土壤装填完成后调节其坡度. 试验前用雨量筒对雨强进行 15 min 率定, 以保证降雨强度的准确性与一致性. 每天进行 2 场降雨, 每场降雨 1~2 h, 为避免降雨对土壤理化性质的影响, 每次试验结束后取出已试验土壤并重新配比土壤.

表 1 模拟降雨实验设计及产沙、产流状况

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	初始产流 时间/min	坡度/°	溅蚀率/ (g·s ⁻¹)	前期含 水量/%	容质量/ (g·cm ³)	侵蚀率/ (g·s ⁻¹)	产流率/ (mL·s ⁻¹)
25	26.28	50	0.033 6	9.1	1.237	0.018 2	0.990
45	20.5		0.054	8.5	1.286	0.035 9	2.013
65	11.25		0.086	8.4	1.278	0.068 3	3.593
85	4.82		0.095 6	8.7	1.312	0.085 3	3.954
40	19.03	35	0.030 4	7.7	1.211	0.014 0	0.967
	14.08	40	0.041 3	8.2	1.232	0.020 0	1.09
	15.02	45	0.040 7	7.1	1.290	0.018 2	0.975
	21.27	50	0.033 8	8.0	1.309	0.009 7	0.528
	28.72	60	0.026 4	7.5	1.233	0.005 9	0.323
65	15.45	35	*	7.9	1.211	0.099	4.269
	13.2	40	*	8.3	1.232	0.097	3.908
	12.38	45	*	7.6	1.290	0.084	3.783
	11.4	50	*	8.1	1.309	0.068	3.593
	8.52	60	*	7.8	1.233	0.053	2.31

1.3 样品收集与分析

模拟降雨开始后计时, 收集溅蚀泥沙并记录初始产流时间. 坡面产流后进行历时 65 min 的人工模拟降雨, 收集地表径流且继续收集溅蚀泥沙. 地表径流样品在 1~10 min 时间段每 2 min 采集一次, 之后每 5 min 收集一次; 溅蚀泥沙样品在 1~20 min 时间段内每 2min 采集一次, 之后每 5min 收集一次, 试验样品采集用秒表记录采样时间. 坡面产流后每间隔 5 min 将集流桶中径流及泥沙全部取出并放入瓶中. 试验样

品静置 24 h, 用量筒测量地表径流, 将试验样品冲入铝盒并放入 105 °烘箱中烘干, 称量(溅蚀泥沙用筛分法处理)。通过将集流桶样品求和得到累积径流量和累积侵蚀量随产流历时的变化过程。

产流率: 坡面在降雨条件下单位时间内所产生地表径流的体积, 计算公式为: $E=\frac{D_t}{t}$
式中: E 为产流率($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为接样时间(min); D_t 为接样时间 t 内的径流含量(mL)。

侵蚀率: 坡面径流在单位时间内带走的泥沙质量, 计算公式为: $R=\frac{W_t}{t}$
式中: R 为侵蚀率($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为接样时间(min); W_t 为接样时间 t 内的泥沙含量(g)。

溅蚀率: 单位时间内坡面土壤受雨滴击溅运移的泥沙质量, 计算公式为: $G=\frac{F_t}{t}$
式中: G 为溅蚀率($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为接样时间(min); F_t 为接样时间 t 内的溅蚀泥沙含量(g)。

