

连续模拟降雨下岩溶区含砾石堆积体坡面径流产沙特征

郑腾辉^{1,2}, 周 旺¹, 刘 涛¹, 杨以翠¹, 莫 斌¹

(1.广西交通设计集团有限公司, 南宁 530029; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为明确砾石含量对岩溶区石灰土质堆积体坡面径流产沙特征的影响,以土质坡面为对照,采用室内模拟降雨试验方法,研究了递增型降雨(0.5,1.0,2.0,2.5,3.0 mm/min)条件下偏土质(砾石含量 30%)和偏石质(砾石含量 70%)石灰土坡面的径流特性及侵蚀特征。结果表明:(1)随雨强增大,各坡面径流率呈稳定增长一波动的变化趋势,且土质坡面径流率整体小于 2 种含砾石坡面;偏土质、偏石质坡面累计产流量较土质坡面增加了 0.49,0.37 倍;(2)1.0~3.0 mm/min 雨强下,土质坡面侵蚀速率在 0.16~5.4 g/(m²·s) 范围内波动,整体呈稳定一波动增加的变化趋势;偏土质和偏石质坡面分别为 0.16~5.4,0.06~0.74 g/(m²·s),前者侵蚀速率变化范围大且波动剧烈,后者变化范围小且稳定;随砾石含量的增加,各坡面累计侵蚀量呈先增后减的变化趋势,偏土质坡面侵蚀量较土质坡面增加 2.5 倍,偏石质坡面较其减少了 0.9 倍;(3)土质、偏土质和偏石质坡面的侵蚀速率与径流率分别呈极显著正相关幂函数、线性函数和线性函数关系。研究结果可为桂西北岩溶区弃渣场水土流失治理提供一定的科学依据。

关键词: 连续性降雨; 砾石含量; 石灰土; 工程堆积体; 径流产沙

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)03-0055-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.009

Characteristics Sediment Yield and Runoff on the Slope Surface of Gravel Accumulation in Karst Area Under Continuous Simulated Rainfall

ZHENG Tenghui^{1,2}, ZHOU Wang¹, LIU Tao¹, YANG Yicui¹, MO Bin¹

(1.Guangxi Communications Design Group Company Limited, Nanning 530029;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to clarify the influence of gravel content on runoff and sediment yield characteristics of lime-soil engineering deposit slope in Karst area, the runoff characteristics and erosion characteristics of lime-soil slope with meta-soil (30%) and meta-gravel (70%) under incremental rainfall (0.5, 1.0, 2.0, 2.5 and 3.0 mm/min) were studied by indoor simulated rainfall test method. The results showed that: (1) With the increasing of rainfall intensity, the runoff rate of each slope showed a stable growth fluctuation trend, and the runoff rate of soil slope was less than that of two kinds of gravel slope, and the runoff yield of partial soil and partial stone slope was 0.49 times and 0.37 times higher than that of soil slope. (2) Under the rainfall intensity of 1.0~3.0 mm/min, runoff rate of each slope fluctuated in the range of 0.16~5.4 g/(m²·s), which showed a trend of steady-fluctuation increase. The change range of erosion rate of partial soil slope and partial stone slope was 0.16~5.4 g/(m²·s) and 0.06~0.74 g/(m²·s), respectively. The former had a large range of variation and strong fluctuation, while the latter had a small and stable range. With the increasing of gravel content, the erosion amount of each slope increased first and then decreased. The erosion amount of partial soil slope was 2.5 times higher than that of soil slope, while the erosion rate of partial stone slope was 0.9 times lower than that of soil slope.(3) The erosion rate of soil, partial soil and partial stone slope was positively correlated with the runoff rate, which was power function, linear function and linear function, respectively. The results could provide a scientific basis for soil and water control of abandoned slag field in Karst area of Northwest Guangxi.

