

模拟降雨条件下角砾和圆砾对陡峭路堑边坡产流产沙的影响

罗璟¹, 裴向军¹, 黎俊豪¹, 曹龙熹¹, 单诗涵^{1,2}, 黄颖萍¹

(1.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,

四川 成都 610059; 2.中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要: [目的] 研究角砾和圆砾对陡峭工程边坡入渗、产流、产沙以及水动力学特征,为青藏高原地区工程边坡土壤侵蚀预测模型与水土保持工作提供一定的理论支撑。[方法] 基于青藏高原地区派墨农村公路沿线气候特征及其土质路堑边坡形态和物质组成特征,通过室内人工降雨模拟试验,研究了在强降雨(120 mm/h),大坡度(50°),3种砾石含量(30%,40%,50%)条件下圆砾和角砾坡面宏观侵蚀特征和产流产沙规律。[结果] 圆砾坡面平均入渗率高于角砾坡面,平均产流率低于角砾坡面,初始产流时间明显晚于角砾坡面;圆砾和角砾坡面水流流态均属于层流,流型均为急流,圆砾坡面的径流剪切力、径流功率、雷诺数略小于角砾坡面,但弗劳德数远大于角砾坡面,流速大于角砾坡面,阻力系数小于角砾坡面,径流挟沙能力更强;圆砾坡面稳定产沙率约为角砾坡面的2倍,总产沙量比角砾坡面高出约20%。[结论] 卵砾石表面光滑,与土壤间贴合不够紧密,形状更容易引起局部湍流,在强降雨条件下,陡峻冲洪积路堑边坡坡面易发育以卵砾石为中心,遍布坡面的环形小细沟,细沟发育数量和产沙量都将大于以棱角状碎块石组成的崩坡积路堑边坡。

关键词: 派墨公路; 路堑边坡; 砾石形状; 水动力学特征; 产流产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0001-10

中图分类号: S157.1, TV131.2

文献参数: 罗璟, 裴向军, 黎俊豪, 等. 模拟降雨条件下角砾和圆砾对陡峭路堑边坡产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 1-10. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.001; Luo Jing, Pei Xiangjun, Li Junhao, et al. Effects of breccias and round gravels on steep cut slope runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 1-10.

Effects of Breccias and Round Gravels on Steep Cut Slope Runoff and Sediment Yield Under Simulated Rainfall

Luo Jing¹, Pei Xiangjun¹, Li Junhao¹, Cao Longxi¹, Shan Shihan^{1,2}, Huang Yingping¹

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2.Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: [Objective] The effects of breccias and round gravels on steep cut slope infiltration, runoff, sediment yield, and hydrodynamic characteristics were analyzed in order to provide a theoretical basis for a soil erosion prediction model and soil conservation on a steep cut slope on the Qinghai-Tibet Plateau. [Methods] Based on the shape and material composition of a steep cut slope and on climatic characteristics along the Pai-Mo road, the cut slope runoff and sediment yield process was observed by using indoor simulated rainfall experiments. The experimental conditions were 50° slope, 120 mm/h rainfall intensity, different gravel contents (30%, 40%, 50%), and different gravel roundness (pebble, breccia). [Results] The average infiltration rate for the pebble slope was higher than for the breccia slope. The average runoff rate for the pebble slope was lower

收稿日期: 2022-09-12

修回日期: 2022-10-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“西部地区重大地质灾害潜在隐患早期识别与监测预警”(41521002), “红壤丘陵区小流域路网的水沙效应作用机理与模拟”(41571273); 国家重点研发计划资助项目“强震特大滑坡动力致灾机理与风险预测”(2017YFC1501002)

第一作者: 罗璟(1990—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害形成机制与风险评估研究。Email: luoj@cdut.edu.cn。

通信作者: 裴向军(1970—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价与防治研究。Email: peixiangjun2012@cdut.cn。

than for the breccia slope. The initial runoff time for the pebble slope was significantly later than for the breccia slope. The water flow state and pattern for both slopes were laminar and jet, respectively. Although the runoff shear force and Reynolds number for the pebble slope was slightly smaller than for the breccia slope, the Froude number and the average flow velocity for the pebble slope were larger than for the breccia slope. Therefore, the ability of runoff to carry sediment was greater for the pebble slope. The sediment yield rate for the pebble slope was double the rate observed for the breccia slope, and the total sediment yield for the pebble slope was about 20% higher than for the breccia slope. [Conclusion] Because pebbles do not fit closely together in the soil, they are more likely to cause turbulence under heavy rainfall, causing small annular rills to form centered on the pebbles scattered all over the pebble slope. The rill density and total sediment yield will be greater for a steep cut slope underlain by alluvial deposits than for a steep cut slope underlain by colluvial deposits.

Keywords: Pai-Mo road; cut slope; gravel shape; hydrodynamic characteristics; runoff and sediment yield

随着国民经济持续高速发展,“西部大开发”“一带一路”建设与国防安全战略的相继实施,西部山区已成为铁路公路、梯级水电、油气管线等国家重大工程的高密度区。青藏高原纵横横云,群峰耸峙,天路漫漫,是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障,被誉为“世界屋脊”^[1]。但复杂的地形地质、敏感脆弱的生态环境、多变的气候,也给青藏高原地区公路建设带来了极大的困难和挑战。公路建设导致地表破坏,形成大量次生裸地,已成为青藏高原诱发水土流失的主要因素,且相较平原地区而言影响更为严重,加剧青藏高原生态系统承载力的下降^[2]。如何最大限度降低公路建设造成的水土流失问题,保护沿线生态,已成为推动青藏高原地区高质量发展的关键点和难点^[3]。

公路建设将改变自然坡面形态,形成路面、路堑边坡、路堤边坡等不同侵蚀产沙部位,而由于不同部位下垫面性质和侵蚀驱动力的巨大差异,导致侵蚀方式差异悬殊^[2]。公路土质路堑边坡属于具有特殊结构的人工“再塑”地貌单元,其物质组成复杂、坡度较陡、结构松散、完全暴露,常在水力与重力的共同作用下发生复合侵蚀,仅在小雨作用下即会发育大量细沟,土壤侵蚀速率远超原地貌,造成的泥沙流失量显著高于耕地、林地等侵蚀地貌单元,是青藏高原地区公路建设造成水土流失的主要来源之一^[4]。这些土质路堑边坡都是由残积、崩坡积、冲洪积、冰积、淤积、风积等不同成因的第四纪堆积物组成^[5],其来源及形成过程决定了其质地、结构、孔隙率、有机质含量、砾石含量和形状等,从而影响相应的物理力学特征和产流产沙规律。