2 结果与分析

2.1 雨强和坡度对工程边坡产流过程的影响

由表 1 可知, 当坡度为 50°, 随着雨强的增加, 同一坡面的初始产流时间减少了 5.78, 9.25, 6.43 min; 边坡产流率随雨强的增加以对数函数的形式增加。当雨强从 65 mm/h 增加到 85 mm/h 时, 坡面平均产流率增速减缓。从图 1 可以看出, 降雨开始后, 当雨强为 25 mm/h 时, 坡面产流率随降雨历时呈现缓慢增加的趋势。当雨强为 45, 65, 85 mm/h 时, 坡面产流率随产流历时而迅速增大之后趋于稳定。由于雨强增大, 加强了雨滴动能, 加速破坏了坡面土壤结构, 随着土壤颗粒间的空隙被逐渐填满, 水份下渗量大大降低, 使大部分降雨形成了径流, 产流率随之增加。土壤中嵌入砾石能增加土壤坡面的粗糙度, 防止土壤表层结皮, 增加土壤空隙, 从而促进水分入渗^[22-23]。土壤入渗率的增加和较低前期含水量导致坡面初始产流时间较长, 坡面产流率较低^[24]。在高雨强下, 土壤持水量大幅度增加, 土壤剪切力较大, 在土壤中流运动和重力的双重作用下, 土体结构被破坏, 坡面产生较多的细沟和裂缝, 土石紧密度低, 导致坡面土壤入渗率增加, 土壤产流率增速降低。