Keywords: continuous rain; gravel content; lime-soil; engineering spoil accumulation; runoff and sediment yield

收稿日期: 2019-10-04
资助项目: 广西新发展集团(岩溶区绿色公路修建)院士工作站能力建设项目(桂科 AD17129047)
第一作者: 郑腾辉(1990—), 男, 河南商丘人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事生产建设项目水土流失治理及生态修复研究。E-mail: 1364162509@qq.com

近年来为促进区域经济发展,广西地区开展了大规模的公路建设活动,公路铺设过程中的挖填、堆垫等人为扰动不仅会直接破坏表土与植被,还会产生大量由弃土弃渣堆置而成的工程堆积体,由于管理方式粗放,再加上地形、气候等因素的影响,已成为该区新增水土流失的主要来源。工程堆积体作为一种人造地貌单元,表层土质松散且缺乏有机质,抗冲能力较差^[1],暴雨来临时其裸露的坡面极易产生水土流失,侵蚀模数甚至可达原地貌的800倍之多^[2]。关于堆积体径流过程及侵蚀特征的研究,前人已开展较多,且多以室内模拟降雨和原位放水冲刷试验为主,如康宏亮等^[3]通过室内模拟降雨试验发现,风沙土堆积体径流率随砾石含量的增加呈先减后增趋势,且在10%砾石含量时最小;而吴冰等^[4]对含砾石黄绵土的研究表明,含砾石坡面径流量均小于土质坡面,砾石具有削减径流的作用;王雪松等^[5]对赣北红土的研究发现,堆积体侵蚀速率是雨强和砾石含量共同作用的结果,且砾石的存在可促进侵蚀的发生;而史东梅等^[6]对含砾石黄沙壤和紫色土的研究认为,偏土质堆积体的侵蚀速率高于土石混合质,且土石比和放水流量相同时,黄沙壤土质堆积体产流量更多。综上,当前关于堆积体的研究多集中于陕北矿区(风沙土^[7-8])、黄土高原地区(黄绵土^[9-10])、南方山地丘陵区(红土^[11-12])和西南土石山区(紫色土^[13-14]),而关于岩溶区(石灰土)的相关研究较少。桂西北地区作为我国主要的岩溶地貌分布区,该区土层普遍较薄且基岩出露浅,生态环境较为脆弱,在该区大规模的公路建设过程中,对原始地貌表土、基岩的开挖在破坏当地生态环境的同时,还会形成较多含砾石的弃土弃渣体,受当地雨季降雨量大且多发连续性暴雨的影响,水土流失现象较为严重,加剧了该区的“石漠化”进程。

鉴于此,本研究采用野外弃渣场实地取样调查与室内模拟降雨试验相结合的方法,研究了递增型降雨条件下不同砾石含量石灰土质堆积体坡面的径流特性和侵蚀特征,旨在探明岩溶区弃渣场的土壤侵蚀机理,为当地工程建设中的水土流失治理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西河池市大化县(23°33′—24°22′N, 107°09′—108°02′E),地处广西中部偏西北、云贵高原余脉,红水河自北向南贯穿其全境。距南宁市153 km,东西宽约53 km,南北宽约89 km,总面积2 716 km²,是我国乃至世界著名瑶族文化之乡。该区属亚热带季风气候区,气候温和,雨热同季,年降水量为1 249~1 673 mm,主要集中在5—9月、10月至翌年

4月,年平均气温18.2~21.7℃,年日照时间1 217~1 587 h,无霜期335 d。全区海拔150~1 100 m,地貌类型以喀斯特(岩溶)地貌为主,整体地势西北高、东南低,境内峰峦叠嶂,洼地密布,有“千山万弄”之称,其中石山面积占到了全区总面积的62.11%,土山面积占到25.64%,属于典型的土石山区。土壤类型主要有石灰土、红壤、黄壤和紫色土等,其中分布于岩溶区的石灰土土层普遍较薄,保水保肥能力较差,水土流失现象较为普遍。

1.2 供试材料

试验开始前对广西贺州至巴马在建高速公路(都安至巴马段)沿线14处弃渣场共计50余处堆积体进行实地勘察,测量其坡度、坡长、坡面物质组成等指标,在分析调查数据的基础上对弃渣场下垫面进行室内概化处理。调查表明,堆积坡度在25°~40°的边坡占总数90%以上,坡长变化范围较大,主要集中在10~30 m,但由于室内模拟试验条件有限,在结合前人^[10]研究的基础上,最终确定试验坡度为25°,试验坡长为5 m。对堆积体坡面上、中、下3个坡位分别进行取样,发现坡面砾石粒径集中在2~30 mm;砾石质量含量(以下简称砾石含量)为3个坡位样本的均值,其中砾石含量低于30%的样本数占调查总数的30%左右,而砾石含量在30%~70%的样本数占到60%以上,所以最终设计土石混合体的砾石含量为30%(偏土质)和70%(偏石质)2种,并设置无砾石(土质)坡面为对照。试验用土取自高速公路沿线弃渣场,土壤类型为当地岩溶区常见的石灰土(石灰岩风化发育而成的岩性土),装填前去除植物残体及较大的石块,并控制其含水量在10%左右;砂粒、粉粒和黏粒的比例分别为31.97%,39.41%,28.62%,有机质含量为12.19 g/kg。试验所用砾石为公路建设过程中基岩爆破、开挖所产生的石灰岩,经过机械粉碎并过筛;根据野外调查结果,确定试验所用砾石粒径为2~30 mm。砾石与土体按照土石比7:3,3:7均匀混合后备用。

