

模拟降雨条件下不同砾石含量工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征

杨兴^{1,2}, 张家喜^{2,3}, 彭培好^{1,3}, 王明田⁴, 李伟²

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 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, 四川 成都 610041;

3. 成都理工大学 生态资源与景观研究所, 四川 成都 610059; 4. 四川省气象台, 四川 成都 610072)

摘要: [目的] 探究砾石含量对陡峻工程边坡土壤侵蚀及流水力学特征的影响。[方法] 采用室内模拟降雨试验和人工制备土壤等方法, 研究了在 3 种降雨强度(40, 60, 80 mm/h), 5 种砾石含量(3%, 15%, 35%, 55%, 75%)条件下 50°工程边坡土壤侵蚀率变化特征以及土壤侵蚀率与各水动力学参数的关系。[结果] ①40, 60, 80 mm/h 雨强下, 各砾石含量坡面径流率较土质坡面分别减少了 10.1%~55.9%, 13.9%~41.9%, 19.6%~47.7%; 径流剪切力、径流功率、过水断面单位能分别与砾石含量呈显著递减的线性函数、指数函数、幂函数关系。②坡面侵蚀率随着砾石含量的增加而减小, 不同试验雨强下侵蚀率大小及变化过程具有明显差异。当雨强为 40 mm/h 时, 坡面整体产沙率较低, 随降雨过程整体呈现出缓慢增加的趋势; 当雨强为 60 mm/h 时, 不同砾石含量下侵蚀率迅速增加后呈波浪式缓慢上升或平稳下降的趋势; 当雨强为 80 mm/h 时, 砾石含量为 3% 条件下, 坡面侵蚀率迅速增长后增速降低, 当砾石含量大于 15% 时, 边坡侵蚀率达到峰值后均开始缓慢下降。③工程边坡土壤侵蚀率与径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能均呈显著线性函数、对数函数、幂函数关系。[结论] 工程边坡土壤中的砾石具有抗侵蚀作用, 随着砾石含量的增多, 坡面土壤侵蚀量和各水动力学参数均明显降低。

关键词: 降雨强度; 砾石含量; 土壤侵蚀; 工程边坡; 水动力学特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0009-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 杨兴, 张家喜, 彭培好, 等. 模拟降雨条件下不同砾石含量工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 9-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.002; Yang Xing, Zhang Jiayi, Peng Peihao, et al. Effects of gravel content on soil erosion and water flow mechanics of engineering slope under simulated rainfall conditions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 9-15.

Effects of Gravel Content on Soil Erosion and Water Flow Mechanics of Engineering Slope Under Simulated Rainfall Conditions

Yang Xing^{1,2}, Zhang Jiayi^{2,3}, Peng Peihao^{1,3}, Wang Mingtian⁴, Li Wei²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan

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, Sichuan 610041, China; 3. Institute of Ecological Resources and Landscape, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: [Objective] We aim to investigate the effects of gravel content on soil erosion and water hydrodynamic characteristics of steep slope project. [Methods] The relationship between soil erosion change rate and soil erosion rate and hydrodynamic parameters was studied by means of indoor simulated rainfall experiment and artificial soil preparation, at 50° engineering slope with 5 kinds of gravel content (3%, 15%, 35%, 55%, 75%) under 3 rainfall intensity (40, 60, 80 mm/h). [Results] ① With 40, 60, 80 mm/h rain intensity, the slope runoff rate of each gravel content was decreased by 10.1%~55.9%, 13.9%~41.9%, 19.6%~47.7% compared with that of soil slope. Runoff shear force, runoff power and unit energy of runoff section showed

收稿日期: 2019-05-19

修回日期: 2019-06-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山亚高山区工程创面人工土壤重建技术”(2017YFC0504903); 中国科学院关键技术人才项目(CAS201665)

第一作者: 杨兴(1995—), 男(汉族), 云南省保山市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤地球化学。E-mail: 1393165327@qq.com。

通讯作者: 李伟(1969—), 男(汉族), 四川省南充市人, 高级工程师, 主要从事山地生态与环境方面研究。E-mail: liwei@imde.ac.cn。

a linear, exponential and power function relationship with gravel content, respectively. ② The erosion rate of slope decreased with the increase of gravel content, and the amount of erosion rate and the change process of different experimental rain intensity showed obvious difference. When the rain intensity was 40 mm/h, the overall sediment yield of the slope was low, and the rainfall duration showed a slow increase trend. When the rain intensity was 60 mm/h, the erosion rate increased rapidly under different gravel content, and then fluctuated. When the rain intensity was 80 mm/h, the gravel content was 3%, the growth rate of slope decreased rapidly after rapid growth. And when the gravel content was greater than 15%, the slope erosion rate began to decline slowly after reaching the peak value. ③ The soil erosion rate showed a significantly linear function, logarithmic function and power function relation with runoff rate, runoff shear force, runoff power and the unit energy of the water section of the project slope. [Conclusion] The soil gravel of engineering slope has anti-erosion effect, and with the increase of gravel content, the soil erosion amount and the hydrodynamic parameters of slope are reduced significantly.