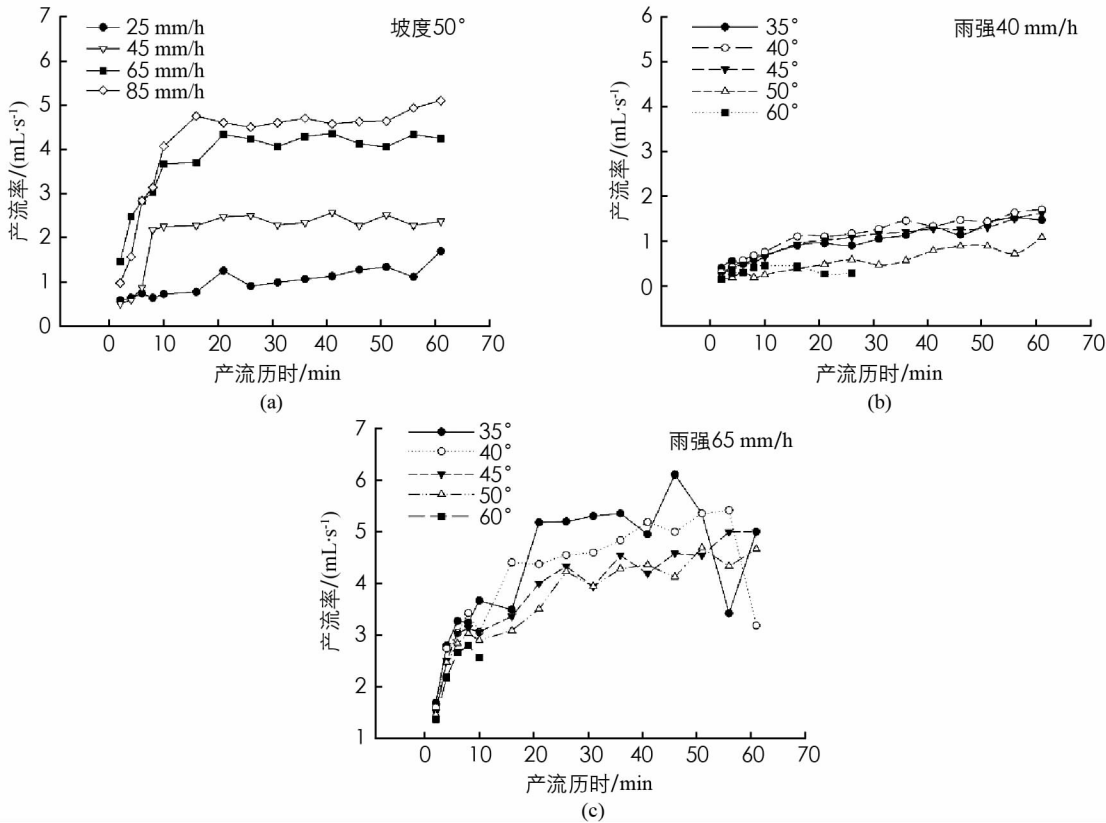


图 1 不同雨强和坡度下产流率变化过程

当雨强为 40 mm/h 时,随着坡度的增加,同一坡面平均产流率变化不明显.当坡度由 35°增至 40°时,坡面的初始产流时间提前了 4.95 min;当坡度由 40°增至 45°时,坡面初始产流时间变化较少;当坡度由 45°增至 60°时,坡度初始产流时间增加了 6.15~7.27 min.雨强为 65 mm/h 时,随着坡度的增加坡面产流率随之降低,初始产流时间提前了 0.87~2.88 min.从图 1 可知,在雨强为 40 mm/h 时,坡度对工程坡面产流率变化影响较小,坡面产流率较低且随着降雨历时而呈现缓慢增长的趋势.裸坡坡面径流量随坡度的变化并不明显^[25].当雨强为 65 mm/h 时,坡面产流率呈现出迅速增长后缓慢增加的趋势,随着坡度的增加产流率越低且越早达到稳定值.这是由于在相同的降雨强度下,随着坡度的增加,坡体的实际承雨面积减少;坡面的地表径流动能增加,坡面产流过程受两者因素共同影响.西南高山—亚高山工程边坡土壤长年受流水侵蚀,土壤结构较为松散,粘聚力较差,同时高坡度导致土壤剪切力较大使地表产生裂缝,土壤容质量降低,土壤层具有较高的渗透性,水分大量入渗难以形成地表径流.由于坡面土壤存在砾石,土体内土石界面使得土壤下渗性较强,在不同的雨强下,坡度对边坡产流率的影响存在差异性.

2.2 雨强和坡度对工程边坡产沙过程的影响

从表 1 可以看出,当坡度为 50°时,随着雨强的增加,同一坡面侵蚀率明显增多,平均侵蚀率分别增加了 0.018~0.028 g/s,工程边坡侵蚀率随雨强的增大而增大.当雨强由 45mm/h 增至 65 mm/h 时,侵蚀率增量较大;当雨强由 65 mm/h 增至 85 mm/h 时,侵蚀率增量较小.如图 2 所示,当雨强为 25 mm/h 时,坡面产沙过程较为均匀.当雨强为 45 mm/h 时,坡面侵蚀率迅速增长后保持稳定.当雨强为 65,85 mm/h 时,坡面侵蚀率先急速至峰值后下降,85 mm/h 雨强时侵蚀率下降点早于 65 mm/h 时.坡面径流产生后不仅会破坏土体结构,还会使表层土壤逐渐剥离导致砾石出露,不同粒径的砾石具有一定的抗侵蚀作用^[26].随着降雨的进行,坡面土壤逐渐被剥离,坡面砾石出露,雨强越大剥蚀速度越快,坡面砾石的覆盖量就越大,随之抗侵蚀性也就越大.砾石的存在对于径流变化具有重要影响,流过砾石的径流具有更大的水力粗糙度,同时被分成较多细流,径流冲刷搬运能力进一步降低.

