

人工模拟降雨下高寒区坡面径流水动力特性对砾石覆盖的响应

陈亦新¹,王颢霖¹,章志鑫¹,焦菊英^{1,2},林红³,廖俊¹,
严增¹,徐倩^{1,4},张子琦¹,杨波²,李建军^{1,4},李萌萌¹

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西杨凌712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100;3.西藏自治区错那市自然资源局,西藏错那856700;4.山西农业大学水土保持科学研究所,太原030013)

摘要: [目的] 青藏高原地区地形复杂,砾石分布广泛,为研究该地区砾石覆盖与坡面径流水动力参数的关系,以揭示其对土壤侵蚀和生态环境保护的影响。 [方法] 通过室内人工模拟降雨试验,选取4种砾石覆盖度(0、20%、40%、60%)、3种砾石粒径(0.2~2、2~6、6~10 cm)对纯土坡面和土石混合坡面的径流水动力参数进行研究。 [结果] 1)在纯土坡面,流速随砾石覆盖度增加先减小后增大(依次为6.31、3.60、3.59、4.12 cm/s),砾石粒径为0.2~2 cm时,径流深随砾石覆盖度增加而增加(依次为0.42、0.51、0.84、1.03 mm),其他粒径相反;在土石混合坡面,流速随砾石覆盖度增加而减小(依次为5.23、5.07、5.26、3.83 cm/s),径流深变化趋势与纯土坡面一致。2)纯土坡面和土石混合坡面的雷诺数均<500,为层流;弗劳德数变化复杂,砾石覆盖度为40%且砾石粒径为2~6、6~10 cm时为急流,其他条件为缓流。3)在纯土坡面,砾石粒径为0.2~2 cm时,阻力系数随砾石覆盖度增加而增加(依次为0.02、0.02、0.03、0.04),其他粒径相反,曼宁糙率系数随砾石覆盖度增加先增大后减小(依次为0.02、0.06、0.07、0.06);在土石混合坡面,阻力系数变化趋势与纯土坡面一致,砾石粒径为0.2~2 cm时,曼宁糙率系数随砾石覆盖度增加而增加(依次为0.03、0.04、0.13、0.17),其他粒径时相反。4)在纯土坡面,砾石粒径为0.2~2 cm时,水流剪切力随砾石覆盖度增加而增加(依次为1.93、2.34、3.85、4.69 Pa),其他粒径相反,水流功率随砾石覆盖度增加先减小后增大[依次为0.12、0.08、0.07、0.10 N/(m·s)];在土石混合坡面,水流剪切力变化趋势与纯土坡面一致,砾石粒径为0.2~2、2~6 cm时,水流功率随砾石覆盖度增加先增大后减小[依次为0.11、0.13、0.10、0.08 N/(m·s)],粒径为6~10 cm时,水流功率随砾石覆盖度增加先减小后增大[依次为0.11、0.09、0.10、0.11 N/(m·s)]。 [结论] 表层砾石覆盖、土体内部砾石和砾石粒径大小对水动力参数有着不同的调控机制。建议纯土坡面和土石混合坡面的砾石配置分别为小粒径(0.2~2 cm)和中覆盖度(40%)、小粒径(0.2~2 cm)和高覆盖度(60%),以期为该地区土壤侵蚀规律及水土流失防控提供支撑。

关键词: 青藏高原;模拟降雨;砾石覆盖;水动力参数;土壤侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)01-0056-11

Response of Slope Runoff Hydrodynamic Characteristics to Gravel Coverage in Alpine Regions under Artificial Rainfall Simulation

CHEN Yixin¹, WANG Haolin¹, ZHANG Zhixin¹, JIAO Juying^{1,2}, LIN Hong³, LIAO Jun¹,
YAN Zeng¹, XU Qian^{1,4}, ZHANG Ziqi¹, YANG Bo², LI Jianjun^{1,4}, LI Mengmeng¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and

收稿日期:2025-03-28

修回日期:2025-06-12

录用日期:2025-06-30

网络首发日期(www.cnki.net):2025-08-11

资助项目:国家自然科学基金重点项目(42430506);第二次青藏高原综合考察研究专题项目(2019QZKK0603)

第一作者:陈亦新(2001—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:cyxin@163.com

通信作者:焦菊英(1965—),女,研究员,博士,博士生导师,主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail:jjyiao@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Natural Resources Bureau of Cuona City, Xizang Autonomous Region, Cuona, Xizang 856700, China; 4. Institute of

Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: [Objective] The Tibetan Plateau has complex terrain and extensive gravel distribution. This study aims to investigate the relationship between gravel coverage and hydrodynamic parameters of slope runoff in the region, and to reveal its impact on soil erosion and ecological environment protection. [Methods] Laboratory artificial rainfall experiments were conducted to study the hydrodynamic parameters of runoff on bare soil slopes and soil-gravel mixed slopes, using four gravel coverage levels (0, 20%, 40%, 60%) and three gravel size ranges (0.2–2, 2–6, 6–10 cm). [Results] 1) On bare soil slopes, flow velocity initially decreased and then increased with increasing gravel coverage (6.31, 3.60, 3.59, 4.12 cm/s). When the gravel size was 0.2–2 cm, runoff depth increased with gravel coverage (0.42, 0.51, 0.84, 1.03 mm), while the opposite occurs for other particle sizes. On soil-gravel mixed slopes, flow velocity decreased with increasing gravel coverage (5.23, 5.07, 5.26, 3.83 cm/s), and the trend of runoff depth was consistent with that on bare soil slopes. 2) The Reynolds numbers for both bare soil slopes and soil-gravel mixed slopes were below 500, indicating laminar flow. The Froude numbers showed complex variation. With gravel coverage of 40% and gravel sizes of 2–6, 6–10 cm, the flow was rapid. Under other conditions, it was tranquil. 3) On bare soil slopes, when the gravel size was 0.2–2 cm, the resistance coefficient increased with gravel coverage (0.02, 0.02, 0.03, 0.04), while showing inverse trends for other sizes. The Manning roughness coefficient first increased and then decreased with gravel coverage (0.02, 0.06, 0.07, 0.06). On soil-gravel mixed slopes, the variation trend of resistance coefficient remained consistent with that on bare soil slopes. For gravel sizes of 0.2–2 cm, the Manning roughness coefficient increased with gravel coverage (0.03, 0.04, 0.13, 0.17), while the opposite trend was observed for other sizes. 4) On bare soil slopes, when the gravel size was 0.2–2 cm, shear stress increased with gravel coverage (1.93, 2.34, 3.85, 4.69 Pa), while exhibiting opposite trend for other sizes. Stream power first decreased then increased with gravel coverage [0.12, 0.08, 0.07, 0.10 N/(m·s)]. On soil-gravel mixed slopes, the variation trend of shear stress was consistent with that on bare soil slopes. For gravel sizes of 0.2–2 and 2–6 cm, stream power first increased then decreased with gravel coverage [0.11, 0.13, 0.10, 0.08 N/(m·s)]. For gravel sizes of 6–10 cm, stream power first decreased and then increased [0.11, 0.09, 0.10, 0.11 N/(m·s)]. [Conclusion] Surface gravel coverage, internal gravel content, and gravel size have different regulatory effects on hydrodynamic parameters. It is recommended that bare soil slopes adopt a configuration of small gravel sizes (0.2–2 cm) with medium cover (40%), and soil-gravel mixed slopes use small gravel sizes with high cover (60%). This study provides support for understanding soil erosion patterns and preventing soil and water loss in the region.