Keywords: rainfall intensity; gravel content; soil erosion; engineering slope; hydrodynamic characteristics

国家对交通建设的投资力度不断加大,对改善区域交通条件,促进区域经济发展起着至关重要的作用。但在地质条件复杂的西南高山—亚高山地区,在公路建设过程中不可避免地切挖山体导致大量的裸露高陡土石边坡,不仅改变了原有山体的生态环境与岩土结构,使工程边坡土壤及其养分极易流失,还严重影响了沿线公路运输安全^[1-2]。工程建设会破坏原有的土体结构和表层土壤环境,导致雨滴对土壤表层的直接冲击和地表径流对土壤冲击携带的能力的增强,严重影响工程边坡土壤理化性质和生态环境的稳定性^[3]。土壤侵蚀不仅会带走大量用于植被生长的土壤,还会使土壤中氮、磷、钾、有机质等养分大量流失。

砾石会增加土壤容重、孔隙度、剪切力等,导致土体下渗率增大,影响土体水分运移规律^[4-5]。砾石使土壤表面较为粗糙而具有较高的拦截径流的能力,并减缓了地表径流的运移^[6]。砾石的粒径、含量、形态、间距等对径流的运动特征具有重要的影响^[7-9]。然而也有研究认为,砾石对土壤侵蚀的影响还是复杂的和矛盾的,这取决于岩石碎片的特征及径流状况^[10-11]。综上所述,由于雨强、砾石含量、土壤类型、坡度、含水量等不同,砾石对坡面侵蚀的影响存在巨大差异^[12-16],而目前针对嵌套砾石边坡研究多为坡度较低,砾石含量不高的坡耕地或工程堆积体^[17-19]。西南高山—亚高山地区广泛存在的工程坡面具有裸露、高坡度、高砾石含量的特点。高坡度状况下不仅导致土壤因剪切力较大带来的土体不稳定,而且会使得坡面径流对坡面土壤结构冲击和搬运能力加强。表层的砾石会降低雨滴的溅蚀能力和径流对土壤结构的冲击,土体中的砾石会加大土壤的孔隙度从而减少地表径流量。本研究通过对在高坡度、高砾石含量下的

工程边坡侵蚀特征进行研究,分析不同雨强、坡度、砾石含量等对工程边坡径流的水力学参数和土壤侵蚀特征的影响,旨在为西南高山—亚高山区工程边坡水土保持、土壤重建、生态恢复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验所用土壤样品于2018年11月采自四川省泸定县二郎山西坡G318国道工程边坡表层土,类型属于棕壤,为间棕色;下层黄棕色、棕褐色;土层深厚,但层次过渡不明显;上层为中壤质,下层为黏壤质;土体中夹砾石极多;母质多为花岗岩沉积物;土壤近中性或微酸性,pH值约5.4~6.2^[20]通过结合研究区工程边坡具体的土壤及砾石状况,对边坡土壤进行风干、过筛、分选、混合等处理,分别过0.2,0.5,1,2,4和6 cm样品筛,制备<0.2 cm土壤和0.2~0.5 cm,0.5~1 cm,1~2 cm,2~4 cm,4~6 cm这5种粒径砾石并按照体积比2.2:3.0:2.3:1.7:0.8比例将砾石装袋混合。

1.2 试验设计

研究于2018年12月采用室内人工模拟降雨试验的方法,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4 m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,两台降雨机并排降雨,降雨均匀度达到80%,满足试验要求。试验土槽为自主设计及制作的聚丙烯土槽,规格为长1 m,宽0.4 m,深0.25 m,底部均匀打孔(2 mm),坡度变化范围为0°~75°。通过结合研究区工程边坡地形、气候、土壤等条件,设置5种砾石含量:3%,15%,35%,55%,75%;设置3种雨强:40,60和80 mm/h;坡度:50°。用喷壶喷雾及Delta-T(HH2)便携式水分测试仪将土壤相对含水率