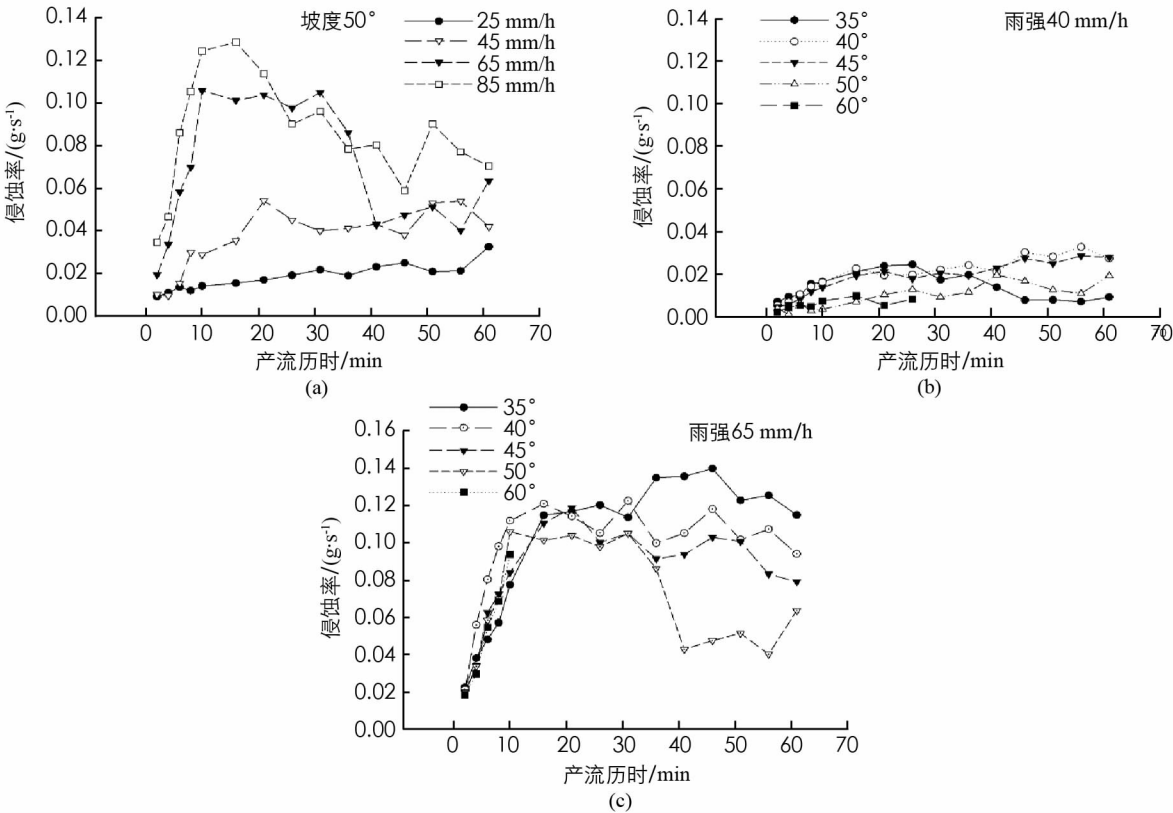


图 2 不同雨强和坡度下工程边坡剥蚀率变化过程

当雨强为 40 mm/h 时,工程坡面整体侵蚀率较低,且随坡度变化较小 0.015 g/s.坡面侵蚀率缓慢增加后趋于稳定.如表 1 所示,当雨强为 65 mm/h 时,同一坡面的侵蚀率随着坡度的增加减少了 0.003~0.05 g/s.随着降雨的进行,同一坡面土壤产流量迅速增加趋于稳定随之降低,随着坡度的增加,坡面趋于

达到稳定值和开始下降的时间就越靠前。这是由于雨强的增加使土壤侵蚀增加,坡度的增加使坡面径流剪切力增加。降雨初期,土壤的侵蚀率随着地表产流状况的变化而变化;随着坡面砾石抗侵蚀作用的增强,侵蚀泥沙量越来越少,坡面侵蚀率也就越来越低。高坡度边坡试验过程中由于水分的入渗土壤剪切力加大,使得有重力侵蚀发生,土壤侵蚀率波动变化。随着坡体水分逐渐饱和,水分下渗量趋于稳定,坡面侵蚀率也随着稳定。

2.3 雨强和坡度对边坡土壤溅蚀的影响

溅蚀是水蚀的初始阶段,是雨滴对地表击打直接作用的结果,是一个动能减少,地表土壤颗粒发生位移的过程^[27]。溅蚀主要发生在坡面产生径流之前和刚产生径流时,是水蚀的主要形式之一^[28]。由于地表枯落物和植被覆盖对溅蚀具有很好的抑制作用,所以溅蚀主要发生在裸露的边坡中,坡度和降雨是土壤溅蚀的主要原因^[29-30]。