目前,国内外研究学者采用室内模拟降雨试验、室内模拟冲刷试验、现场长期径流小区观测等方法,对砾石覆盖和砾石嵌套对土壤水文和产沙过程的影响开展了大量的研究。随着砾石覆盖度的增加,拦截

径流的效应越强^[6],雨滴溅蚀和径流对土壤结构的冲击影响越小^[7],导致坡面径流量、产沙量和流速减小,入渗能力增强^[8-9]。针对砾石嵌套的研究,当嵌套砾石含量较少时,由于砾石的相对不透水性,将降低坡面的入渗性,而当嵌套砾石含量较多时,其破坏了土壤结构,增大了孔隙率,将有助于水的入渗^[10],所以砾石含量、尺寸、赋存形式等区别,砾石嵌套对坡面水文和产沙过程的影响表现出抑制、促进或双重效应作用^[11]。总体而言,砾石嵌套将延长初始产流时间,使面流速、径流量和总产沙量增大,但产沙率随着降雨时间的延长会逐渐减小^[12-13]。

此外,砾石磨圆度对坡面入渗、水动力学特征均会造成影响,从而改变坡面产沙特征。关于砾石磨圆度对土壤侵蚀影响规律的研究十分匮乏,目前仅有少数学者试验发现。由于卵石表面更为光滑,对坡面径流的阻碍更小,所以含卵石坡面相较含角砾坡面而言产生的径流流速更快^[14-15]。但是在工程建设中,特别是在西部山区,河流阶地发育、冰川活跃,常需开挖由河流搬运或者冰川运动形成的覆盖层,开挖边坡中大量发育具有一定磨圆度或者磨圆度较好,呈次棱角状或者亚圆形的碎块石和砾石。因此,本文基于青藏高原雅鲁藏布江下游地区派墨农村公路沿线气候特征、及其土质路堑边坡的形态和物质组成特征,通过室内模拟降雨试验,研究高坡度、高砾石含量、强降雨条件下的工程边坡侵蚀特征,分析砾石磨圆度对工程边坡的入渗、产流、产沙以及水动力学特征的影响,以期为青藏高原地区含砾石工程边坡土壤侵蚀预测模型与水土保持工作提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

派墨农村公路由华能集团出资援建,中国电建勘测院设计,位于西藏自治区东南部林芝市境内,起于

林芝市米林县派镇,采用特长隧道穿越多雄拉雪山后,沿多雄河谷展布,经拉格、汗密、老虎嘴、阿尼桥,止于墨脱县背崩乡解放大桥,穿越雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区的试验区,全线长约 67.22 km。公路沿线所处多雄河流域属于喜马拉雅东构造结地区,地形起伏大,河谷深切,山势陡峻,是青藏高原隆升,侵蚀最强烈的地区,公路最高海拔约 3 564 m(多雄拉隧道入口),最低海拔约 680 m(解放大桥)。其中派镇—多雄拉隧道入口段为海拔上升段,公路坡降达 71.8%;多雄拉隧道出口至解放大桥段,全程约 52.2 km,海拔落差达 2 863 m,公路坡降达 54.8%。工程于 2014 年 4 月开工,参照农村公路四级标准,2021 年 5 月全线贯通。至此,林芝市至墨脱县城的里程由经波密县城的 352 km 缩短为经派镇的 180 km,并形成进出环线,打通交通瓶颈,极大地缓解了墨脱秘境进出难题。

雅鲁藏布江下游地区第四系覆盖层分布广、类型多,厚度大,物质组成和层次结构复杂,按成因类型主要可分为残积、崩坡积、冲洪积、冰积、淤积,涉及雅鲁

藏布江多级阶地演化以及冰川运动堵江后形成的古堰塞湖湖积层。公路沿线土质路堑边坡视土质的组成、胶结程度及地表自然坡度情况,采用 1:0.75~1:1.5 坡比进行开挖,每 10~12 m 高设置一道 2.0 m 宽的边坡平台。

经现场调查发现,派墨公路起点所在的派巴沟沟口,主要分发育高程 3 150 m,3 030 m,2 950 m 的三级台地。派镇至松林口盘山路段范围内(海拔高程 3 050~3 280 m),开挖出露雅鲁藏布江 V 级与 VI 级阶地,由更新世冲洪积层组成,为含(漂)砂卵砾石土层,中密密实,无胶结,磨圆度好,呈次圆状、磨圆状,其中孤(漂)石组(>200 mm);卵石组(60~200 mm);砾粒组(2~60 mm);砂粒组(0.075~2 mm);细颗粒组(<0.075 mm)=25:15:27:30:3。而崩坡积物在派墨公路不同区段均广泛分布,多为含(孤)块碎石土层,结构松散,无胶结,磨圆度差,呈次圆状、次棱角状,其中块石组(>200 mm);碎石组(60~200 mm);砾粒组(2~60 mm);砂粒组(0.075~2 mm);细颗粒组(<0.075 mm)=25:20:22:28:5(图 1)。



a 冲洪积路堑边坡



b 崩坡积路堑边坡

图 1 派墨公路沿线冲洪积和崩坡积路堑边坡物质组成特征

Fig.1 Material composition characteristics of alluvial and colluvial deposits cut slopes along the Pai-Mo road

派镇位于雅鲁藏布江干流大渡卡河段,距上游米林气象站(海拔高程约 2 950 m)约 76 km。根据米林气象站 1981 年至今的气象资料可知,该地区多年平均气温 8.6 °C,极端最高气温和极端最低气温分别为 29.7 °C, -15.8 °C,多年平均降雨量为 702.1 mm,降雨主要集中在 5—9 月,日最大降雨量 81.8 mm,属于高原温带半湿润气候。多雄拉山是大陆高原寒流和印度洋暖湿气流的交汇处,气候风云莫测,经常大雾弥漫,被称为进出墨脱的“鬼门关”。而多雄河流域属于山地温带和亚热带季风湿润气候区,是中国年降雨

量最大的地区之一,其中拉格以上属于高山地区,降水以冰雪为主,拉格以下以降雨为主,据汗密雨量站(海拔高程约 2 200 m)记录,年累计降雨量约 3 500 mm,日最大降雨量达 85 mm。

1.2 试验装置与材料

试验于 2022 年 3—5 月在成都理工大学人工模拟降雨试验大棚进行,径流泥沙样的采集及分析工作均于该时段内完成,模拟研究不同成因砾石嵌入条件下坡面产流产沙过程和规律。降雨装置由支架、喷头、泄压阀、水管、水泵和储水袋组成,其中喷头由美