Keywords: Tibetan Plateau; simulated rainfall; gravel coverage; hydrodynamic parameters; soil erosion

Received: 2025-03-28

Revised: 2025-06-12

Accepted: 2025-06-30

Online(www.cnki.net): 2025-08-11

土壤是一种有限资源,在人类生产生活中起着重要作用,土壤质量的好坏直接影响生态环境和社会经济的可持续发展。随着人类活动的增加,对土壤的扰动也越来越频繁,使得土壤侵蚀逐渐成为土壤退化的因素之一。目前,我国土壤侵蚀呈由东向西逐渐递增趋势,虽然治理成效较为显著,但西部地区的水土保持率仍较低^[1]。降雨是土壤侵蚀发生的动力,丁贵惠等^[2]在黑土坡耕地研究发现,降雨侵蚀力对坡面径流起主要决定作用,径流量随降雨侵蚀力的增加而增加;邬铃莉等^[3]在北方土石山区研究表

明,雨强和雨量是造成土壤侵蚀的主要指标;林庆明等^[4]在红壤坡面研究指出,累积径流量随降雨强度的增加而增加。受全球气候变化的影响,青藏高原降雨增多,土壤侵蚀风险也随之增加,加强对该地区土壤资源的保护尤为重要^[5]。

砾石作为地表覆盖物,能够影响降雨的入参与再分布、地表径流的形成过程及其水动力特性等关键水文环节,从而间接调控土壤侵蚀的发生和发展^[6]。砾石的粒径和覆盖度对水流的输沙能力、速度和能量产生显著影响,进而影响土壤颗粒的运动和

沉降^[7]。在小尺度上,砾石的分布影响砾石边缘地表水流的形成;而在中尺度上,砾石的覆盖则对坡面地表水流的连续性起着控制作用^[8]。为探求砾石覆盖度与坡面流水动力学参数间的关系,各地学者已开展了一些相关研究。比利时实验地貌学实验室对硅质粉土的研究^[9]发现,平均流速随着砾石覆盖率的增加按幂函数稳定降低,平均流深、雷诺数、阻力系数按幂函数增加;在我国北方山区的褐土坡面,砾石覆盖度增大,削弱径流动能,表现为流速、雷诺数和弗劳德数持续下降,阻力系数升高^[10];在黄土坡面,径流深、雷诺数、阻力系数与砾石覆盖度呈正相关,与流速和弗劳德数呈负相关^[11];在我国三峡库区的紫色土坡地,砾石覆盖度增大,流速、弗劳德数减小,径流深、水流剪切力、阻力系数和曼宁糙率系数增大,雷诺数变化不明显^[12];在我国沿海地区盐碱土边坡,雷诺数、弗劳德数随砾石覆盖度先增后减,曼宁糙率系数、阻力系数、坡面径流剪切力和径流功率随砾石覆盖度的增大而线性增大^[13]。由此可知,在不同的地区,砾石覆盖与径流水动力学参数间存在不同规律。目前,有关砾石覆盖对坡面流水动力学参数的研究较多,但由于青藏高原地区特殊的气候和地形条件,使得该地区相关研究有所欠缺^[14]。

青藏高原海拔高、气候寒冷,被誉为亚洲水塔,其生态环境较为脆弱,是我国和亚洲地区的生态安全屏障,在全球气候变化研究中占有重要地位^[15]。高寒区地形复杂,拥有高山、草原、冰川等多种地貌,土壤类型主要为初育土(伴随干旱土),其母质丰富、土壤发育程度较低,容易遭受土壤侵蚀。该地区地壳运动活跃,在寒冷气候和强烈太阳辐射下,深层砾石逐渐风化上移,导致土壤粉砂增大,同时地形陡峭促使细颗粒向低海拔迁移,使高海拔土壤中粗颗粒增加^[16],侵蚀条件发生变化,进而影响地表径流的形成与流动。因此,研究高寒区坡面径流对砾石的响应,有助于揭示高原水文过程的特殊机制,为区域生态保护提供理论依据。鉴于此,选取西藏拉萨河流

域的裸土坡或土石混合坡面作为研究对象,通过模拟降雨试验,分析不同砾石覆盖度与径流水动力特性的关系,以期为青藏高原地区土壤侵蚀规律及水土流失防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于西藏自治区拉萨市蔡公堂乡香嘎村,海拔约3 700 m,高寒山地地貌,坡地平均坡度25°,且广泛分布有砾石。气候属高原温带半干旱气候,年平均气温7.5℃,年平均降水量450 mm,降水集中在6—9月,多为短时强降雨形式^[17]。土壤类型以高山草甸土为主,其土层较薄,表层土壤质地松散^[18]。

1.2 试验材料

供试土壤的砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为75.27%、14.76%、9.97%,pH为8.25,有机质质量分数为2.54 g/kg。采集的土壤经过风干后,通过2 mm筛网进行土石筛分,剔除其中混入的植物根系和叶片等杂质进行装槽。装槽土壤的初始质量含水率为3%,土壤体积质量为1.45~1.50 g/cm³。试验所用砾石从风干土壤中筛分得到,粒径为2~100 mm。