由图3可知,在 50° 边坡上,同一坡面溅蚀泥沙率随降雨历时呈现出先迅速增加至峰值后缓慢下降的趋势,泥沙溅蚀率随着雨强的增加达到峰值时间就越靠前,且坡面击溅侵蚀率在产流前和产流时都有明显的增加,其中大于1 mm 粒径砾石溅蚀量增速较快,而 <1 mm 的沙粒、粉粒、黏粒的溅蚀量增速较小。雨强为25,45 mm/h时,产流前后溅蚀速率变化较小;当雨强为65,85 mm/h时,产流前溅蚀速率明显低于产流时。溅蚀泥沙中粒径 >2 mm 的砾石占比达到28%~38%,粒径(1,2] mm 的砾石为26%~32%,粒径(0.25,1] mm 的沙粒为20%~22%,粒径 ≤ 0.25 mm 的粉粒、黏粒为11%~21%。同一坡面溅蚀土壤粒径占比也随雨强和降雨历时而变化,粒径 >1 mm 砾石占比随雨强增大而增加,粒径小于1 mm 的沙粒、粉粒、黏粒占比随雨强增大而减少,且坡面产流时粒径 >1 mm 溅蚀泥沙占比明显大于产流前。产生以上结果的原因是多方面的,随着雨强的增加,雨滴的动能也增强,导致坡面溅蚀量随之增强,但径流坡面水深的增加会减低作用在坡面土壤的雨滴动能^[30],雨强在25,45 mm/h时,土壤渗透性较好,径流较少,溅蚀泥沙受径流影响较小;雨强为65,85 mm/h时,坡面产流量较大,溅蚀泥沙量受地表径流影响较大。其次,由于随着降雨的进行,坡面砾石覆盖面积增多,随着坡面抗侵蚀力的增加,坡面溅蚀量减少^[31]。