1.3 试验设计与指标测定

试验于2018年12月在广西水利电力职业技术学院降雨大厅的下喷区进行。试验采用XHZ—JY101人工模拟降雨设备,喷头规格分为FR11、FR13和FR15 3种,镀铬材质,类型均为下喷型,可控雨强变化范围为0.5~3.3 mm/min,有效降雨面积为22 m×16 m,有效降雨高度为6 m,降雨均匀度高于80%。由于当地岩溶区的土壤侵蚀主要由少数几次特大暴雨引起,一般1次特大暴雨的水土流失量可达全年侵蚀总量的60%以上,所以,本试验通过收集研究区多年降雨资料,选取当地发生暴雨时频率较高

的 30 min 雨强作为本次试验雨强的设计依据,最终将试验雨强定为 0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 mm/min;降雨方式为连续递增型,从 0.5~3.0 mm/min 的每 5 场连续降雨为 1 组试验;试验设计砾石含量和雨强 2 个处理,其中砾石含量 3 个水平(0、30%和 70%),雨强 5 个水平(0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 mm/min),降雨场次为 15 场,共计 3 组试验。试验所用径流小区为 5 m(长)×1 m(宽)×0.5 m(深)的移动式手摇变坡钢槽,可控坡度范围为 0~30°,钢槽底部设有排水孔,填土前垫有 10 cm 厚粗沙,粗沙表面铺上一层纱布,可满足试验入渗。试验用土进行人工装填,填土厚度为 35 cm,容重控制在 1.1~1.2 g/cm³,装填完毕后将土体表面整平。

降雨开始前先将变坡钢槽缓缓升至试验坡度(25°),用彩条塑料布遮盖,然后开启降雨机,在试验土槽四周各放置 1 个雨量筒,采用“梅花桩”法进行雨强率定,将实际雨强与设计雨强的误差控制在 5%以内。当雨强率定合格后,迅速揭开塑料布,用秒表计时,当坡面出现明显股流且从集流槽口处流出时,记录初始产流时间;用塑料桶在集流槽口处收集泥沙样品,同时用秒表记录接样时间。各雨强下产流时长设计为 45 min,前 6 min 每隔 1 min 取 1 次泥沙样,产流 6 min 后每隔 3 min 取样 1 次,取样数为 19 个。用电子秤称量样品质量,在 105 °C 烘箱中烘干后用电子天平称量泥沙干重。前 1 场降雨结束后,关掉降雨器并覆盖土槽,暂停 30 min 后进行下 1 场降雨,并重复以上过程。

1.4 数据分析与绘图

(1)径流率 Q :通过观测时间段内样品重量减去烘干后泥沙重量获得,计算公式为:

$$Q = \frac{6(M_a - M_b)}{100\rho t} \quad (1)$$

式中: Q 为径流率(L/min); M_a 为浑水样品重量(g); M_b 为烘干后泥沙重量(g); ρ 为水密度(1.0 g/cm³); t 为径流取样时间(s)。

(2)侵蚀速率 D :单位时间内一定面积内泥沙输移质量,计算公式为:

$$D = \frac{M}{bLt} \quad (2)$$

式中: D 为侵蚀速率(g/(m²·s)); M 为测量时间段内泥沙干重(g); b 为土槽宽度(m); L 为坡长(m)。

采用 SPSS 18.0、Excel 2010 处理试验数据,采用 Origin 8.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同砾石含量坡面径流过程