国 Spraying Systems 公司生产, 型号 1/2 HH-50 WSQ, 架设高度 3 m, 降雨强度可以通过泄压阀调节水压来控制, 变化范围为 20~120 mm/h, 有效降雨面积为 2 m×2 m, 降雨均匀度 >80%, 满足人工降雨模拟精度要求^[16]。试验所用土槽规格(长×宽×高)为 0.6 m×0.3 m×0.2 m 的钢槽, 底部均匀打直径 5 mm 孔, 土槽下端焊接集流槽, 便于收集径流和泥沙。

试验土壤取自于派墨公路 K2+814 m 处冲洪积层中, 取样部位属于高原温带半湿润气候区, 土壤容重为 1.2 g/cm³, 天然含水率约 11%, 砂粒含量 54.92%, 粉粒含量 17.13%, 黏粒含量 27.95%, 土壤经自然风干后过 2 mm 筛后备用。依据美国农业部制土壤质地分类标准, 土壤质地为砂质黏壤土, 机械组成以砂粒为主。根据模拟降雨试验条件和现场水力搬运颗粒的粒径范围, 确定试样的最大粒径为 60 mm, 其中砾石(2~60 mm)使用粒径和密度相近的建筑碎石和卵石制样。

1.3 试验设计

基于派墨公路沿线降雨监测数据, 试验设置降雨强度为 120 mm/h, 以达到侵蚀性降雨效果。由于沿线路堑边坡的开挖坡度位于 41°~63°之间, 平均值为 51°, 因此试验坡度设计为 50°。根据沿线路堑边坡颗粒分析发现, 2~60 mm 砾粒组平均质量占比约为 40%, 故试验坡面砾粒含量根据质量比设置为 3 个梯度, 分别为 30%, 40%, 50%, 其中圆砾坡面、角砾坡面分别采用建筑卵石和碎石制样, 不同粒径砾石质量比按照(60~40):(40~20):(20~10):(10~5):(5~2) mm=5:6:6:4:4 进行均匀混合配置。

1.4 试验步骤

(1) 试验土槽制作。为了模仿天然渗透层, 并防止土壤从排水孔漏出, 土槽底部放置 1 层 1 cm 厚的砾石(粒径 5—10 mm), 然后在砾石层上铺 1 层透水细纱布。根据含石量计算所需的土壤和砾石的质量, 充分搅拌混合均匀后, 分层装入土槽, 每 5 cm 作为 1 层, 填土总厚度为 15 cm, 层与层之间进行刮毛处理, 减小土层之间的边界效应, 并控制土壤容重约 1.2 g/cm³, 保证土壤容重和天然状态下一致。

(2) 制样质量控制。在完成试验土槽制作后, 基于数字图像处理技术控制制样质量, 在确保试验前相同含石量条件下角砾坡面和圆砾坡面的砾石比表面积差异小于 3%(表 1), 并具有相似的空间排列特征后(图 2), 才开展试验, 以减少砾石比表面积和空间布局差异对试验结果的影响, 具体步骤如下: ①获取试样的影像数据; ②通过 Photoshop CS5 进行几何纠正与空域增强; ③通过 Image J 进行二值化处理, 并使用 Photoshop CS5 删除多余噪点, 充填块石内部

缺失, 生成精细的二值化影像, 获取砾石空间排列特征; ④读取统计砾石像元数量, 计算砾石比表面积。

(3) 降雨强度率定。使用雨量计测定土槽四角和中心降雨强度, 计算平均降雨强度及降雨均匀度, 以达到设计要求。

(4) 前期湿润处理。在正式降雨前利用洒水壶对试样进行轻微洒水至排水孔渗水为止, 并静置 12 h 再进行降雨试验, 以保证每次试验时的土壤含水量和水分分布状况较为一致。

(5) 泥沙径流采集及流速测量。模拟降雨开始后用精度 0.01 s 的秒表记录初始产流时间。当降雨开始至坡面开始产生稳定水流这段时间为初始产流时间, 坡面稳定产流后降雨 30 min。坡面初始产流后, 间隔每 2 min 使用集流瓶收集泥沙径流样品。每次间隔 2 min 采用颜色示踪法测量水流的流速, 将 KMnO₄ 溶液从土槽顶部滴下, 记录其向下流经土槽底部的时间, 从而得出水流流速。

(6) 降雨后处理。坡面产流后进行历时 30 min 的地表径流及泥沙收集, 并用秒表记录时间, 每 2 min 收集一次样品, 使用精度 0.1 g 电子秤测量含泥沙径流质量, 然后将样品静置 8 h, 待泥沙和水分层后, 倒掉上清液, 取出湿泥沙装入铝盒, 放于烘箱(105 °C, 8 h)烘干后称重。

1.5 数据分析方法

运用 Excel 2019 进行数据简单计算、汇总, 使用 SPSS 25.0 进行数据统计分析, 运用 Origin 2018 进行图件绘制。

(1) 初始产流时间(T_0)指从降雨至坡面开始稳定产流的时间, 单位为 s。

(2) 径流量(q)为恒定产流一段时间所汇集的产流量, 单位为 cm³。

$$q = \frac{M - M'}{\rho_w} \quad (1)$$

式中: M 为含泥沙浑水总质量(g); M' 为泥沙干重(g); ρ_w 为水的密度(g/cm³)。

(3) 产流率(Q)和产沙率(D)分别为单位时间单位面积坡面的径流量(mm/min)和产沙量[g/(m²·min)], 分别表征产流强度和侵蚀强度。

$$Q = \frac{q}{AT} \quad (2)$$

$$D = \frac{M'}{AT} \quad (3)$$

式中: A 为坡面面积(mm²); T 为降雨时间(min)。

(4) 入渗率(I)为单位时间、单位面积土壤表面入渗的水量, 单位为 mm/min。

$$I = \frac{iT \cos\theta - \frac{q}{A}}{T} \quad (4)$$

式中: θ 为坡度($^{\circ}$); i 为降雨强度(mm/min)。

(5) 平均流速(V)为坡面水动力学特征的重要参数之一,单位为 cm/s,使用染色剂 KMnO_4 示踪法所测流速为表层最大流速,根据本试验坡面径流流态,需乘修正系数 0.75,将其换算为平均流速。