控制在 7.5%~10% 范围内。为使土壤透水状况接近天然坡面,底层铺设粒径 5 mm 厚粗沙。土壤采取分层填土的方式进行装填,每层 5 cm 并打毛处理,填充后压实并通过称重法使土壤容重控制在 1.18~1.34 g/cm³ 范围内。试验前对降雨强度进行 10 min 率定,每天进行 2 场降雨,每场降雨 1~2 h。为避免模拟降雨后土壤理化性质的改变对试验的影响,每次试验后将土壤取出并重新配比装填新的试验土壤。

1.3 样品收集与分析

模拟降雨开始后计时,用精度 0.01 s 的秒表记录初始产流时间。坡面产流后进行历时 65 min 的地表径流及泥沙收集,并用秒表记录时间,前 10 min 时间段每 2 min 采集一次样品,之后每 5 min 收集一次样品。同时用高锰酸钾染色剂测定流速。试验样品静置 24 h,用量筒测量地表径流,将试验样品装入铝盒并放入 105 ℃ 烘箱中烘干,称量。相关计算公式为:

(1) 径流深(h)。测量时段内坡面平均径流水深,计算公式为:

$$h = \frac{q}{Vbt} \quad (1)$$

式中: h ——径流深(m); q —— t 内时间的径流量(m³); t ——径流取样时间(s); V ——断面平均流速(ms); b ——过水断面宽度(m)。

(2) 土壤侵蚀率(D_r)。坡面径流在单位时间内所输移出的泥沙质量,计算公式为:

$$D_r = \frac{M_t}{t} \quad (2)$$

式中: D_r ——土壤侵蚀率(g/s); M_t ——测量时段 t 内的所运移出的泥沙含量(g); t ——接样时间(min)。

(3) 径流率(Q)。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:

$$Q = \frac{D_t}{t} \quad (3)$$

式中: Q ——径流率(ml/min); t ——接样时间(min); D_t ——接样时间 t 内的径流含量(ml)。

(4) 径流剪切力(τ)。径流在流动时对坡面土壤剥蚀大小的参数,计算公式为:

$$\tau = \gamma_m g R_j \quad (4)$$

式中: τ ——径流剪切力(Pa 或 N/m²); γ_m ——浑水密度(kg/m³),考虑了含沙量的影响; g ——重力加速度,取 9.8 m/s²; R ——水力半径(m),薄层水流可视为二元流,水力半径近似于等于断面平均水深; J ——水力坡度,用坡度的正切值近似代替。

(5) 径流功率(ω)。表征作用于单面水流所消耗的功率,水流流动时挟沙能力的参数,计算公式为:

$$\omega = \tau \cdot V \quad (5)$$

式中: ω ——径流功率[N/(m·s)],是径流剪切力(包含坡度、水深)和流速的函数,包含了径流剪切力和流速的影响; V ——坡面水流速率(m/s)。

(6) 过水断面单位能(E)。以过水断面最低点做基准面的单位水中的动能和势能之和,计算公式为:

$$E = \frac{\alpha \cdot V^2}{2g+h} \quad (6)$$

式中: E ——过水断面单位能; α ——校正系数,取值为 1; h ——平均径流水深。

采用 SPASS 25.0, Excel 软件进行试验数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同砾石含量工程边坡径流特征

2.1.1 初始产流时间 初始产流时间是指坡面开始接受降雨至坡面形成薄层水流的时间,受坡面土壤特性、坡度、坡长等综合效应的影响,工程坡面中砾石通过改变土壤孔隙状况和坡体地貌微形态对坡面产流过程产生影响^[20]。由表 1 可知,在不同的降雨强度下,随着试验坡面砾石含量的增加,坡面产流时间均随之减少。其中在 40 mm/h 雨强条件下,产流时间随着砾石含量增加减少了 2.5~7.65 min;在 60 mm/h 雨强条件下,产流时间随砾石增加减少了 2.13~3.14 min;在 80 mm/h 雨强条件下,产流时间随着砾石含量增加减少了 0.64~1.79 min。回归分析表明,各砾石含量坡面初始产流时间与雨强均呈线性函数关系($R^2=0.604, p<0.05$)。当砾石含量较低时,土体结构较为紧密,高坡度下,重力作用导致地表径流下渗力降低,湿润峰达到一定值后难以继续下移,坡面径流汇集时间较短^[21],随着坡面土壤砾石含量的增加,坡面土体容易形成较多联通的大孔隙,坡面下渗能力较强,且湿润峰持续下移,水份入渗量随着砾石含量的增大而增加。