1.3 试验设计

为研究砾石参与下的土壤侵蚀发生规律,设计砾石是否混入土体(土体类型)、砾石粒径大小、砾石覆盖度3种处理(图1)。强德厚等^[19-20]研究表明,夏季一次典型降水雨强为20 mm/h,但在降雹后期可高达130 mm/h;方广玲等^[21]研究发现,拉萨河流域中坡度为15°~25°的区域侵蚀强度最高,坡度为25°~35°的区域侵蚀强度次之。因此,通过综合考虑人工模拟降雨的侵蚀效果,并根据对砾石坡面的实地调查结果^[18,22],将雨强设定为60 mm/h,降雨历时60 min,坡度选择为25°,表层砾石覆盖分为0、20%、40%和60%,覆盖砾石的粒径分别为0.2~2、2~6、6~10 cm,土体类型分为纯土(100%土壤)和土石混合(60%土壤与40%砾石,砾石粒径2~6 cm),共计20组试验处理,每个处理设置2个重复,取平均值。

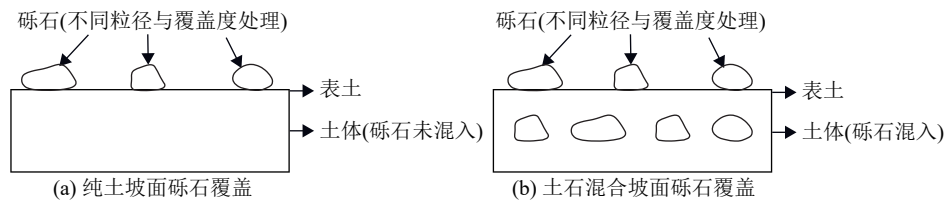


图1 试验处理示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental treatments

本试验在西北农林科技大学人工降雨大厅内进行,降雨装置的离地高度约为9 m,降雨均匀度可达90%。试验采用2 m(长)×0.5 m(宽)×0.5 m(高)的

土槽,且在末端安装三角形引流槽,便于径流和泥沙采集。在槽子底部倒入1层沙子(20 cm)并在其上方铺设纱布,防止水分积聚。根据槽子体积、土壤体积

含水率、土壤体积质量和土石混合比,计算出需装填的土壤与砾石质量。总装土厚度为30 cm,纯土和混入砾石粒径0.2~2、2~6 cm时,分3层装入且每层填土厚度为10 cm,混入砾石粒径6~10 cm时,分2层装入且每层填土厚度为15 cm。为避免土壤垂直分层,在每层间进行打毛处理。为减小边际效应的影响,尽量使土槽周围和集水口处的土壤达到较高的密度。每次试验完成后,需要重新装填土槽以进行下次试验。

为便于在土槽坡面布设不同的砾石覆盖度,先将一定质量的砾石均匀、无重叠地放置在1 m×1 m的塑料板上,使用固定焦距50 mm的全自动光学相机,从距离地表约3 m的垂直方向进行拍摄,照片经GIS和IDRISI软件分类处理后,计算出板上的砾石覆盖度,并建立砾石覆盖度与单位面积内不同粒径砾石质量间的对应关系^[23],0.2~2 cm砾石为 $Y=0.969X$, $R^2=0.97$, $n=53$;2~6 cm砾石为 $Y=2.930X$, $R^2=0.93$, $n=50$;6~10 cm砾石为 $Y=1.713X$, $R^2=0.99$, $n=42$ (Y 为砾石覆盖度,%; X 为质量,kg; n 为样本数)。根据关系式,计算不同粒径与盖度所需的砾石质量,在不同砾石处理试验中称取相应重量的砾石进行布设。

1.4 水动力参数测算

坡面径流侵蚀和输沙的力学机理,取决于坡面径流的水动力学特性^[24]。其中,采用流速(v)和径流深(h)描述坡面径流特征;雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)判别坡面流流态,反映坡面薄层水流水动力学特性;阻力系数(f)和曼宁糙率系数(n)反映坡面流的阻力特性;水流剪切力(τ)和水流功率(ω)描述土壤分离能力,模拟土壤侵蚀过程。

1) 坡面流速(v)。在坡面0.5~1、1~1.5、1.5~2 m处使用KMnO₄染色剂法测定流速,将测得的流速取平均值,经过校正后作为坡面的平均流速。本试验采用的校正系数为0.75^[25]。

2) 径流深(h)。坡面径流的平均水深,假定坡面径流是均匀流,其计算公式为:

$$h = \frac{Q}{Bvt} \quad (1)$$

式中: h 为径流深,m; v 为流速,m/s; Q 为取样时间内的总径流量,m³; t 为取样时间,s; B 为过水断面宽度,m。本试验用土槽宽度代替。

3) 雷诺数(Re)。表征水流流动情况的无量纲数,是惯性力和黏性力量级的比。 $Re < 500$ 时,流体流动稳定,为层流; Re 为500~2 000时,流体处于过渡状态,为过渡流; $Re > 2 000$ 时,流体流动较不稳

定,形成紊流。其计算公式为:

$$Re = \frac{vR}{\nu} \quad (2)$$

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (3)$$

式中: Re 为雷诺数; R 为水力半径,用径流深(h)近似代替,m; ν 为水流的运动黏性系数,m²/s,是水温 T 的函数^[26],在试验中用温度计测量。

4) 弗劳德数(Fr)。判别明渠水流流态的无量纲参数,是惯性力和重力量级的比。当 $Fr < 1$,水流为缓流; $Fr = 1$,水流为临界流; $Fr > 1$,水流为急流。其计算公式为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gR}} \quad (4)$$

式中: Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度,m/s²。

5) Weisbach阻力系数(f)。反映坡面水流阻力特征,与粗糙度、流体性质和流动状态有关。其计算公式为:

$$f = \frac{8ghJ}{v^2} \quad (5)$$

式中: f 为Weisbach阻力系数; J 为水力坡度,是坡度的正弦值。

6) 曼宁糙率系数(n)。反映对水流阻力影响的无量纲数,糙率(n)值越大,对应的阻力越大,在其他条件相同的情况下,通过的流量越小。其计算公式为:

$$n = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{v} \quad (6)$$

7) 水流剪切力(τ)。水流在流动过程中对物体产生的剪切力,用于分离和分散土壤颗粒。当水流剪切力大于临界剪切力时坡面开始发生侵蚀,临界剪切力大说明土壤抗蚀性强。其计算公式为:

$$\tau = \rho ghJ \quad (7)$$

式中: τ 为水流剪切力,Pa; ρ 为水的密度,kg/m³。

8) 水流功率(ω)。单位时间内水能所做的功,反映水流在顺坡流动时所具有的势能。其计算公式为:

$$\omega = \tau v \quad (8)$$

式中: ω 为水流功率,N/(m·s)。

1.5 数据分析

采用Factoextra R包对不同水动力学参数进行主成分分析(PCA),并对分析结果进行可视化;采用编译的地理探测器分析不同处理对不同水动力学参数的影响;采用Excel 2021软件处理和分析水动力学参数数据,并用Origin 2024软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 坡面径流水力特性对砾石覆盖的响应