(6) 平均径流深(h)为坡面水流平均水深,单位为 cm。

$$h = \frac{q}{Vbt} \quad (5)$$

式中: b 为水槽宽度(cm); t 为径流取样时间(s)。

(7) 径流剪切力(τ)为表征径流在流动时对坡面土壤剥蚀大小的参数,表示引起坡面土壤颗粒分离并输移的主要动力,单位为 N/m^2 。

$$\tau = \rho_w g Rq \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度,取 $980 \text{ cm}/\text{s}^2$; R 为水力半径(cm),坡面薄层水流可用平均径流深度 h 近似代替。

(8) 径流功率(ω)表示作用于单位面积水流所需要消耗的功率,描述水流流动时挟沙能力的参数,已被大量成熟土壤侵蚀模型所采用,单位为 W/m^2 。

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

(9) 雷诺数(Re)是衡量水流的紊动程度,判别水流流态的无量纲参数。 $\text{Re} < 500$ 为层流, $500 \leq \text{Re} \leq 2000$ 为过渡流, $\text{Re} > 2000$ 为紊流。雷诺数越大,坡面流紊动程度越强,侵蚀能力越强^[17]。

$$\text{Re} = \frac{VR}{\nu} \quad (8)$$

式中: ν 为径流黏滞系数(cm^2/s),与温度有关。

(10) 弗劳德数(Fr)用于表示水流惯性力与重力间对比关系,是判别水流流型的无量纲参数之一。 $\text{Fr} > 1$ 为急流, $\text{Fr} < 1$ 为缓流, $\text{Fr} = 1$ 为临界流。一般而言,弗劳德数越大,径流挟沙能力越强。

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (9)$$

(11) Darcy-Weisbach 阻力系数(f)可表征坡面阻碍水流运动的能力。

$$f = \frac{8ghJ}{V} \quad (10)$$

式中: J 为水力坡度,可用坡度的正弦值近似代替。

2 结果与分析

2.1 不同砾石形状坡面侵蚀发育特征

基于数字图像处理技术,提取降雨前后不同砾石形状坡面降雨前后砾石比表面积变化情况可知,随含石量的增加,降雨前后砾石比表面积变化越大,而在相同含石量条件下,降雨前后角砾坡面的砾石比表面积变化情况略高于圆砾坡面(表 1)。

表 1 不同砾石形状坡面降雨前后砾石比表面积变化

Table 1 Change in specific surface area of gravel slopes with different gravel shapes before and after rainfall

含石量/%	降雨前砾石比表面积/%		降雨后砾石比表面积/%	
	角砾坡面	圆砾坡面	角砾坡面	圆砾坡面
30	24	27	41	43
40	29	32	50	50
50	37	38	67	66

由图 2 可发现,降雨过后角砾和圆砾坡面均产生明显的细沟侵蚀现象。在降雨初期,坡面水流在坡脚处开始侵蚀坡面土壤,形成细沟;随着降雨的持续,在径流溯源侵蚀的作用下,细沟逐渐向坡上部延伸,向两侧扩宽。从坡面侵蚀发育特征发现,角砾坡面主要发育 1~2 条细沟,呈现出单沟规模大且深切的集中型侵蚀特征;而圆砾坡面主要围绕圆砾形成深切环形细沟,呈现出细沟数量多,但规模小且深度较浅的分散型侵蚀特征。

2.2 不同砾石形状坡面水动力学特性

2.2.1 入渗特征 随降雨时间的增加,坡面的入渗率整体上均呈现出逐渐减小趋势。在坡面初始产流后 6—12 min,入渗率迅速减小。在坡面产流后 12—30 min,坡面入渗率逐渐趋于稳定,波动幅度降低。在坡面产流初期,角砾坡面和圆砾坡面的入渗率较为接近,随着降雨持续,圆砾坡面的入渗率逐渐超过角砾坡面(图 3)。

2.2.2 产流特征 由表 2 可知,圆砾坡面的初始产流时间明显晚于角砾坡面,并且随着含石量的增加,两者之间差距逐渐减小;角砾坡面平均产流率均大于圆砾坡面,并且随着含石量的增加,两者之间差距逐渐变大。此外,而产流率随时间的变化呈现出 2 个阶段:①迅速增加阶段,在坡面初始产流至 14 min 左右,产流率迅速增加,但随着含石量的增加,产流率增加幅度逐渐减小。②平缓增加阶段,在产流 14 min 后,产流率逐渐趋于平缓增加趋势,产流率在小幅波动中缓慢增加;在产流初期,角砾坡面与圆砾坡面之间累积产流量差距较小,随着降雨时间的延长,两者之间的差距逐渐拉大(图 4)。

表 2 不同砾石形状坡面初始产流时间和平均产流率

Table 2 Initial runoff time and average runoff rate of different gravel shapes

含石量/%	初始产流时间/s		平均产流率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	
	角砾坡面	圆砾坡面	角砾坡面	圆砾坡面
30	112	155	1.123	1.116
40	99	123	1.318	1.158
50	91	109	1.348	1.190