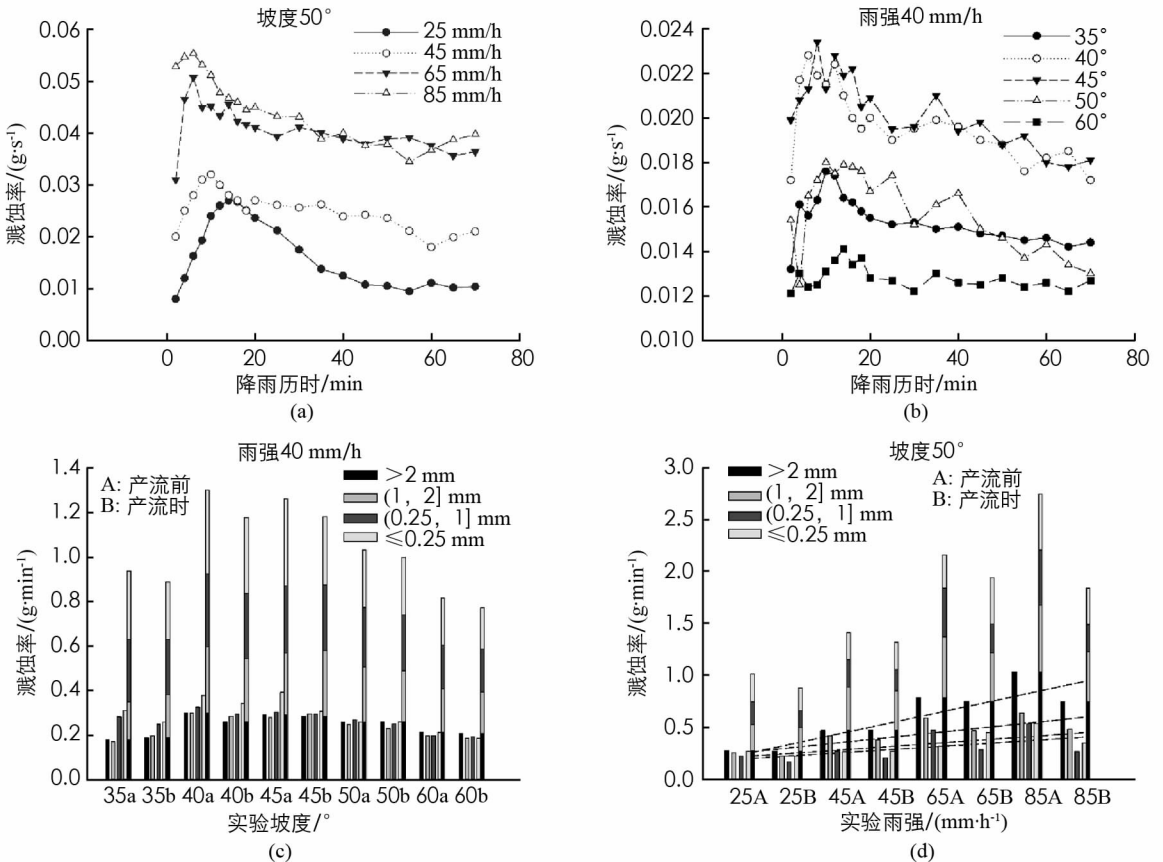


图3 不同雨强和坡度下工程边坡泥沙溅蚀率及粒径变化

当雨强为 40 mm/h 时,同一坡面坡度变化对于击溅泥沙的影响也是显著的,根据图 3 可以看出,随着坡度的增加,在两者的共同作用下平均溅蚀率呈现出抛物线的趋势,在 $<40^{\circ}$ 时,随着坡度增加而增加, $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,平均溅蚀率变化较少,当坡度 $>45^{\circ}$ 时,平均溅蚀率随坡度的增加而降低.随着坡度的增加,不同粒径土壤占比越来越接近,其中溅蚀泥沙中 $>1\text{ mm}$ 的砾石占比随着坡度的增大而增大, $(0.25,1]\text{ mm}$ 沙粒和 $<0.25\text{ mm}$ 粉粒及黏粒占比随着坡度增加而减少.产流前溅蚀率整体少于产流时.不同粒径的泥沙和土壤受到雨滴冲击的击溅高度和受重力的运动轨迹具有明显的区别,随着坡度的增加,溅蚀泥沙运移距离增加.低坡度下,粒径 $>1\text{ mm}$ 砾石由于重力作用运移较少,随着坡度增加,被雨滴溅起泥沙运移能力增加,导致溅蚀粒径泥沙占比趋同.

2.4 坡面侵蚀过程相关性分析

通过对坡面初始产流时间、侵蚀率、产流率、溅蚀率、总侵蚀量、总溅蚀量、总径流量、总产沙量进行相关性分析,可以对坡度和雨强对坡面侵蚀过程的综合影响有清晰的认识.由表 2 可知,降雨强度与侵蚀率、总侵蚀量、总产沙量正相关关系均极有统计学意义,与初始产流时间的负相关关系极有统计学意义,与产流率、溅蚀率、总径流量和总溅蚀量的正相关关系有统计学意义.在 40 mm/h 雨强下,坡度与产流率与总径流量的负相关关系有统计学意义,与其他坡面侵蚀过程相关关系无统计学意义;在 60 mm/h 雨强下,坡度与初始产流时间负相关关系极有统计学意义,与侵蚀率、产流率、总侵蚀量、总径流量的负相关关系均极有统计学意义.降雨强度对工程坡面侵蚀过程和径流过程影响较大,不同雨强下坡度对坡面侵蚀过程和径流过程影响差异性有统计学意义,40 mm/h 雨强下坡度对侵蚀过程影响较小;60 mm/h 雨强下坡度对侵蚀过程和径流过程均具有显著影响.

表 2 雨强和坡度与坡面侵蚀过程相关性系数

Pearson 相关性	初始产流时间/min	侵蚀率 g/s	产流率 mL/s	溅蚀率 g/s	总侵蚀量/g	总溅蚀量/g	总径流量/mL	总产沙量/g
雨强	-0.996**	0.992**	0.977*	0.982*	0.997**	0.997*	0.980*	0.993**
坡度 A	0.790	-0.759	-0.901*	-0.474	-0.710	-0.474	-0.892*	-0.601
坡度 B	-0.990**	-0.982**	-0.955*	/	-0.982**	/	-0.955*	/

注: * 在 0.05 水平(双侧)上相关性有统计学意义; ** 在 0.01 水平(双侧)上相关性有统计学意义. A: 40 mm/h; B: 65 mm/h.