用流速和径流深来描述坡面径流水力特性,其与砾石盖度关系(图 2)表明,对于纯土坡面,在表面无砾石覆盖条件下,流速和径流深分别为 6.31 cm/s、0.42 mm。在有砾石覆盖条件下,坡面平均流速减幅为 15.47%~73.62%;在砾石覆盖度为 40%、60%、砾石粒径为 2~6、6~10 cm 时,径流深减小,减幅为 11.14%~26.91%,其他条件下增加,增幅为 16.26%~143.20%。当砾石覆盖度增加时,流速先减小后增大,径流深在不同粒径条件下表现不同:砾石粒径 0.2~2 cm 时增加,粒径 2~6、6~10 cm 时减小。

对于土石混合坡面,在表面无砾石覆盖条件下,流速为 5.23 cm/s,小于纯土坡面;径流深为 0.47 mm,大

于纯土坡面。在有砾石覆盖条件下,砾石粒径为 2~6 cm、砾石覆盖度为 20%、40% 及砾石粒径为 6~10 cm、砾石覆盖度为 40%、60% 时,平均流速减小,减幅为 6.54%~65.45%,其他条件下增加,增幅为 7.57%~34.65%;砾石粒径为 0.2~2 cm 的所有覆盖度、砾石粒径为 2~6 cm 的 20% 覆盖度条件下,径流深增加,增幅为 13.97%~113.16%,其他条件下减小,减幅为 3.78%~31.21%。流速随砾石覆盖度增加而减小,径流深的变化趋势与纯土坡面一致:砾石粒径为 0.2~2 cm 时,随砾石覆盖度增加而增加,粒径 2~6、6~10 cm 则减小。在砾石粒径 0.2~2、2~6 cm、砾石覆盖度 60% 和砾石粒径 6~10 cm、砾石覆盖度 20% 条件下,纯土坡面的平均流速大于土石混合坡面,在其他条件下相反。整体上土石混合坡面的径流深大于纯土坡面。

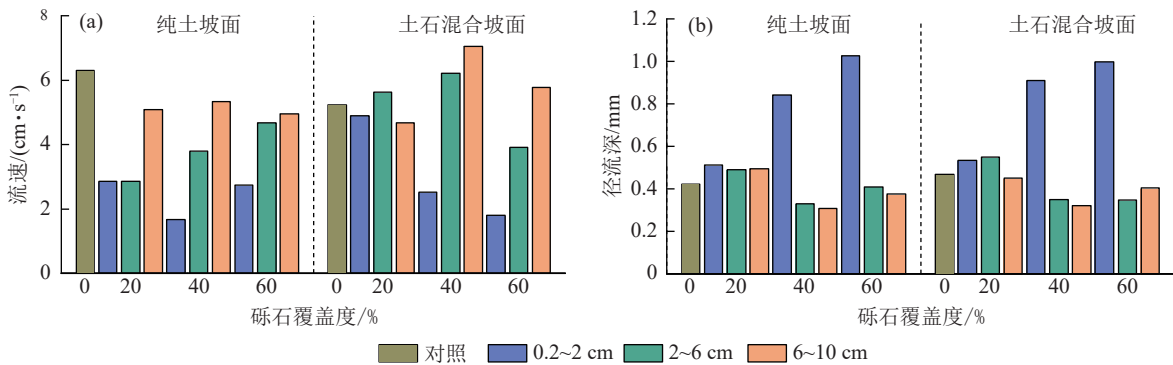


图 2 坡面径流水力特性随砾石覆盖的变化

Fig. 2 Variation of slope runoff hydraulic characteristics with gravel coverage

2.2 坡面径流流态对砾石覆盖的响应

在不同条件下,坡面流流态随砾石盖度的变化呈不同趋势(图 3)。纯土坡面表面无砾石覆盖时,雷诺数为 24.04,弗劳德数为 0.99,坡面流属于层流和缓流。表

面有砾石覆盖时,雷诺数为 12.70~24.25,坡面流仍为层流;弗劳德数为 0.18~1.01,坡面流在粒径 6~10 cm 且砾石覆盖度 40% 时为急流,其他条件为缓流。雷诺数和弗劳德数均随砾石覆盖度增加呈先减后增趋势。

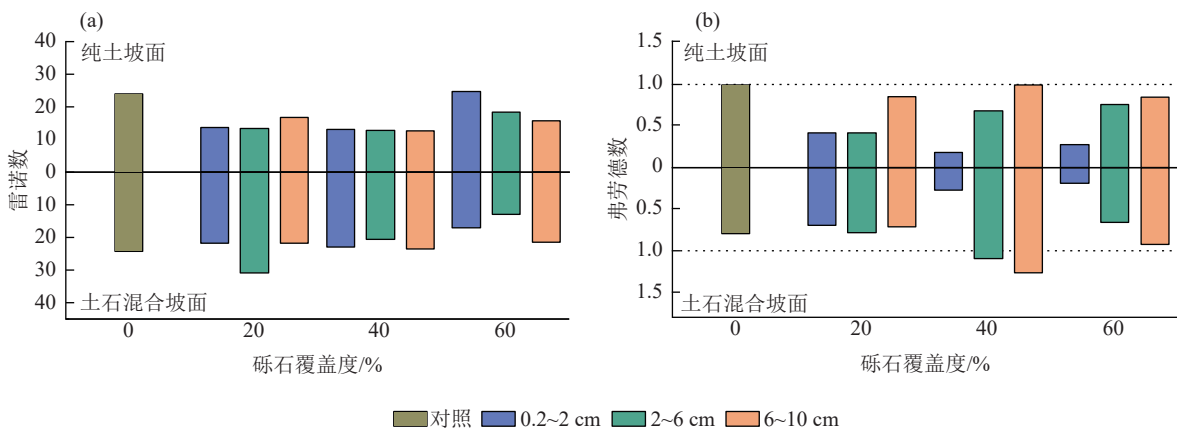


图 3 坡面径流流态随砾石覆盖的变化

Fig. 3 Variation of slope runoff flow regime with gravel coverage

土石混合坡面表面无砾石覆盖时,雷诺数为 24.28,略大于纯土坡面,仍属于层流;弗劳德数为

0.79,小于纯土坡面,仍属于缓流。表面有砾石覆盖时,雷诺数为 12.90~30.95,坡面流仍为层流,且随砾

石覆盖度增加而减小;弗劳德数为 0.27~1.27,坡面流在粒径 2~6、6~10 cm 且砾石覆盖度 40% 时为急流,其他条件下为缓流,且在砾石粒径为 0.2~2 cm 时,随着砾石覆盖度增加呈逐渐减小趋势,在砾石粒径为 2~6、6~10 cm 时,随着砾石覆盖度增加先增大后减小。当砾石粒径 0.2~2、2~6 cm 且覆盖度为 60% 时,土石混合坡面的雷诺数和弗劳德数小于纯土坡面,流态为层流和缓流,其他条件则相反;在砾石粒径 2~6、6~10 cm 且覆盖度为 40% 时,流态为层流和急流。