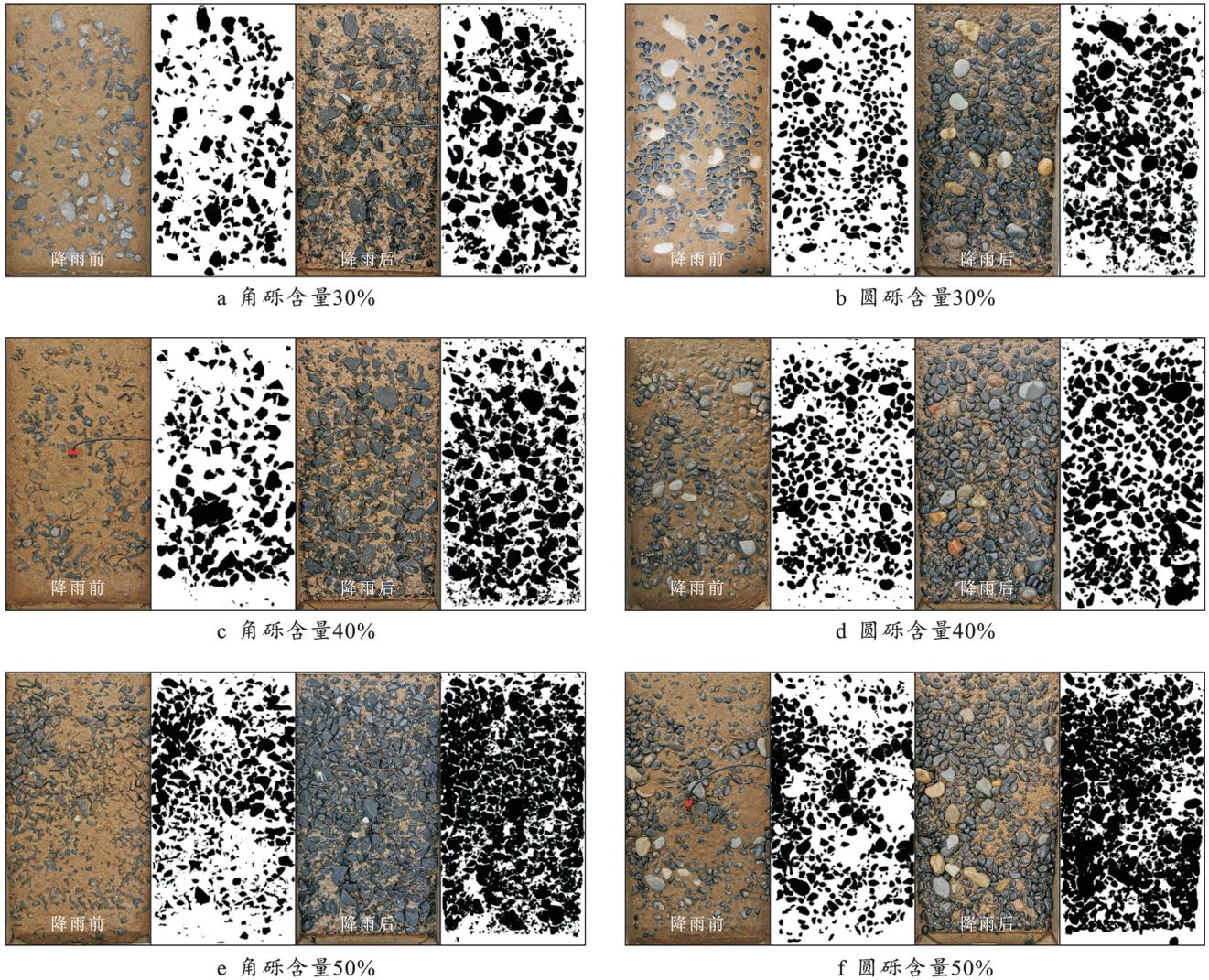


图 2 不同砾石形状坡面宏观侵蚀特征

Fig.2 Erosion characteristics of different gravel shapes

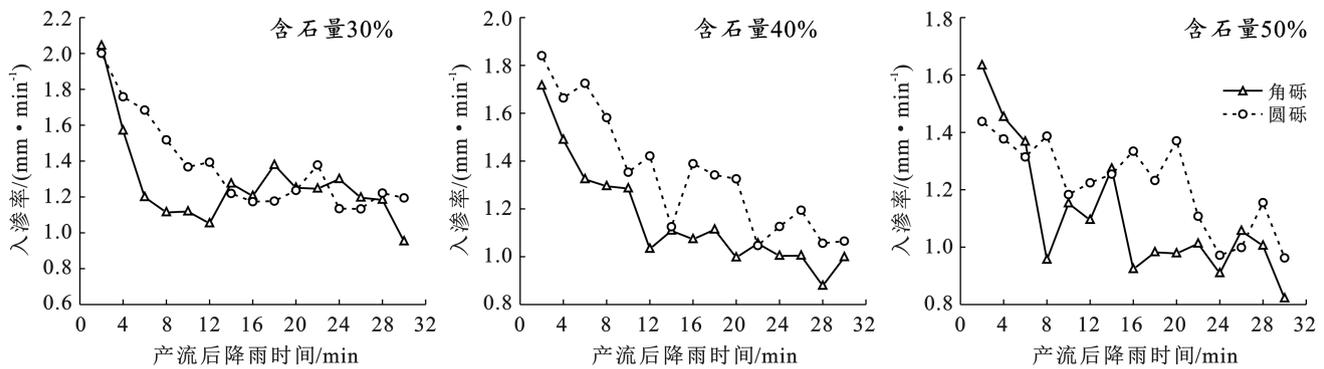


图 3 不同砾石形状坡面入渗率变化特征

Fig.3 Infiltration rate of different gravel shapes

2.2.3 流速 总体而言,各坡面流速随时间呈逐渐减小趋势,这与众多学者研究坡面形成细沟侵蚀过程的流速变化结论一致^[18]。其变化过程可以大致划分为 2 个阶段:①大幅波动阶段,存在于降雨产流初期,流