由表 3 可知,随着雨强和坡度的变化,累积侵蚀量和累计径流量呈幂函数关系,由于坡面砾石的抗侵蚀作用和坡面产生裂缝和变形,当坡度一定时,工程坡面累积侵蚀量和累计径流量拟合的幂函数值由大到小为 65,45,25,85 mm/h.当雨强一定时,工程坡面累积侵蚀量和累计径流量拟合的幂函数由大到小为 $35^{\circ}, 45^{\circ}, 50^{\circ}, 40^{\circ}$.

表 3 高山-亚高山工程坡面侵蚀过程累积侵蚀量和累积径流量模型

雨强/(mm·h ⁻¹)	坡度/ $^{\circ}$	拟合方程	R ²
25	50	$0.014X^{1.039}$	0.994
45		$0.018X^{0.997}$	0.997
65		$0.009X^{1.108}$	0.984
85		$0.066X^{0.887}$	0.998
65	35	$0.005X^{1.165}$	0.997
	40	$0.01X^{1.096}$	0.992
	45	$0.006X^{1.15}$	0.994
	50	$0.008X^{1.108}$	0.984
	60	*	*

注: Y 为侵蚀量(g); X 为径流量(ml).

3 结 论

(1) 工程坡面产流率整体偏低,随着雨强的增加,工程边坡初始产流时间显著减少,坡面产流过程呈现出迅速增长后趋于稳定的趋势.在不同的雨强下,坡度对径流过程影响具有差异性,当雨强为 40 mm/h

时,坡面产流率变化不明显;雨强为 65 mm/h 时,坡面径流强度过程随坡度增加而降低。

(2) 雨强相对较低时,工程坡面土壤侵蚀率呈现缓慢波动上升的趋势;雨强相对较大时,工程坡面土壤侵蚀率变化过程历经快速上升,趋于平稳,波动下降 3 个趋势。坡面侵蚀率随雨强的增加而增加,随坡度的增加而减少,不同雨强下坡度对侵蚀率的变化与产流率相似。

(3) 工程坡面土壤溅蚀整体呈现出迅速增长后缓慢下降的趋势,且产流后仍有溅蚀发生但溅蚀率明显低于产流前。随着雨强的增加,同一坡面溅蚀率随着增加,其中以 >1 mm 粒径的砾石含量增加为主。随着坡度的增加,不同粒径的溅蚀泥沙占比趋同但溅蚀泥沙具有临界值效应($40^{\circ}\sim 45^{\circ}$)。

(4) 降雨强度与土壤径流过程和侵蚀过程相关性强于坡度,不同雨强下坡度与径流过程和侵蚀过程的相关性具有明显差异性。随着雨强和坡度的变化,累积侵蚀量和累计径流量呈幂函数关系。

参考文献:

- [1] 王保一,张荣华,荆莎莎,等. 降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 114-120.
- [2] 潘丹丹,艾应伟,张志卿,等. 四川丘陵区典型边坡土壤酶活性的季节动态 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 111-114.
- [3] 潘树林,辜 彬,李家祥. 岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性 [J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6404-6411.
- [4] 王 蕙,胡秀君,山成菊. 雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 24-29.
- [5] 孙丽丽,查 轩,黄少燕,等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 18-23.
- [6] 王占礼,王亚云,黄新会,等. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 84-87.
- [7] 李桂芳,郑粉莉,卢 嘉,等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [8] 沈海鸥,刘 健,王 宇,等. 降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 123-126.
- [9] 王丽园,查 轩,黄少燕,等. 不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 40-44.
- [10] ZHAO Q H, LI D Q, ZHUO M N, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Erosion Characteristics of the Red Soil Slope [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(2): 609-621.
- [11] 张少博,李建贵,黄俊华,等. 坡度对伊犁河流域土壤侵蚀的试验分析 [J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(1): 110-114, 123.
- [12] 白玉洁,张凤宝,杨明义,等. 急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化的水动力学机制研究 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 1-6.
- [13] SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Impacts of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Rill Erosion Processes at Loessial Hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 429-436.
- [14] 徐锡蒙,郑粉莉,武 敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 124-132.
- [15] WU L, PENG M L, QIAO S S, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Sediment Yield Characteristics of Bare Loess Soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(4): 3480-3487.
- [16] 陈晓安,杨 洁,汤崇军,等. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 141-146.
- [17] LIU Y J, HU J M, WANG T W, et al. Effects of Vegetation Cover and Road-concentrated Flow on Hillslope Erosion in Rainfall and Scouring Simulation Tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2016, 136: 108-117.
- [18] 杜明成,王振龙,姜翠玲,等. 淮北平原黄潮土多雨强变坡度产流产沙规律试验模拟 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 34-39.
- [19] 陈心逸,李 丽,余冬立. 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 116-120.
- [20] 王小燕,李朝霞,徐勤学,等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 115-120.
- [21] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 1-5.
- [22] BRAKENSIEK D L, RAWLS W J. Soil Containing Rock Fragments: Effects on Infiltration [J]. Catena, 1994, 23(1/2): 99-110.