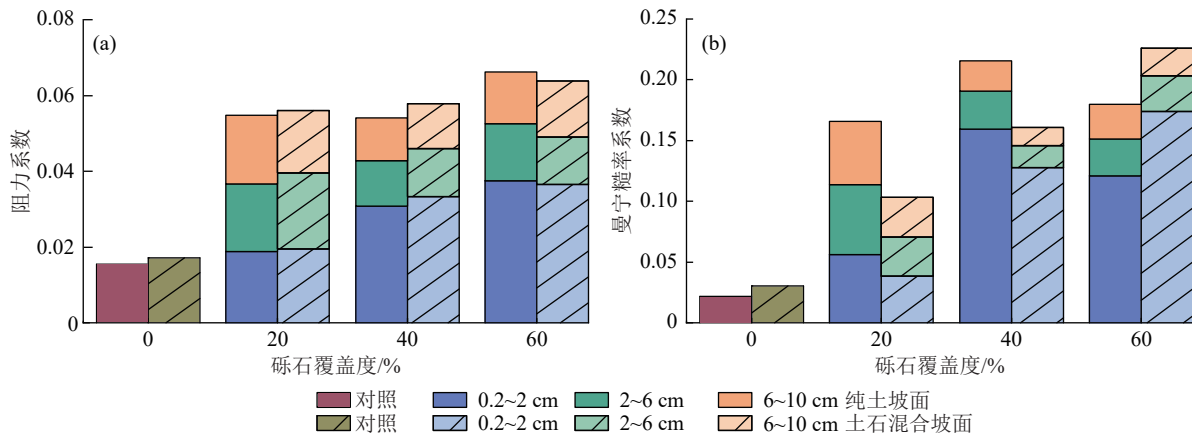


图 4 坡面径流阻力特性随砾石覆盖的变化

Fig. 4 Variation of slope runoff resistance characteristics with gravel coverage

对于土石混合坡面,在表面无砾石覆盖条件下,阻力系数和曼宁糙率系数分别为 0.017 和 0.030,均大于纯土坡面。在表面有砾石覆盖条件下,阻力系数为 0.012~0.036,其变化规律与纯土坡面相同;曼宁糙率系数为 0.015~0.174,其变化趋势与纯土坡面不同。当砾石覆盖度增加,粒径 0.2~2 cm 时增加,粒径 2~6、6~10 cm 时减小。当砾石粒径 0.2~2、2~6 cm 且砾石覆盖度 60%、砾石粒径 6~10 cm 且砾石覆盖度 20% 时,土石混合坡面阻力系数小于纯土坡面,而其他条件则相反;在砾石粒径 0.2~2 cm 且砾石覆盖度 60% 时,土石混合坡面曼宁糙率系数大于纯土坡面,而其他条件则相反。

2.3 坡面径流阻力特性对砾石覆盖的响应

阻力系数和曼宁糙率系数随砾石盖度的变化(图 4)表明,对于纯土坡面,在表面无砾石覆盖条件下,阻力系数和曼宁糙率系数分别为 0.015 和 0.022。在表面有砾石覆盖条件下,阻力系数为 0.011~0.038,且随粒径不同而有所变化。砾石粒径为 0.2~2 cm 时,随砾石覆盖度增加呈上升趋势,粒径为 2~6、6~10 cm 时,随砾石覆盖度增加呈下降趋势;曼宁糙率系数为 0.025~0.159,随砾石覆盖度增加呈先增后减趋势。

2.4 坡面径流动力特性对砾石盖度的响应

坡面径流动力特性可用水流剪切力和水流功率来表示,其随砾石盖度变化趋势(图 5)表明,纯土坡面在无砾石覆盖条件下,水流剪切力和水流功率分别为 1.93 Pa 和 0.12 N/(m·s)。在坡面有砾石覆盖条件下,水流剪切力为 1.41~4.69 Pa,砾石粒径不同,水流剪切力随砾石覆盖度变化也不同。在砾石粒径为 0.2~2 cm 时,随着砾石覆盖度增加而增大,在砾石粒径为 2~6、6~10 cm 时,随着砾石覆盖度增加而减小;水流功率为 0.06~0.13 N/(m·s),在不同粒径均随砾石覆盖度增加呈先减后增趋势。