速在剧烈波动中下降。②平缓下降阶段,存在于在降雨产流中后期,流速波动幅度明显减小,并呈缓慢下降趋势。

由图 5 可知,随着含石量增加,流速达到稳定的

时间越短。圆砾坡面的流速普遍高于角砾坡面,且随时间的波动程度更大。此外,随着含石量增加,无论是角砾还是圆砾坡面,坡面流速均不同程度降低,而

径流剪切力和径流功率均不同程度增加。相比角砾而言,在相同含石量条件下,圆砾坡面流速更大,而径流剪切力和径流功率均更小。

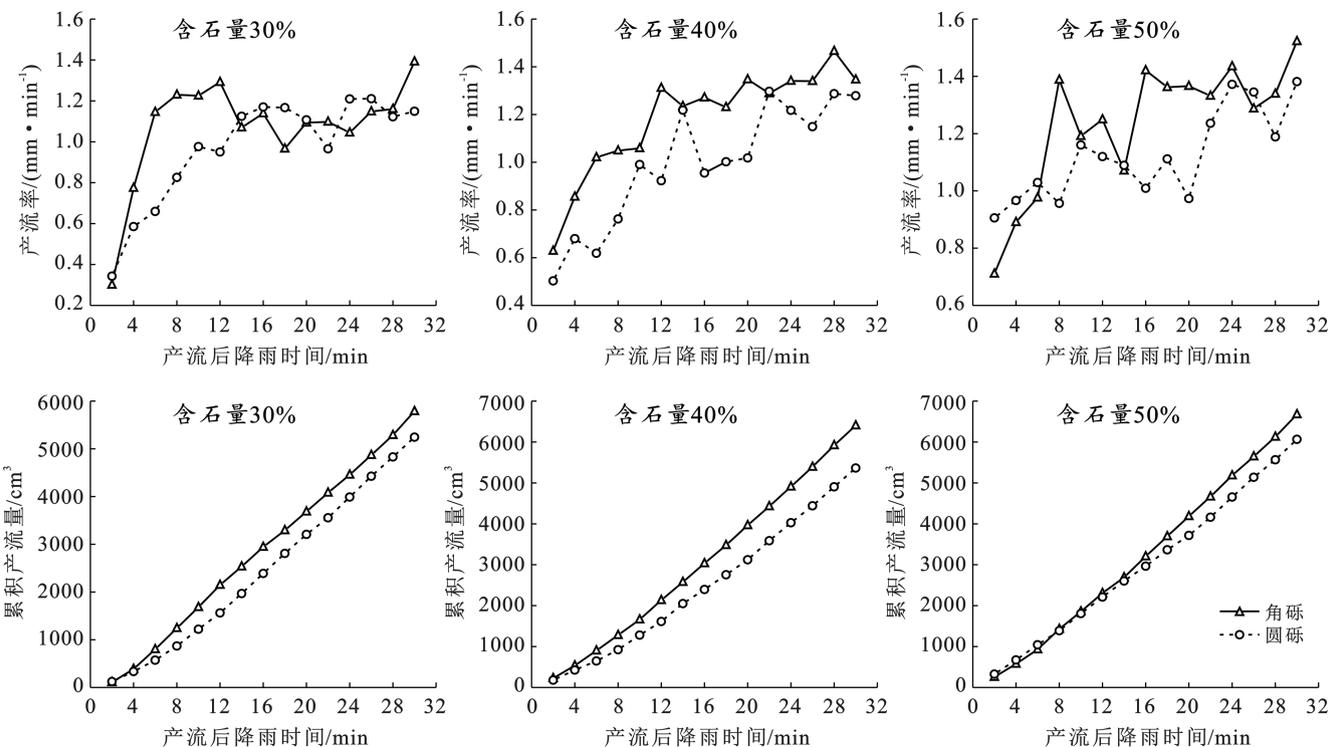


图 4 不同砾石形状坡面产流率和累积产流量变化特征

Fig.4 Runoff and cumulative runoff rate of different gravel shapes

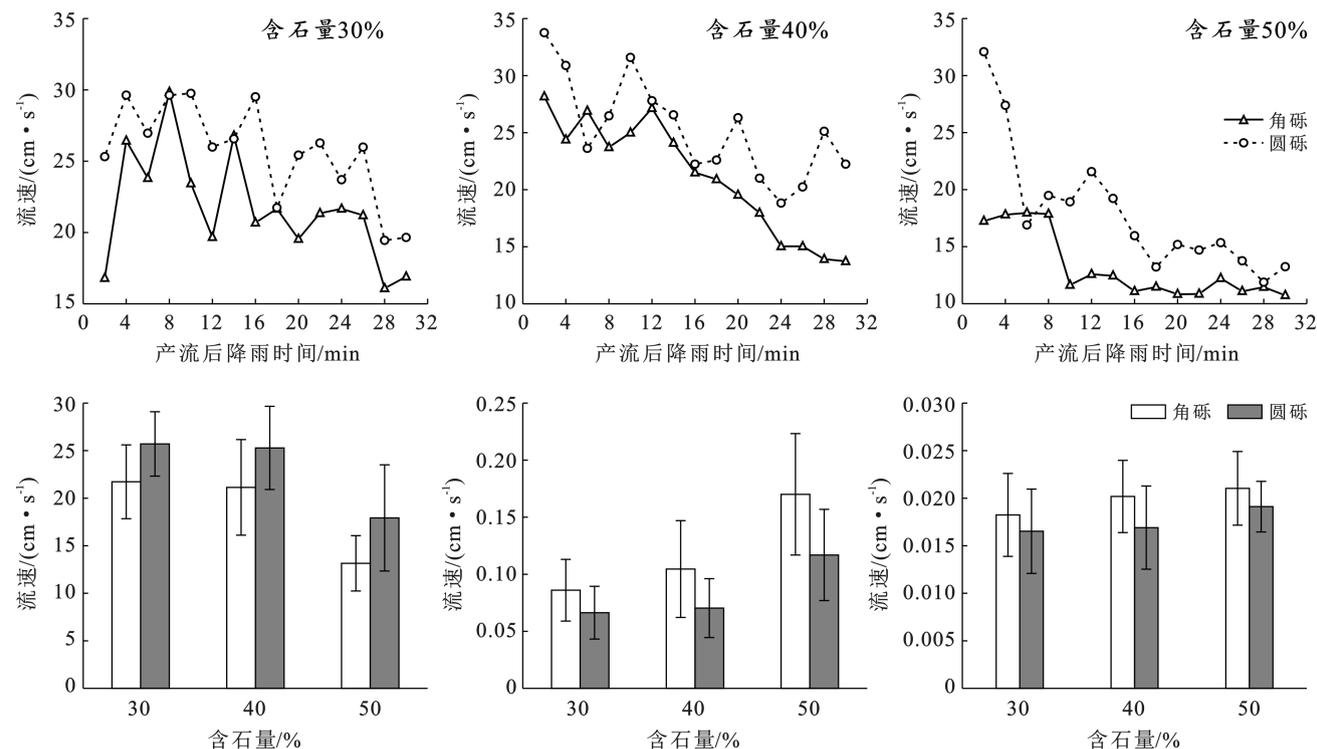


图 5 不同砾石形状坡面水动力参数特征

Fig.5 Hydrodynamic characteristics of different gravel shapes

2.2.4 流态流型 由表 3 可知: ①各坡面阻力系数随着含石量的增加而增大,圆砾坡面的阻力系数均小于角砾坡面,表明圆砾坡面对水流的阻碍作用更小; ②各坡面雷诺数的范围为 5.852~7.675,其坡面水流流态属于层流。圆砾坡面的雷诺数小于角砾坡面,但差距极小,说明砾石形状对坡面水流流态的影响

较小; ③各坡面弗劳德数的范围为 3.152~9.863,其坡面水流流型为急流。各含石量圆砾坡面水流的弗劳德数均大于角砾坡面,并且差距较大,说明砾石的形状对坡面水流的弗劳德数影响较大,决定了坡面的水流流型,砾石磨圆度越高,坡面土壤越容易被侵蚀。

表 3 不同砾石形状坡面阻力系数、雷诺数和弗劳德数

Table 3 Drag coefficient, Reynolds number and Froude number of different gravel shapes

含石量/%	阻力系数 f		雷诺数 Re		弗劳德数 Fr	
	角砾坡面	圆砾坡面	角砾坡面	圆砾坡面	角砾坡面	圆砾坡面
30	0.026	0.014	6.413	5.852	7.321	9.863
40	0.033	0.016	7.585	6.105	6.461	9.422
50	0.140	0.052	7.675	7.191	3.152	5.182