表 1 不同砾石含量下工程坡面产流时间

雨强/ (mm·h ⁻¹)	不同砾石含量坡面产流时间/mm				
	3	15	35	55	75
40	7.01	14.1	21.75	25.5	28
60	2.98	6.12	9.12	11.25	14.02
80	0.98	1.75	3.03	4.82	6.18

2.1.2 径流率 由图 1 可知,不同降雨强度下,工程坡面径流率及其随降雨历时变化幅度均随着坡面土壤砾石含量的增加而减少,坡面径流率变化过程具有明显差异性。雨强为 40 mm/h 时,随着砾石含量增加,坡面径流率减少了 0.048~0.55 ml/s,坡面径流率较低且随降雨历时整体呈现缓慢且平稳增长的趋势。

势;当雨强为 60 mm/h 时,坡面径流率下降率为 0.44~0.71 ml/s,坡面径流率呈现出迅速增加后趋于稳定的趋势;当雨强为 80 mm/h 时,坡面径流率下降率为 0.28~1.21 ml/s,坡面径流率整体呈现出迅速增长后波浪式缓慢上升的趋势。这是由于地表砾石的覆盖对生物结皮具有一定的影响^[22-23];随着砾石含量的增加,重力作用下坡体土壤剪切力的增大使坡面产生较多裂缝,这不仅使土壤孔隙数量增加而且土壤颗粒与砾石结构慢慢变得疏松,砾石与土壤一的入渗面也随之增加;同时砾石含量的增加使水分下渗深度增加,促进壤中流的发生,表层砾石的分流作用也使得坡面径流流速大幅降低^[24]。