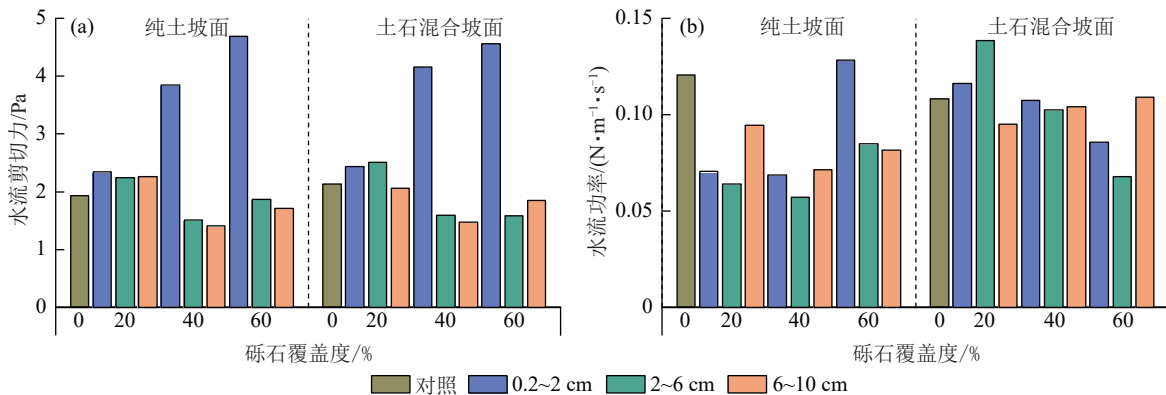


图 5 坡面径流动力特性随砾石覆盖度的变化

Fig. 5 Variation of slope runoff dynamic characteristics with gravel coverage

土石混合坡面在无砾石覆盖条件下,水流剪切力和水流功率分别为 2.14 Pa 和 0.11 N/(m·s),水流剪切力大于纯土坡面,水流功率相反。在有砾石覆盖条件下,水流剪切力为 1.47~4.56 Pa,随砾石盖度的变化与纯土坡面一致,水流功率为 0.07~0.14 N/(m·s),其变化趋势与纯土坡面不同。当砾石粒径为 0.2~2、2~6 cm 时,水流功率随覆盖度增加先增后减,砾石粒径为 6~10 cm 时,随覆盖度增加先减后增。在砾石粒径 0.2~2、2~6 cm 且覆盖度为 60% 时,水流剪切力、水流功率均小于纯土坡面,砾石粒径 6~10 cm 且覆盖度 20% 时,水流剪切力小于纯土坡面,而其他条件下则相反。

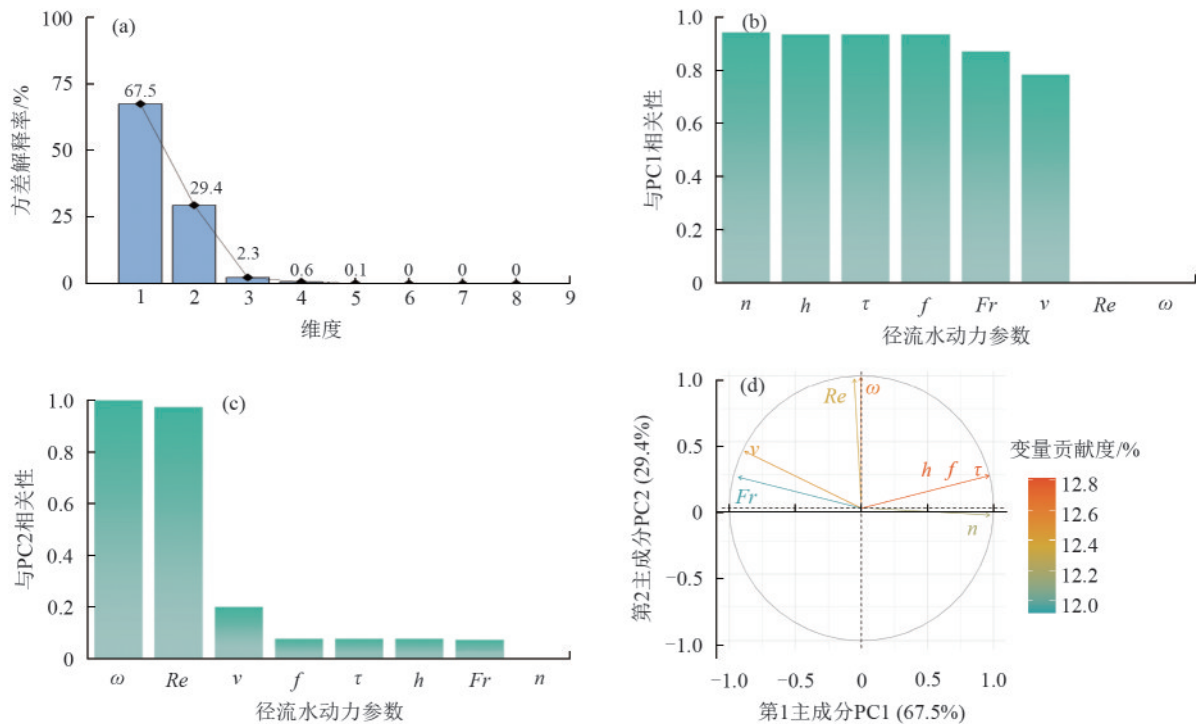


图 6 对水动力学参数的主成分分析

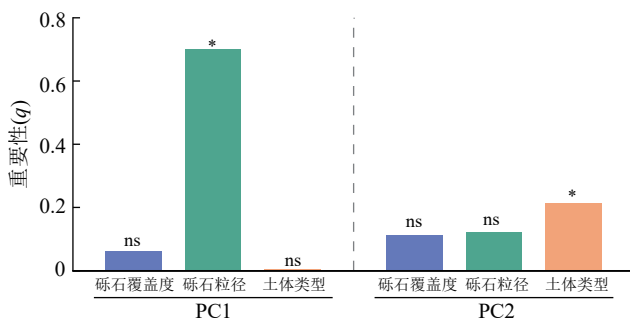
Fig. 6 Principal component analysis of hydrodynamic parameters

采用地理探测器方法,将 PC1、PC2 和砾石粒径、砾石覆盖度、土体类型进行分析(图 7)表明,PC1 中砾石粒径影响最为重要,其显著性检验 $p < 0.1$,具有统计学意义,而砾石覆盖度和土体类型的重要性(q)较小且未通过显著性检验($p > 0.1$),说明砾石粒径对流速、径流深、弗劳德数、阻力系数、曼宁糙率系数和水流剪切力的影响较大;PC2 中土体类型重要性最大且具有显著性($p < 0.1$),砾石覆盖度和砾石粒径重要性较小且未达到显著水平($p > 0.1$),说明土体类型对雷诺数、水流功率的影响较大。进一步研究因子间交互作用(表 1)发现,PC1 中砾石覆盖度与砾石粒径的交互作用大于二者单独作用,表现为非线性增强,说明砾石覆盖度与砾石粒径的交互作用进一步增强对流速、径流深、弗劳德数、阻

2.5 不同砾石处理对水动力学参数的影响

采用主成分分析方法对 8 个水动力学参数进行降维处理(图 6)。图 6a 根据特征值 > 1 的标准提取主成分发现,前 2 个主成分(PC1 和 PC2)累积方差解释率为 96.9%,具有典型性和代表性。图 6b、图 6c 分析各主成分和不同水动力参数的相关性发现,曼宁糙率系数、径流深、水流剪切力、阻力系数与 PC1 较强,水流功率、雷诺数与 PC2 较强。因此,针对 PC1 和 PC2 做双标图(图 6d)可知,曼宁糙率系数、径流深、水流剪切力、阻力系数、弗劳德数和流速对 PC1 的贡献较大,主要以阻力特性为主;水流功率和雷诺数对 PC2 的贡献较大,主要以动力特性为主。