不同砾石含量坡面径流率随产流历时的变化见

图 1。由图 1 可知,0.5 mm/min 雨强下,土质、偏土质和偏石质坡面均未产流;1.0~2.0 mm/min 雨强下,3 种坡面径流率变化范围分别为 0.66~4.66, 1.98~6.13, 1.01~5.18 L/min;随雨强的增大、产流历时的延长,各坡面径流率呈稳定增长—波动的变化趋势,且土质坡面径流率整体小于 2 种含砾石坡面。雨强从 1.0 mm/min 增至 2.0 mm/min 时,土质、偏土质和偏石质坡面瞬时径流率分别增大 0.16、0.18、0.8 倍(产流 87~92 min),以偏石质坡面增幅最为明显;而当雨强从 2.0 mm/min 增至 2.5 mm/min 时,各坡面瞬时径流率分别增加 0.11、0.67、0.21 倍(产流 132~138 min),偏土质坡面增幅最为明显。

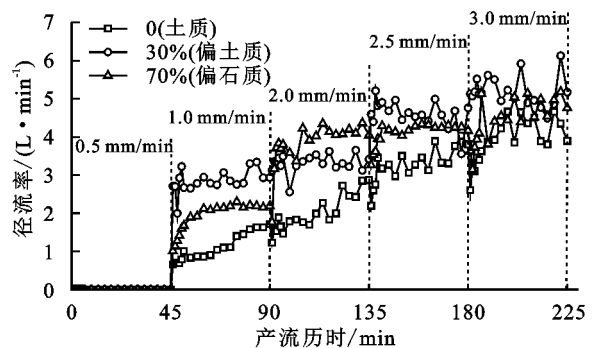


图 1 不同砾石含量坡面径流率变化过程

图 2 为累计产流量随砾石含量的变化。累计产流量从大到小依次为:偏土质(718.4 L)>偏石质(661.7 L)>土质(483.1 L),偏土质和偏石质坡面产流量较土质坡面增加 0.49、0.37 倍;雨强由 1.0 增至 3.0 mm/min 时,土质、偏土质和偏石质坡面的产流贡献率分别为 11.0%~38.0%, 18.1%~32.5%和 13.8%~31.1%,各坡面不同雨强下的产流贡献率与雨强均呈显著正相关指数函数关系($R^2=0.911\sim0.994, P<0.05$)。1.0、2.0 mm/min 雨强下,土质坡面产流量较偏土质和偏石质分别减少 0.72~1.45, 0.57~0.87 倍;而在 2.5、3.0 mm/min 2 种较大雨强下,土质坡面较含砾石坡面分别减少 0.23~0.36, 0.12~0.27 倍。可见随着雨强的增大,土质和含砾石坡面产流量之间的差异逐渐减小,砾石对径流率的影响逐渐减弱。

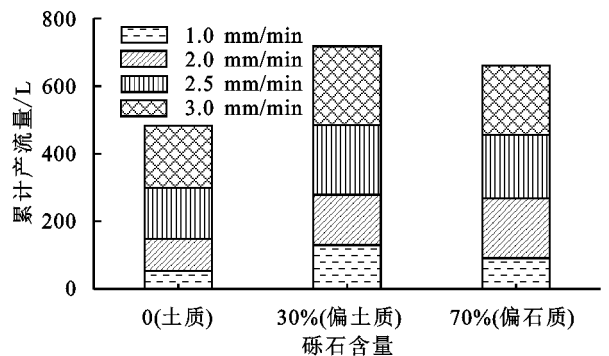


图 2 不同砾石含量条件下的累计产流量变化

2.2 不同砾石含量坡面侵蚀过程

递增型降雨条件下不同砾石含量坡面侵蚀速率随产流历时的变化见图 3。各坡面侵蚀速率均随降雨强递增而增大;1.0~3.0 mm/min 雨强下,土质坡面侵蚀速率变化范围为 0.16~5.4 g/(m²·s),整体呈稳定一波动增加的变化趋势;偏土质和偏石质坡面分别为 0.16~5.4, 0.06~0.74 g/(m²·s),前者侵蚀速率变化范围大且波动剧烈,后者变化范围小且稳定。雨强由 1.0 mm/min 增至 2.0 mm/min 时,产流 87~92 min 内,土质和偏石质坡面侵蚀速率分别增加 0.6,2.8 倍,而偏土质坡面侵蚀速率则减少 0.5 倍;但在随后的产流 99~114 min,偏土质坡面侵蚀速率迅速增加 2.5 倍,增幅远高于其余 2 种坡面,并在 114 min 时达到峰值,为 8.1 g/(m²·s)。雨强由 2.0 mm/min 增至 2.5 mm/min 时,产流 132~137 min,土质、偏土质和偏石质侵蚀速率分别增加 1.9,0.2,0.5 倍;土质和偏土质坡面侵蚀速率均呈大幅波动,变异系数 CV 分别为 59.6%和 30.4%。3.0 mm/min 雨强下,土质和偏土质坡面侵蚀速率均出现 5~6 次波动,分别在产流 201(6.1 g/(m²·s)),210(5.4 g/(m²·s)) min 和产流 204(9.0 g/(m²·s)),222(10.7 g/(m²·s))min 出现较大峰值,而偏石质坡面仅出现 2 次波动,且最大峰值为 0.7 g/(m²·s);大雨强下低砾石含量坡面侵蚀过程较高砾石坡面更为剧烈。