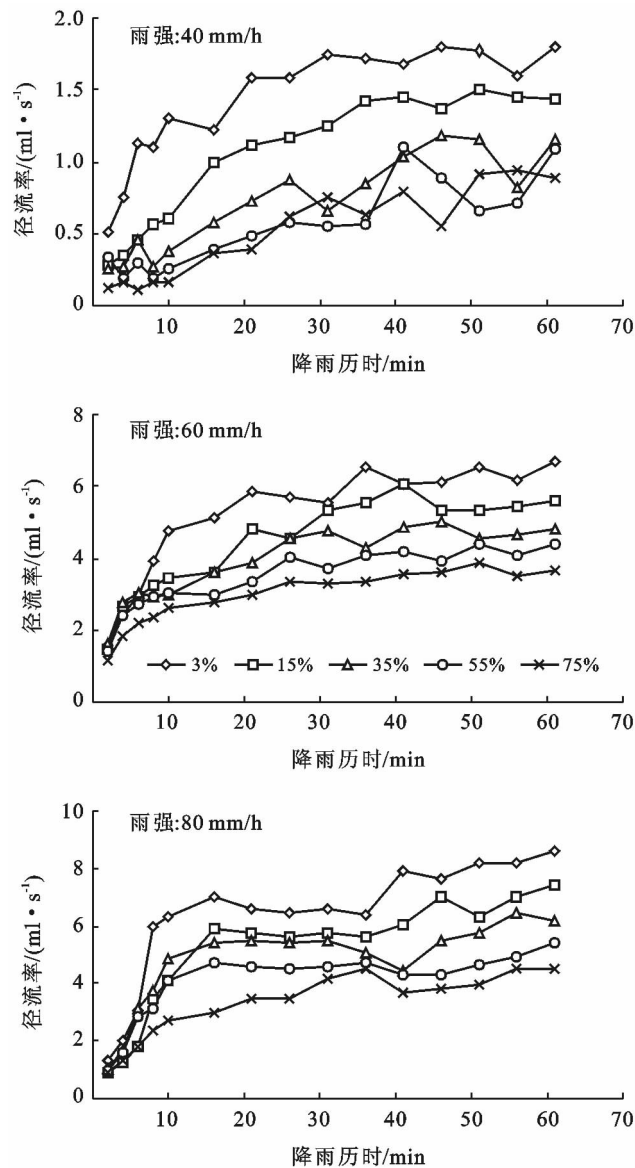


图 1 不同雨强和砾石含量下土壤径流率随产流历时变化过程

2.1.3 径流水动力参数变化规律 图 2 为各实验条件下的水动力学参数状况。

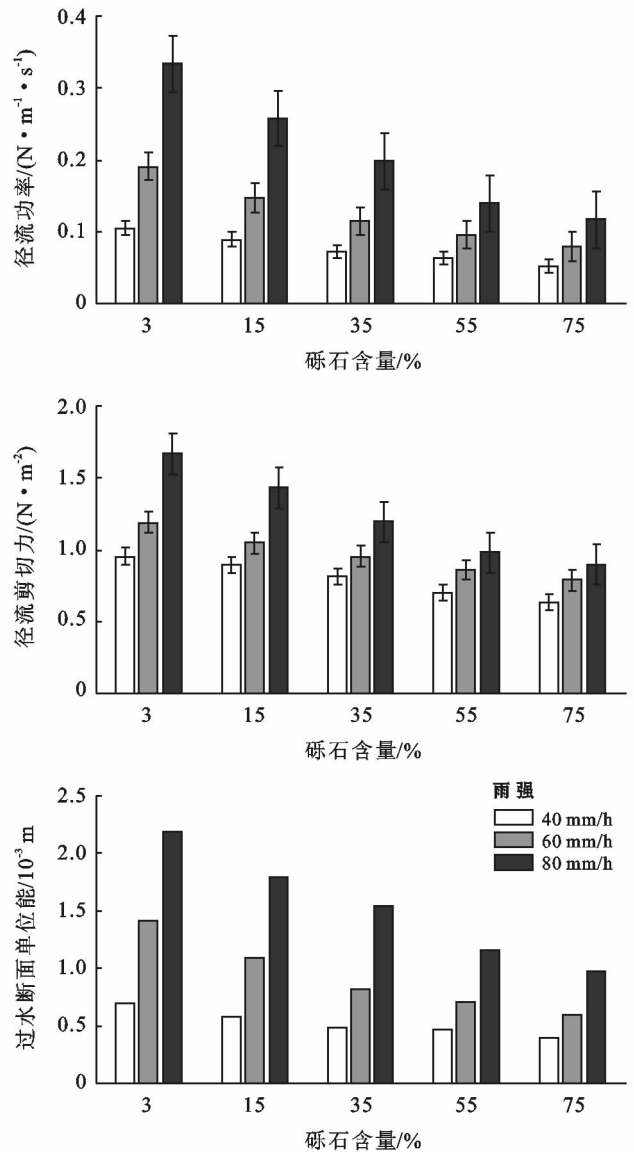


图 2 各实验条件下水动力学参数

从图 2 可以看出,在 5 种坡面砾石含量下,径流剪切力、径流功率和过水断面单位能均随降雨强度的增加而不同程度的增加。径流剪切力分别增加 17.3%~24.6%,13.8%~41%;径流功率分别增加了 52%~82%,47.7%~75.2%;过水断面单位能分别增加了 49.2%~101.6%,55.8%~88.9%。在 3 种降雨强度条件下,径流剪切力、径流功率和过水断面单位能均随砾石含量的增加而明显减少。径流剪切力分别减少 6.4%~13.5%,8.3%~12%,8.5%~18%;径流功率分别减少了 13.5%~18.2%,16%~23%,16.2%~29.4%;过水断面单位能分别减少了 16.0%~18.4%,12.6%~25.1%,14.1%~24.6%。通过回归分析表明,各降雨强度下径流剪切力与砾石含量均呈显著线性函数关系($R^2 = 0.971 \sim 0.992$, $p < 0.05$);径流功率与砾石含量均呈显著对数函数关

系($R^2=0.928\sim 0.949, p<0.05$);过水断面单位能与砾石含量均呈显著线性函数关系($R^2=0.944\sim 0.973, p<0.05$)。随着雨强的增加,坡面径流量随着增加,径流流速及其径流深度随着增加。坡度较大,重力作用导致坡面径流流速较快,同时砾石含量的增加使坡面土壤入渗率增加,坡面径流量的降低导致坡面平均径流深度随着减少。同等降雨条件下砾石覆盖大大增加了工程坡面的地表粗糙度,砾石对水流具有分流及阻碍作用,一方面砾石将坡面径流分成细小的沟流,另一方面砾石对向下运动的水流具有阻碍和能量消耗作用,砾石含量增多坡面流速明显降低^[25-26]。

2.2 不同砾石含量工程边坡侵蚀特征

2.2.1 侵蚀率随降雨历时变化特征 由图 3 可以看出,坡面侵蚀率随着砾石含量的增加而减小,不同降雨强度下侵蚀率大小及变化过程具有明显差异。当雨强为 40 mm/h 时,随着砾石含量增加侵蚀率减少了 0.001 3~0.015 5 g/s,坡面整体侵蚀率较低,随降雨历时整体呈现出缓慢增加的趋势;当雨强为 60 mm/h 时,随着砾石含量增加侵蚀率减少了 0.021~0.037 g/s,侵蚀率在 10~15 min 时达到峰值,其中当砾石含量为 3%和 15%时,侵蚀率迅速增加后后波浪式缓慢上升,当砾石含量 $\geq 35\%$ 后,侵蚀率迅速达到峰值后开始缓慢下降;当雨强为 80 mm/h 时,随着砾石含量增加侵蚀率减少了 0.015~0.046 g/s,其中砾石含