力系数、曼宁糙率系数和水流剪切力的影响,而 PC2 中结果不显著。因此,将流速、径流深、弗劳德数、阻力系数、曼宁糙率系数和水流剪切力作为砾石粒径和砾石覆盖度配置的优先选择参数。综合上述水动力学参数在不同土体类型和砾石粒径条件下随砾石覆盖度的变化(表 2),其中阻力系数和曼宁糙率系数考虑最大值,其余参数考虑最小值,分析可得纯土坡面 0.2~2 cm 粒径时 40% 覆盖度和 2~6、6~10 cm 粒径时 20% 覆盖度的减流效果较好,且 0.2~2 cm 粒径、40% 覆盖度效果最好;土石混合坡面 0.2~2、2~6 cm 粒径时 60% 覆盖度、6~10 cm 粒径时 20% 覆盖度的减流效果较好,且 0.2~2 cm 粒径、60% 覆盖度的效果最好。



注: *表示通过显著性检验,即 $p < 0.05$; ns 表示未通过显著性检验,即 $p > 0.05$ 。

图 7 砾石覆盖度、砾石粒径和土体类型对不同主成分的重要性

Fig. 7 Importance of gravel coverage, gravel size, and soil type for different principal components

表 1 不同主成分中砾石覆盖度、砾石粒径和土体类型交互作用对探测分析的重要性

Table 1 Importance results of interaction detection analyses of gravel coverage, gravel size, and soil type in different principal components

Y	X1/X2	重要性(q)
PC1	砾石覆盖度/砾石粒径	0.974 1*
	砾石覆盖度/土体类型	0.129 3
	砾石粒径/土体类型	0.731 0
PC2	砾石覆盖度/砾石粒径	0.281 8
	砾石覆盖度/土体类型	0.661 6
	砾石粒径/土体类型	0.436 3

注: X1/X2 指对因子 1 和因子 2 进行交互作用分析; *表示通过显著性检验,即 $p < 0.05$ 。

表 2 坡面径流水动力参数对砾石覆盖的总变化

Table 2 Overall variation of slope runoff hydrodynamic parameters with gravel coverage

水动力学参数	土体类型	粒径 0.2~2 cm				粒径 2~6 cm				粒径 6~10 cm			
		0	20%	40%	60%	0	20%	40%	60%	0	20%	40%	60%
流速 (v)	纯土坡面	6.306	2.852	1.663*	2.733	6.306	2.864*	3.795	4.679	6.306	5.086	5.331	4.959*
	土石混合坡面	5.234	4.891	2.526	1.808*	5.234	5.630	6.219	3.906*	5.234	4.675*	7.047	5.768
径流深 (h)	纯土坡面	0.422*	0.513	0.842	1.026	0.422	0.491	0.330*	0.409	0.422	0.495	0.308*	0.375
	土石混合坡面	0.468*	0.533	0.910	0.997	0.468	0.549	0.349	0.347*	0.468	0.450	0.322*	0.404
雷诺数 (Re)	纯土坡面	24.037	13.738	13.101*	24.643	24.037	13.324	12.735*	18.347	24.037	16.796	12.698*	15.740
	土石混合坡面	24.277	21.726	22.941	17.059*	24.277	30.951	20.536	12.895*	24.277	21.824	23.582	21.420*
弗劳德数 (Fr)	纯土坡面	0.992	0.415	0.183*	0.276	0.992	0.416*	0.680	0.757	0.992	0.850	0.994	0.850*
	土石混合坡面	0.794	0.691	0.270	0.185*	0.794	0.781	1.096	0.658*	0.794	0.713*	1.267	0.923
阻力系数 (f)	纯土坡面	0.015	0.019	0.031	0.038*	0.015	0.018	0.012	0.015*	0.015	0.018*	0.011	0.014
	土石混合坡面	0.017	0.019	0.033	0.036*	0.017	0.020*	0.013	0.013	0.017*	0.016	0.012	0.015
曼宁糙率系数 (n)	纯土坡面	0.022	0.056*	0.159	0.121	0.022	0.058*	0.031	0.031	0.022	0.052*	0.025	0.028
	土石混合坡面	0.030	0.038	0.128	0.174*	0.030	0.032*	0.018	0.030	0.030	0.032*	0.015	0.023
水流剪切力 (τ)	纯土坡面	1.928*	2.344	3.848	4.690	1.928	2.242	1.508*	1.870	1.928	2.260	1.409*	1.714
	土石混合坡面	2.138*	2.437	4.160	4.557	2.138	2.509	1.593	1.584*	2.138	2.057	1.471*	1.845
水流功率 (ω)	纯土坡面	0.121	0.071	0.069*	0.128	0.121	0.064	0.057*	0.085	0.121	0.094	0.071*	0.081
	土石混合坡面	0.108	0.116	0.107	0.086*	0.108	0.138	0.103	0.068*	0.108	0.095*	0.104	0.109

注: *表示各水动力学参数在不同粒径条件下极值所在的覆盖度,除 f, n 为最大值外,其余均为最小值。

3 讨论

3.1 径流水力特性对砾石的响应

本研究发现,在不同下垫面条件下,砾石覆盖度对流速的影响不同。在纯土坡面,流速随砾石覆盖度增加先减后增,与 LIU 等^[11]在砾石覆盖度为 0~56.52% 条件下对纯土坡面;陈卓鑫等^[27]在雨强为 1.0~2.5 mm/min、砾石质量分数为 0~30% 条件下对红壤工程堆积体的研究结果不完全一致。原因可能是随着砾石覆盖度增加,坡面表面的粗糙度增加,水流与坡面间的摩擦阻力增加,水流在坡面上分散成多个

小的汇流路径,使水流流速减小;而在本试验中发现,随着砾石覆盖度不断增加,逐渐形成一些细沟,水流在细沟内集中流动,从而使流速增加。在土石混合坡面,流速则随砾石覆盖度增加而减小,与纯土坡面后期的规律有所不同,主要是因为土体中混入砾石的存在进一步增加下垫面的表面粗糙度,水流与表面摩擦增强,同时改变土壤孔隙结构,使得入渗增加,流速降低。

而径流深随砾石覆盖度增加的变化趋势则在不同粒径条件下有所差异。在覆盖砾石粒径 0.2~2 cm

时,径流深随砾石覆盖度增加而增加。BUNTE 等^[28]选取覆盖度为 0~90%、平均粒径为 1.5 cm 卵石进行水槽试验也得出类似结论;已有研究^[8,12,29]表明,保持冲刷流量不变的前提下,砾石覆盖占据部分坡面水流空间,导致径流有效流动宽度减小,而径流水深与其成反比,因此,随着砾石覆盖度增加,有效径流宽度减小,使得径流水深趋向增大。而在覆盖砾石粒径 2~6、6~10 cm 时,径流深随砾石覆盖度增加呈减小趋势,分析原因是较大的粒径形成较大的颗粒间隙,导致入渗量增加,因此,随砾石覆盖度增加径流深减小^[23]。