[23] VALENTIN C, CASENAVE A. Infiltration into Sealed Soils as Influenced by Gravel Cover [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1667-1673.

[24] 王晨沣, 王彬, 王玉杰, 等. 不同土壤前期含水率和坡度下黄壤分离临界水动力特性 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 224-232.

[25] 曾为军, 张云伟, 陈岭, 等. 基于计时与光照法的坡面径流量及含沙量动态检测系统 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 114-123.

[26] 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 57-61.

[27] 韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 等. 溅蚀研究进展 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 46-51.

[28] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展 [J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230-235.

[29] 江东, 卢喜平, 蒋光毅, 等. 降雨因素对紫色土坡地土壤侵蚀影响的试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 140-144.

[30] 万丹, 何财基, 王玉民, 等. 藏东南高寒区尼洋河河谷地带不同土地利用方式土壤抗蚀性研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 106-114.

[31] 相莹敏, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区土壤溅蚀影响因素分析 [J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(2): 120-126.

Influence of Rainfall Intensity and Slope on Erosion of Embedded Gravel Engineering Slope

YANG Xing^{1,2}, TAN Li-pin³,
PENG Pei-hao^{1,3}, BAI Hai³, LI Wei²

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;
3. Institute of Ecological Resources and Landscape, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: In order to explore the effect of different rainfall intensity and gradient on soil erosion of steep and high gravel engineering slope in the southwest alpine-subalpine region. By adopting the method of indoor simulation rainfall and artificial soil configuration, the five kinds of rainfall intensity (25 mm/h, 40 mm/h, 45 mm/h, 85 mm and 65 mm/h), 5 kinds of slope (35 °, 40 °, 45 °, 50 °, 60 °) under the condition of simulated experiment. The results show that the runoff yield increases logarithmically with the increase of rainfall intensity. The change process of average runoff yield on slopes with different rainfall intensities was significantly different with the change of slope. With the increase of rain intensity, the erosion rate of the same slope increases obviously. When the rainfall intensity is 40 mm/h, the engineering slope erosion rate changes little with the slope (<0.015 g/s). When the rain intensity is 65 mm/h, the erosion rate of the same slope decreases with the increase of the slope. The spatter erosion rate of engineering slope shows a trend of rapid increase to the peak and slow decline. The same slope with the increase of rainfall intensity, slope splash erosion rate in front of the runoff yield and runoff yield increase obviously, soil of different size growth has obvious differences, the same slope with the increase of slope, slope sediment splash erosion rate is critical value (40 ° to 45 °). There was a significant correlation between rainfall intensity and soil erosion. It is concluded that the gravel in the engineering slope has the effect of increasing the infiltration rate and anti-erosion, and the soil erosion rate on the engineering slope decreases gradually with the duration of rainfall. The increase of slope increases the velocity of slope and decreases the actual rain-bearing area of slope. The soil erosion rate of engineering slope is nonlinear with the increase of slope.

Key words: rainfall intensity; slope; soil erosion; engineering wound; soil splash erosion