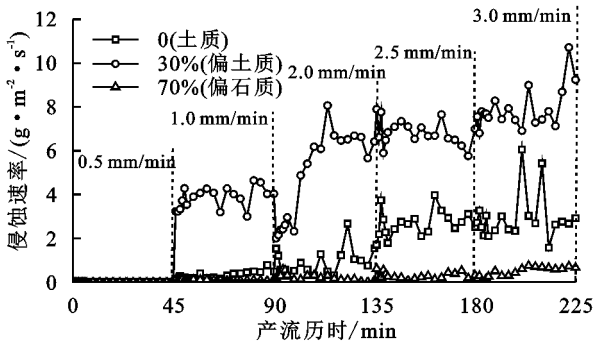


图 3 不同砾石含量坡面侵蚀速率变化过程

与产流特征不同,总侵蚀量从大到小依次为偏土质(131.1 kg)>土质(37.9 kg)>偏石质(5.6 kg);偏土质坡面侵蚀量较土质坡面增加 2.5 倍,而偏石质坡面则较其减少 0.9 倍;整体上,随砾石含量的增加,各坡面侵蚀量呈先增后减的变化趋势(图 4)。1.0~3.0 mm/min 4 种雨强下,土质、偏土质和偏石质坡面的侵蚀贡献率分别为 5.0%~42.8%,16.2%~33%, 8.7%~49.2%。为进一步明确雨强对侵蚀的影响,回归分析表明,各雨强下 3 种砾石含量坡面侵蚀量与雨强均呈显著指数函数关系($R^2=0.949\sim0.998$, $P<0.05$);当雨强 ≥ 2.0 mm/min 时,土质、偏土质坡面的侵蚀贡献率分别高达 95%,84%,可见当发生连续性降雨时,产流中后期较大雨强下较低砾石含量坡面侵蚀更易发生,且侵蚀强度更大。

2.3 不同砾石含量坡面水沙关系

图 5 为不同砾石含量坡面侵蚀速率随径流率的变化。为进一步明确侵蚀速率与径流率之间的关系,本文对 15 场降雨所得的径流率与其对应的侵蚀速率进行了 Spearman 相关性分析(双侧)和回归分析。相关性分析表明,各砾石含量坡面侵蚀速率与径流率均呈极显著正相关($P<0.01$, $n=76$),并以土质坡面相关性最好(相关系数为 0.857);径流率对侵蚀速率具有显著影响。回归分析表明,土质坡面的侵蚀速率与径流率呈极显著幂函数关系($R^2=0.834$, $P<0.01$, $n=76$),而偏土质和偏石质坡面的侵蚀速率和径流率则为极显著的线性函数关系($R^2=0.329\sim0.707$, $P<0.01$, $n=76$);偏土质坡面每增加一单位的径流率,其侵蚀速率增加量将近 100 g/(m²·min),要远高于其余两者,其坡面水沙状况整体呈现出“水大沙大”的特点,但对于偏石质坡面来说,增加相同单位的径流率,侵蚀速率增加量仅有 6.3 g/(m²·min),其坡面水沙状况表现为“水多沙少”。不同砾石含量坡面的水沙状况间接反映了连续性降雨条件下不同下垫面类型的弃渣场坡面的侵蚀状况,即对于该区高速公路沿线的弃渣场来说,含石量较低的弃渣场坡面为侵蚀易发区,属于水土流失治理的重点区域。