2.3 不同砾石形状坡面产沙特征

由图 6 可知,在降雨初期,即雨滴溅蚀和细沟间侵蚀阶段,角砾坡面和圆砾坡面产沙率差异较小,说明砾石形状和对雨滴溅蚀和细沟间侵蚀的影响很小。角砾坡面产沙率均比圆砾坡面提前达到峰值,这说明其产生细沟侵蚀的时间更早。但圆砾坡面峰值产沙率以及峰值之后的产沙率均普遍大于角砾坡面,说明砾石形状对后期细沟侵蚀阶段的影响较大,最终导致圆砾坡面后期产沙率约为角砾坡面的 2 倍。

各坡面累积产沙量随时间的变化均表现出先缓慢增加,后迅速增加,再缓慢增加的变化特征。在产流初期,角砾坡面累积产沙量大于圆砾坡面;在产流中后期,圆砾坡面累积产沙量逐渐超过角砾坡面,总产沙量比角砾坡面高出约 20%。

随着含石量的增加,圆砾坡面累积产沙量超过角砾坡面的时间有较大幅度的提前,说明含石量对圆砾坡面细沟侵蚀能力的影响程度高于角砾坡面(图 6)。

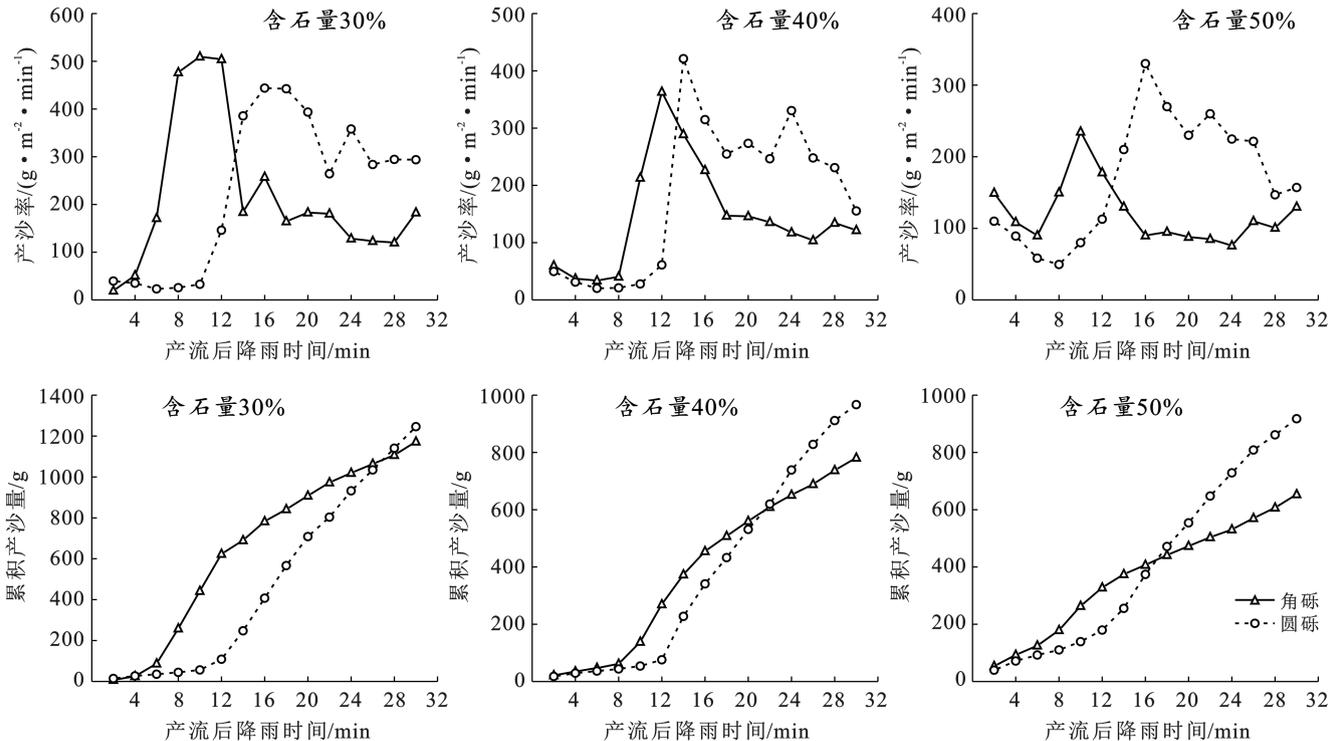


图 6 不同砾石形状坡面产沙率和累积产沙量变化特征

Fig.6 Sediment yield rate and cumulative sediment yield of different gravel shapes

3 讨论

3.1 砾石形状对坡面水动力学特征的影响

由于砾石相对土体而言渗透性更低,故随着含石量的增大、坡面砾石覆盖度的增加,坡面整体入渗率降低^[19-20]。而由于圆砾表面较为光滑,近似于椭球体,坡面水流在向下流动过程中受到的阻力较角砾而言更小,为优先流创造了更多入渗路径,因此水流更容易入渗土体,坡面整体渗透性更高^[21-22],导致圆砾坡面初始产流时间越晚、产流率越低。

在降雨初期,坡面相对平整,坡面薄层水流所受阻力较小,流速较大。随着降雨时间的延长,水流携带泥沙量的增加,消耗的水流动能越大,流速呈波动下降趋势。当细沟侵蚀不断发生发展,细沟不断发育,细沟的曲折性增加,同时沟壁坍塌造成径流含沙量迅速增大,大量消耗水流动能,导致流速不断减小^[23-24]。在细沟发育后期,细沟形态趋于固定,因此流速也趋于平稳^[25]。

随着含石量的增加,坡面的地表粗糙度越大,砾石对水流的分流及阻碍作用越显著^[26],坡面流速均呈现不同程度的降低;由于径流剪切力与径流量和径流深度成正比,随着含石量的增加,产流率升高(表2),径流深度增大,所以径流剪切力随含石量的增加逐渐增大。相对于圆砾而言,角砾棱角多,表面凹凸不平,粗糙度更大,不仅对径流有阻滞作用,而且当角砾存在于细沟沟床时,其将增加径流弯曲度^[27-28],进一步阻碍径流流动,消耗径流动能,导致角砾坡面流速更小,产流率和径流深度更大(表2),因此角砾坡面的径流剪切力和径流功率更大。

此外,由于弗劳德数是关于流速和水深的函数,其与流速成正比,与水深成反比,而水深与径流量呈正相关,圆砾坡面产流率较角砾坡面小,流速却更大,因此圆砾坡面弗劳德数大于角砾坡面。由于阻力系数是关于水深和流速的函数,其与水深成正比,与流速成反比,而圆砾坡面流速大于角砾坡面,产流率却更小,则水深更小,因此圆砾坡面阻力系数较小。