量为 3%时,坡面侵蚀率 1~15 min 迅速增长后增长速率变缓慢,55 min 时达到峰值后开始下降,当砾石含量 $\geq 15\%$ 时,边坡侵蚀率在 8~12 分钟迅速达到峰值后都开始缓慢下降。随着雨强的增加,不同砾石含量工程坡面侵蚀率也随着增加,当雨强由 40 mm/h 增至 60 mm/h 时,侵蚀率增加了 0.041~0.124 g/s (360%~520%);但雨强由 60 mm/h 增至 80 mm/h 时,侵蚀率增加了 0.002~0.021 g/s (15%~40%)。坡面侵蚀率增速随着砾石含量增多而降低。

2.2.2 砾石含量对侵蚀量的影响 如图 3 所示,不同砾石含量工程边坡降雨侵蚀量与雨强呈幂函数关系($p<0.05$)。工程坡面土壤侵蚀量在不同雨强下均随着砾石含量的增多而减小,在 40, 60, 80 mm/h 雨强下,随着坡面砾石含量的增多侵蚀量分别减少了 15.0~62.5 g, 78.7~145.6 g, 58.6~108.9 g;土质坡面侵蚀量分别是的砾石含量为 15%, 35%, 55%, 75%砾石的 1.19~1.21 倍, 1.41~2.15 倍, 2.1~2.86 倍, 2.55~3.79 倍。

逐步回归分析工程边坡降雨侵蚀量与雨强和砾石含量的关系表明,降雨侵蚀量与雨强及砾石含量呈极显著线性关系:

$$H=9.36I-4.51G-67.309$$

$$(R^2=0.834, p<0.01, N=16) \quad (7)$$

式中: H ——工程边坡侵蚀量(kg); I ——为雨强(mm/h); G ——砾石含量(%)。

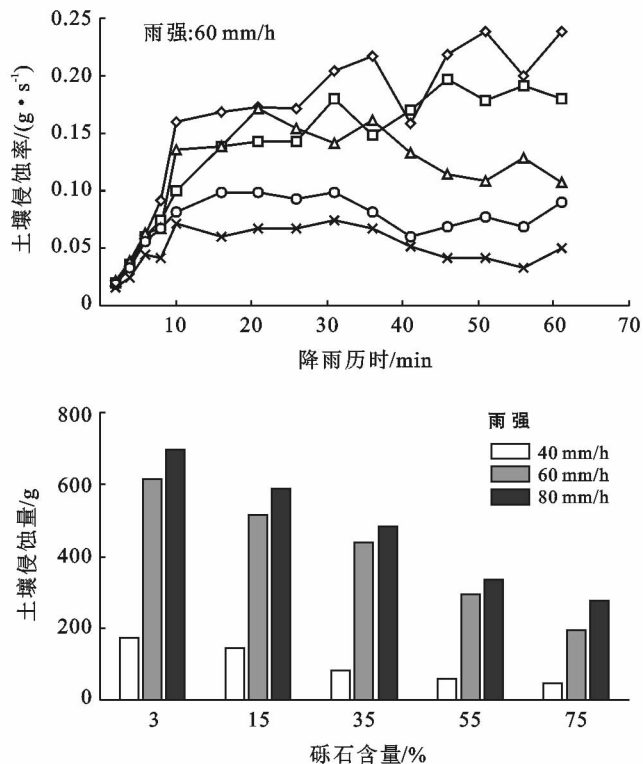
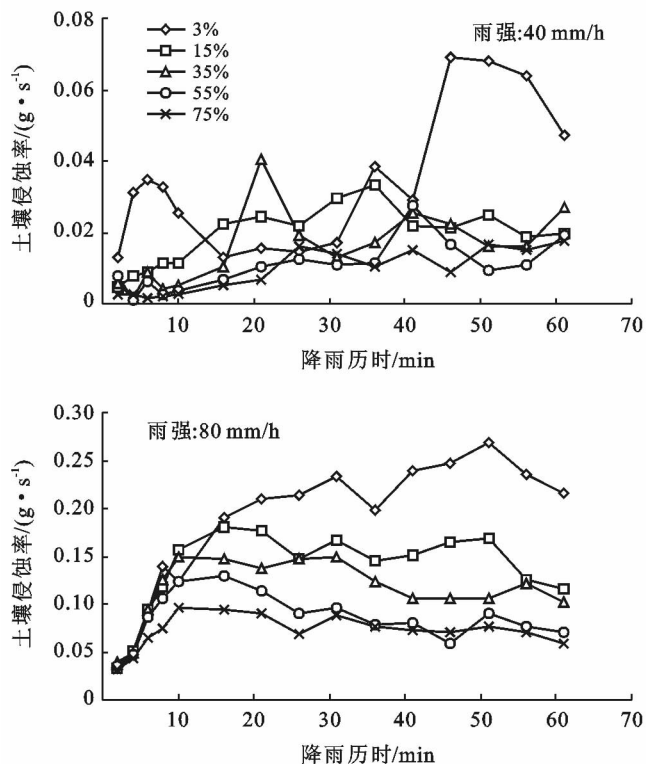