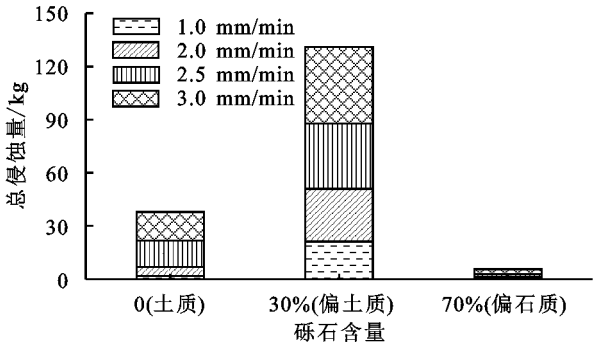


图 4 不同砾石含量条件下的累计侵蚀量变化

3 讨论

3.1 不同砾石含量坡面径流特性

本次试验,1.0 mm/min 雨强下,土质坡面径流率小于含砾石坡面,赵满等^[8]对含砾石风沙土的研究也得出相似结论,但却区别于红壤^[5],这与红壤质地细密、受雨滴溅蚀易形成抑制入渗的表层结皮有关;石灰(岩)土作为一种发育于碳酸盐岩母质上的非地带性土壤,水溶性强且结构松散,入渗性能较好,降雨前期坡面较为干燥的情况下,水分入渗会极大地削减地表径流,所以土质坡面径流率偏小;对于含砾石坡面来说,砾石会破坏土壤中原始孔隙结构,延长水分入渗路径^[15],也会因其自身的不透水性而阻碍入渗,上述因素均会造成含砾石坡面径流率偏大。雨强由 1.0 mm/min 增至 3.0 mm/min 的过程中,各坡面径流率波动性逐渐增加,且以土质坡面最为明显;雨强

的增大使坡面径流紊乱性增加,进而促进侵蚀沟的形成与发育;相比含砾石坡面,土质坡面由于缺少砾石的阻碍,径流的逐渐汇聚使侵蚀沟不断形成并发育,导致坡面流路发生变化,这是降雨后期引起径流率波动的主要原因^[16]。雨强由 1.0 mm/min 增至 2.0 mm/min 和由 2.0 mm/min 增至 2.5 mm/min 时,偏土质和偏石质坡面径流率均出现了突增,这与杨波等^[16]放水冲刷试验结果相似;当发生连续性降雨时,坡面土壤随着降雨的进行逐渐趋于饱和,当小雨强结束,大雨强开始后,降雨转化为坡面流并且沿着之前形成的流路流动,所以在雨强增大的情况下,径流率在产流初期出现突增。