3.2 砾石形状对坡面产沙的影响

产沙率随时间变化情况主要由降雨侵蚀发生发展规律所决定。在降雨初期,坡面薄层水流将雨滴击溅产生的泥沙和坡面的浮土带走,但随着松散土壤逐渐被水流搬运殆尽,坡面薄层水流主要对土壤进行层状剥蚀,故产沙率逐渐趋于稳定,整体表现出逐渐较小的趋势,主要发生雨滴击蚀和细沟间侵蚀;随着降雨时间的延长,逐渐发育细沟侵蚀,坡面薄层水流由面状水流逐渐向线状水流转变,水流侵蚀能力增强,

细沟不断扩大发展,细沟间挟沙薄层水流不断汇聚于细沟内部,细沟内径流量增大,冲刷力和挟沙力增强^[29],侵蚀发育模式包括沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀以及沟壁侧蚀垮落,故产沙率迅速增大;随着细沟发展形态趋于稳定,产沙率相应减小,并趋于稳定。

而只有当径流量达到一定量值后,才可能发生细沟侵蚀^[30]。由于角砾坡面产流率高于圆砾坡面,导致在相同时间内角砾坡面径流量更大,并且由于角砾坡面较粗糙,显著阻滞水流流动,坡面薄层水流更容易汇聚并形成线状水流,所以角砾坡面较圆砾坡面发生细沟侵蚀的时间更早。

此外,由于砾石以嵌入和半嵌入状态存在于表层土壤中,与现场情况一致,嵌入砾石会引起局部湍流,使冲刷在砾石的侵蚀侧发育,显著增加产沙量^[31]。根据试验结束后坡面宏观侵蚀特征可知,角砾表面凹凸不平,粗糙度更大,所以与土壤间贴合更为紧密,在细沟侵蚀发育过程中更加倾向于形成深切宽大的细沟,细沟数量较少;而圆砾表面光滑,与土壤间贴合不够紧密,并且形状更加规则,曲率半径更大,水流产生局部湍流的强度更大,更容易携带圆砾周围土壤,最终形成以圆砾为中心,遍布坡面的环形小细沟,导致产沙量剧增。

4 结论

(1) 在强降雨作用下,陡峻的冲洪积路堑边坡坡面发育以卵砾石为中心,遍布坡面的环形小细沟,细沟发育数量远大于以棱角状碎块石组成的崩坡积路堑边坡。

(2) 圆砾坡面平均入渗率高于角砾坡面,平均产流率低于角砾坡面,初始产流时间明显晚于角砾坡面,并且随着含石量的增加,两者之间初始产流时间的差距逐渐减小。

(3) 砾石坡面水流流态均属于层流,流型均为急流;圆砾坡面径流剪切力、径流功率、雷诺数略小于角砾坡面,但弗劳德数远大于角砾坡面,流速大于角砾坡面,阻力系数小于角砾坡面,径流挟沙能力更强。

(4) 角砾坡面发生细沟侵蚀的时间早于圆砾坡面,但由于圆砾与土壤间贴合不够紧密,并且形状更加规则,曲率半径更大,水流产生的局部湍流作用对圆砾周围土壤冲刷强度更大,所以圆砾坡面稳定产沙率约为角砾坡面的2倍,总产沙量比角砾坡面高出约20%。

[参 考 文 献]

[1] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三

- 极[J].中国科学院院刊,2017,32(9):924-931.
- [2] 徐倩,焦菊英,严晰芹,等.道路侵蚀研究的进展与展望[J].水土保持通报,2021,41(4):357-367.
- [3] 黄在智,孙侃,周晶,等.青藏高原生态脆弱区公路水土保持设计与实践[J].公路,2021,66(6):371-374.
- [4] 徐宪立,张科利,庞玲,等.青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J].地理科学,2006,26(2):2211-2216.
- [5] 徐文杰,胡瑞林.土石混合体概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56.
- [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: 197-204.
- [7] 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.
- [8] 杨苗苗,杨勤科,张科利,等.砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响[J].土壤学报,2021,58(5):1157-1168.
- [9] 马晨雷,戴翠婷,刘窑军,等.砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):150-155.
- [10] 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.
- [11] 许海超.耕作引起的紫色泥岩破碎对坡面水文过程的影响[D].四川 成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2020.
- [12] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
- [13] 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.
- [14] 赵本山,王生新,徐奎,等.山前洪积扇坡面细沟侵蚀跌坑特征的试验研究[J].干旱区地理,2017,40(2):348-354.
- [15] 林敬兰.土石混合崩积体坡面细沟径流流速试验研究[J].水土保持学报,2020,34(5):119-123.
- [16] 孙狂飙,罗易,袁超,等.边坡足尺模型试验人工模拟降雨装置的设计与参数率定[J].安全与环境工程,2019,26(2):69-75.
- [17] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.
- [18] 巩铁雄.砾石空间分布格局及对水文过程影响的研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 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.
- [20] Mandal U K, Rao K V, Mishra P K, et al. Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005,56(4):435 - 443.
- [21] Waldschläger K, Schüttrumpf H. Infiltration behavior of microplastic particles with different densities, sizes, and shapes—from glass spheres to natural sediments [J]. *Environmental science & technology*, 2020, 54(15): 9366-9373.
- [22] Peng Xudong, Shi Dongmei, Jiang Dong, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2014,123:215 - 224.
- [23] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
- [24] 王健,李鹤,孟秦倩,等.黄土坡面细沟横断面形态及其水动力学与挟沙特性[J].水土保持学报,2015,29(3):32-37.
- [25] 蒋芳市,张海东,陈培松,等.土石混合崩积体坡面细沟跌坑发育试验研究[J].水土保持学报,2019,33(6):27-33.
- [26] Cagnoli B, Romano G P. Effects of flow volume and grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: A functional relationship of scaling parameters [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012,117:B02207.
- [27] 韩珍,王小燕,李馨欣.碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J].中国农业大学学报,2016,21(10):102-108.
- [28] 李建明,王文龙,李宏伟,等.黄土区工程堆积体石砾对流速及产沙影响试验研究[J].水力发电学报,2015,34(9):64-74.
- [29] Shen Haiou, Zheng Feili, Wen Leilei, 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.
- [30] 郑粉莉,江忠善,高学田.水蚀过程与预报模型[M].北京:科学出版社,2008.
- [31] Rieke-Zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2007,32(7):1063-1076.