图 3 不同雨强和砾石含量下土壤侵蚀量及侵蚀率随产流历时变化过程

2.3 工程边坡土壤侵蚀率 Y 与径流特征的关系

图 4 为边坡土壤侵蚀率与各径流特征参数的关系,通过对试验所得径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能与侵蚀率进行相关性分析及回归分析,相关性分析表明,工程边坡土壤侵蚀率与径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能均呈显著或

极显著正相关关系,相关系数依次为 0.860,0.922,0.869 和 0.890,径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能对土壤侵蚀率有显著影响;回归分析表明,工程边坡土壤侵蚀率与径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能呈显著幂函数或线性函数关系,具体变化方程式如图 4 所示。

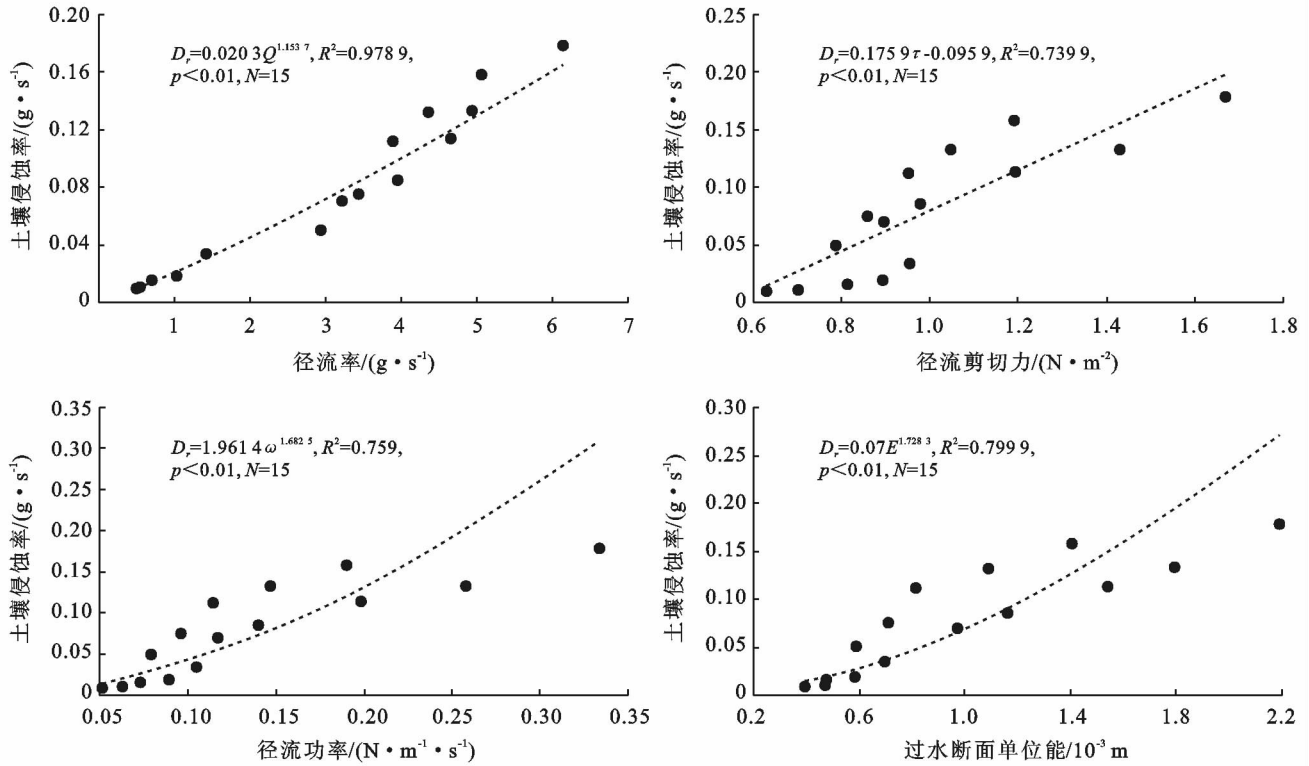


图 4 土壤剥蚀率与水动力学参数的关系

3 讨论与结论

(1) 工程坡面所含砾石增加了土壤入渗率并降低了径流流速,产流时间随砾石含量的增加而延长并与雨强呈线性函数关系;径流率随着砾石含量的增多而减少,不同雨强下,径流率随降雨历时变化过程有明显的差异。不同雨强下径流剪切力、径流功率、过水断面单位能与砾石含量均呈极显著负相关关系。

(2) 坡面侵蚀量随着砾石含量的增加而减小,降雨侵蚀量与雨强及砾石含量呈极显著线性关系;不同雨强和砾石含量下,坡面径流率大小及变化过程具有明显的差异性,随着坡面土壤砾石含量的增多,径流率变化幅度减少,坡面侵蚀量逐渐下降;坡面砾石具有抗侵蚀作用。

(3) 工程边坡土壤侵蚀率与径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能均呈显著或极显著正相关关系,径流剪切力、径流功率、过水断面单位能对工程边坡土壤侵蚀有显著影响,回归分析表明,工程

边坡土壤侵蚀率与各水动力学参数呈显著幂函数或线性函数关系。

砾石对工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征的影响不仅取决于砾石含量,也取决于砾石的粒径及其形状,后者对径流入渗特征、坡面径流具有重要影响。本文仅基于 50° 短坡下的模拟试验结果开展不同砾石含量和雨强对工程边坡土壤侵蚀的影响研究,但实际上工程边坡坡度、坡长对于工程边坡土壤侵蚀也存在显著影响。因此,今后仍需针对不同坡长、坡度、砾石粒径及其形状、植被覆盖等因素对工程边坡土壤侵蚀特征的影响进行深入研究。

[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, 2018, 43(2): 114-120.
- [2] 汤小槽,金晓斌,沈春竹,等. 高速铁路施工建设土地破坏特征与防控措施[J]. 中国土地科学, 2010, 24(1): 56-60.

- [3] 乌玲瑛,严力蛟.基于GIS和RUSLE模型道路对土壤侵蚀格局的影响研究:以浙江省杭金衢高速诸暨段为例[J].生态学报,2014,34(19):5659-5669.
- [4] Li Tianyang, He Binghui, Chen Zhanpeng, et al. Effects of gravel on infiltration, runoff, and sediment yield in landslide deposit slope in Wenchuan earthquake area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(12):12075-12084.
- [5] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling [J]. Water Resources Research, 2012,48(5):1-21.