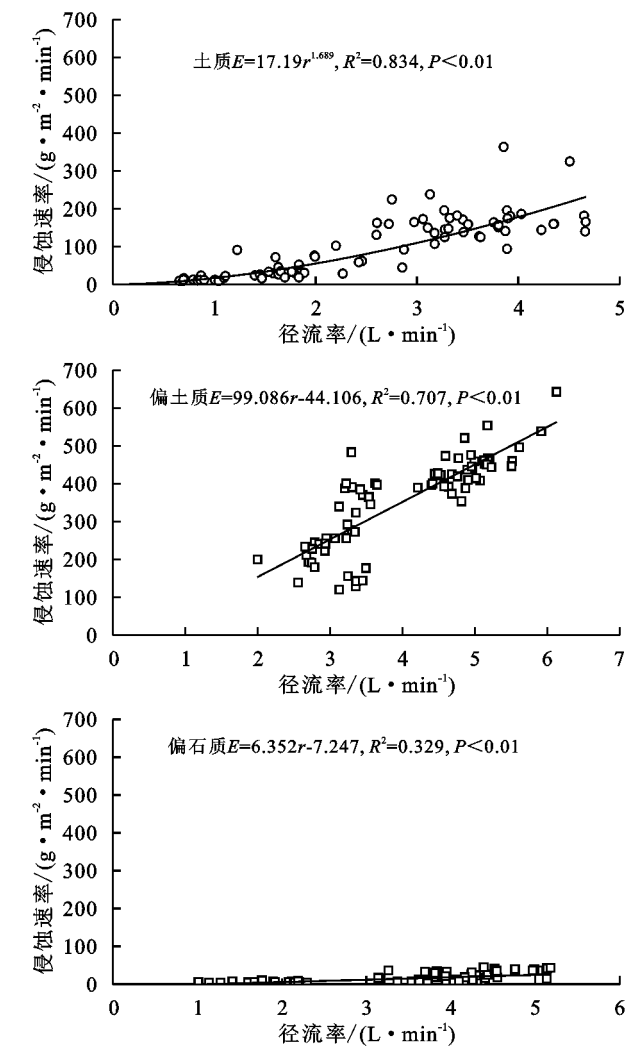


图 5 不同砾石含量坡面侵蚀速率与径流率相关性

总产流量从大到小依次为偏土质(砾石含量 30%)>偏石质(砾石含量 70%)>土质,部分学者^[17]通过模拟降雨试验得出相似结论,而景民晓等^[18]研究却表明,总产流量与砾石含量呈负相关,分析其原因可能是因为后者试验用土为重壤质土且砾石含量范围较小(10%~30%)所致。1.0,2.0 mm/min 雨强下,土质坡面产流量为三者中最小,但随雨强增大至 2.0 mm/min 以上,土质和含砾石坡面产流量逐渐接近,砾石含量对产流的影响越来越小。对于本试验来

说,砾石主要通过影响入渗来影响坡面径流过程,连续性降雨条件下,随着土壤逐渐饱和,径流率受入渗的影响愈来愈小,而降雨作为坡面径流产生的原动力,雨强的增大会使坡面承雨量、径流量不断增多,同时通过影响入渗弱化了砾石对径流的影响,从而导致不同砾石含量坡面产流量之间的差异逐渐缩小。

3.2 不同砾石含量坡面侵蚀特征

对侵蚀速率的分析表明,偏土质坡面(砾石含量 30%)整体侵蚀速率最大;王雪松等^[5]对含砾石红壤的研究得出相似结论,但也有部分学者对风沙土^[8]、壤土^[19]和紫色土^[14]的研究表明,1.0~2.5 mm/min 雨强下 30%砾石含量坡面的侵蚀速率均低于土质坡面;上述研究之间出现较大差异的原因与试验土壤类型不同有关,相较于其他 3 种类型土壤,红壤孔隙度较小,质地更加细密,砾石破坏了其土体表层结构,影响了土壤结皮的形成,导致径流对其更深层土壤进行冲刷,促进了侵蚀的发生。偏石质坡面侵蚀速率整体最小,这与甘凤玲等^[17]模拟降雨试验的结论相似,即随砾石含量(50%,66%,80%)增加,堆积体坡面侵蚀速率逐渐减小;分析其原因,主要有 2 个方面:(1)高砾石含量坡面整体孔隙度较大,装填过程土壤颗粒受重力作用影响,更易混入堆积体内部,从而导致坡面表层细粒含量较少^[17];(2)降雨过程中随着坡面表层细粒的不断流失,坡面裸露的砾石越来越多,在堆积体坡面形成一层较为稳定的保护层,对其下方土体具有一定的保护作用^[20]。相较于径流率的变化过程,在小雨强结束、大雨强开始后,各坡面侵蚀速率并未出现明显的“突增”,而是随着雨强的增大呈波动增长的变化趋势。雨强的增加和降雨的不断进行会导致堆积体土体逐渐趋于饱和,颗粒之间黏聚力下降,受径流冲刷更易发生侵蚀;同时雨强的增大也会使坡面径流量急剧增加,坡面径流沿着之前流路不断汇聚、向下流动的同时,对原始沟道的下切、对沟壁的掏蚀和冲刷作用也会增强,导致沟壁崩塌现象出现(重力侵蚀);崩塌土体会短暂堵塞流路,造成侵蚀速率短时下降,但随着流水对崩塌体的搬运,径流泥沙含量又会急剧增加,导致侵蚀速率上升;当崩塌土体被冲刷殆尽后,原始崩塌位置又会形成新的临空面,开始下一轮的侵蚀过程;沟蚀和重力侵蚀的共同作用使坡面侵蚀沟不断发育,导致侵蚀速率波动增长。

总侵蚀量从大到小依次为偏土质(30%砾石含量)>土质>偏石质(70%砾石含量),整体上随砾石含量的增加,堆积体侵蚀量呈现先增后减的变化趋势,这与陈心逸等^[21]对含砾石盐碱土(砾石含量 0,10%,20%,40%,60%,80%)研究结果相似,但也有部分学者对含砾石壤土^[4]、红壤^[12]的研究表明,堆积体侵蚀量与砾石含