- [6] Li Tianyang, He Binghui, Chen Zhanpeng, et al. Effects of gravel on concentrated flow hydraulics and erosion in simulated landslide deposits[J]. Catena, 2017,156(9):197-204.
- [7] Lin Jinshi, Huang Yanhe, Zhao Gan, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully[J]. Catena, 2017,157(10):47-57.
- [8] 王蕙,胡秀君,山成菊,等.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.
- [9] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏,等.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.
- [10] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, et al. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments [J]. Catena, 2012,92(5):38-48.
- [11] Papanicolaou A N, Dermisis D C, Elhakeem M. Investigating the role of clasts on the movement of sand in gravel bed rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(9):871-883.
- [12] 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.
- [13] Wu Lei, Peng Mengling, Qiao Shanshan, 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.
- [14] 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.
- [15] 王晨泮,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征[J].农业机械学报,2017,48(4):224-232.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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):1-15.
- [19] 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.
- [20] 王昌全,刘世全.二郎山森林土壤类型研究[J].四川大学学报,1990,8(4):298-311.
- [21] 吕佼容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2018,30(2):1-12.
- [22] 吕刚,王婷,王韞策,等.辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):86-92.
- [23] 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.
- [24] 王小燕,李朝霞,蔡崇法,砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
- [25] 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.
- [26] 占顺.砾石覆盖对坡面流水动力学特性试验研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2015.
- [27] 白玉洁,张风宝,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.