量(0,10%,20%,30%,40%)呈正相关;可见,因堆积体土壤类型和砾石含量的不同,砾石对侵蚀或促进、或抑制。对于本研究来说,相较于土质坡面,偏土质坡面因砾石的存在,导致其表层土壤结构被破坏,砾石周围成为涡旋侵蚀的易发区,所以产沙量整体较多;而对于偏石质坡面来说,坡面较多的砾石会保护坡面免受雨滴溅蚀的影响,同时对径流冲刷也起到一定抑制作用,降低了水流的携沙能力,过高的砾石含量也会造成水流可携带泥沙的减少,所以其总产沙量较少^[22]。土质、偏土质和偏石质坡面在雨强 ≥ 2.0 mm/min时的侵蚀量分别占总侵蚀量的95%,84%和91%,这从侧面反映了野外发生连续型暴雨时,缺少管理、随意堆置的堆积体极易发生侵蚀且侵蚀强度较大,同时也说明了砾石含量(下垫面特征)是影响生产建设项目堆积体水土流失的重要因素,通过布设各种工程措施^[23]或者林草措施^[24],人为地改变堆积体下垫面特征,才能对堆积体坡面水土流失进行有效控制。

4 结论

(1)随雨强增加,各坡面径流率整体呈稳定增长一波动的变化趋势,且土质坡面径流率整体小于2种含砾石坡面;随砾石含量的增加产流量呈先增后减的变化趋势,并且随着雨强的增大,砾石含量对径流率的影响逐渐减弱。

(2)土质坡面整体呈稳定一波动增加的变化趋势;偏土质坡面侵蚀速率变化范围大且波动剧烈,而偏石质变化范围小且稳定;随砾石含量的增加侵蚀量呈先增后减的变化趋势,产流中后期较大雨强下,30%砾石含量坡面更易发生侵蚀且侵蚀强度更大。

(3)各坡面侵蚀速率与径流率均呈极显著正相关($P < 0.01, n = 76$),其中土质坡面相关性最好(相关系数为0.857),径流率对侵蚀速率具有显著影响。土质坡面的侵蚀速率与径流率呈极显著幂函数关系($R^2 = 0.834, P < 0.01, n = 76$),而偏土质和偏石质坡面的侵蚀速率和径流率则为极显著的线性函数关系($R^2 = 0.329 \sim 0.707, P < 0.01, n = 76$)。

参考文献:

- [1] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J].水土保持学报,2013,27(4):34-38.
- [2] 黎建强,陈奇伯,王克勤,等.水电站建设项目弃渣场岩土侵蚀研究[J].水土保持研究,2007,14(6):40-42.
- [3] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J].水科学进展,2016,27(2):256-265.
- [4] 吴冰,朱元骏,邵明安.含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J].中国水土保持科学,2011,9(1):99-103.
- [5] 王雪松,谢永生,陈曦,等.砾石对赣北红土工程锥状堆

- 积体侵蚀规律的影响[J].泥沙研究,2015(1):67-74.
- [6] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体坡面径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.
- [7] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [8] 赵满,王文龙,郭明明,等.含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征[J].土壤学报,2019,56(4):847-859.
- [9] 李宏伟,牛俊文,宋立旺,等.工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J].水土保持学报,2013,27(5):63-67.
- [10] 黄鹏飞,王文龙,江忠善,等.黄土区工程堆积体水蚀测算模型坡度因子研究[J].泥沙研究,2015(5):57-62.
- [11] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
- [12] 王雪松.红粘土工程堆积体侵蚀规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [13] 彭旭东.生产建设项目工程堆积体坡面土壤侵蚀过程[D].重庆:西南大学,2015.
- [14] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [15] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J].Catena,2003,53(2):97-114.
- [16] 杨波,王文龙,郭明明,等.矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究[J].土壤学报,2019,56(6):1347-1358.
- [17] 甘凤玲,何丙辉,王涛.汶川震区滑坡堆积体降雨入渗产流特征人工模拟实验研究[J].水利学报,2016,47(6):780-788.
- [18] 景民晓,谢永生,李文华,等.不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2014,28(3):78-82.
- [19] 赵满,王文龙,郭明明,等.不同砾石含量壤土堆积体坡面侵蚀特征研究[J].土壤学报:1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190822.1655.002.html>.
- [20] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China [J]. Geomorphology, 2012, 151/152 (1): 234-242.
- [21] 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.
- [22] 符素华,路炳军,叶芝菡.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18,34.
- [23] 郭建英,何京丽,李锦荣,等.典型草原大型露天煤矿排土场边坡坡面水蚀控制效果[J].农业工程学报,2015,31(3):296-303.
- [24] 杨波,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下弃渣体坡面不同防护措施的减水减沙效益[J].土壤学报,2017,54(6):1357-1368.