3.2 径流流态对砾石的响应

本研究中雷诺数为 12.74~30.95,坡面径流为层流,与张宽地等^[30]和肖培青等^[31]在模拟降雨条件下对沙黄土坡面和坡沟系统的研究结果基本一致。在纯土坡面,雷诺数和弗劳德数随砾石覆盖度增加呈先减后增趋势;SUN 等^[10]通过人工模拟降雨试验研究指出,雷诺数和弗劳德数总体上随砾石覆盖度增加而减小,与本研究结果部分一致,因为其砾石覆盖度最高仅为 40%,而本研究最高为 60%。砾石覆盖增加水流阻力,初期水流速度减小^[12],重力势能占主导,惯性减弱,从而降低雷诺数和弗劳德数;当砾石覆盖度增加后,水流与坡面表面接触减少,减小流体黏性影响,流速提高,增加水流惯性,导致雷诺数和弗劳德数增加^[32]。

而在土石混合坡面,雷诺数随砾石覆盖度增加呈减小趋势^[27]。与纯土坡面不同,砾石不仅覆盖表面,还混入土体中,破坏土壤原有连通性,水流在砾石与土体的复合结构中受阻更显著,不利于水流集中,随覆盖度增加,流速持续降低,雷诺数也随之减小。弗劳德数变化趋势较为复杂,砾石粒径 0.2~2 cm 时,随覆盖度增加而减小,2~6、6~10 cm 时,随覆盖度增加呈先增后减趋势,可能是因为小粒径砾石在土体内形成致密嵌合结构,显著增加水流过水阻力,覆盖度增加导致表面粗糙度增加,水流在坡面上的流动受到更多的阻力,流速减小,弗劳德数也减小;而中大粒径砾石在低覆盖度时分布较为稀疏,有利于形成导流通道,水流快速汇集,惯性增强,弗劳德数上升,在高覆盖度时砾石密集覆盖,水流路径增加趋于分散流动,使得弗劳德数下降^[33]。

3.3 径流阻力与动力特性对砾石的响应

LIU 等^[32]以 0~30% 砾石覆盖度为条件,量化砾石覆盖坡面流的水力学特性得出,阻力系数与砾石覆盖度呈正相关,在 0.2~2 cm 砾石粒径条件下,本研究阻力系数得出相同结论;在 2~6、6~10 cm 砾石

粒径条件下,则随砾石覆盖度增加而减小,LI 等^[34]研究砾石对陡坡滑坡堆积体集中水流特性的影响中也得到类似结论。小粒径砾石在 2 种下垫面中均增强坡面微尺度扰动,表现为阻力系数随覆盖度增加而升高;而中大粒径则易构建相对稳定的水流通道,减弱其与坡面间的摩擦作用,使剪切阻力随覆盖度增加而下降^[8]。曼宁糙率系数在 2 种坡面的变化趋势则不同,在纯土坡面低覆盖度时,砾石的存在显著提高坡面粗糙度^[35],随着覆盖度不断增加,表层砾石覆盖趋于平整,反而使得表面粗糙度下降;在土石混合坡面,下垫面较为粗糙,小粒径砾石增加进一步增强表面阻力,曼宁糙率系数持续升高,而中大粒径砾石由于易形成连续的水流路径,有效引导水流汇聚,且形成平整砾石层,使得表面粗糙度趋于降低。

水流剪切力在 2 种坡面对砾石覆盖度的响应主要与粒径有关。小粒径砾石增强坡面微扰动,使剪切力持续增加,而中大粒径砾石促使水流集中流动,使剪切力下降^[36]。水流功率在纯土坡面中整体呈先减后增趋势,反映出坡面由分散扰动向集中汇流的结构演化过程。在土石混合坡面,砾石粒径 0.2~2、2~6 cm 时呈先增后减趋势,6~10 cm 时呈先减后增趋势,主要原因是较小粒径的砾石覆盖在坡面上时,初始坡面粗糙度增加,摩擦阻力增加,水流功率增加,随冲刷凸出的砾石改变土壤孔隙度,形成较为稳定的砾石层,砾石覆盖度增加,流速减小,水流功率随之减小;而中大粒径砾石在初始覆盖时形成的空隙较大,水流路径被分散且容易通过,流速减小,水流功率减小,砾石覆盖度增加后空隙减小,表土下的砾石进一步减小流动空隙,水流在通过空隙时需要消耗更多的能量来克服阻力,因此水流功率增加。

4 结 论

1) 在纯土坡面,砾石覆盖通过改变坡面表层结构和水流路径显著影响水动力学参数,其中流速、雷诺数、弗劳德数和水流功率随砾石覆盖度增加呈先减后增趋势,曼宁糙率系数随砾石覆盖度增加呈先增后减趋势,适度砾石覆盖(20%、40%)可减缓径流过程。

2) 在土石混合坡面,表层砾石覆盖和土体内部砾石共同改变坡面粗糙度和水流通道,使得流速和雷诺数随砾石覆盖度增加而减小;弗劳德数在 0.2~2 cm 粒径时减小,2~6、6~10 cm 时先增后减;曼宁糙率系数在 0.2~2 cm 粒径时增加,在 2~6、6~10 cm 时减小;水流功率在 0.2~2、2~6 cm 粒径时先增后减,在 6~10 cm 时先减后增。

3) 径流深、阻力系数和水流剪切力与砾石覆盖度的关系并不随坡面类型而异,而与粒径大小有关,在0.2~2 cm时随砾石覆盖度增加而增大,2~6、6~10 cm时减小。

4) 纯土中砾石覆盖度为40%且砾石粒径为0.2~2 cm、含砾石土体中砾石覆盖度为60%且砾石粒径为0.2~2 cm的砾石配置模式在研究区域内削减径流的效果较好。

参考文献:

- [1] 李小芳,张超,武建辉,等.全国水土保持率变化分析[J].中国水土保持,2023(9):6-9.
LI X F, ZHANG C, WU J H, et al. Analysis on the changes of soil and water conservation rate in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(9):6-9.
- [2] 丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):47-56.
DING G H, REN Z Z, HU W, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):47-56.
- [3] 郭铃莉,王云琦,王晨洋,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.
WU L L, WANG Y Q, WANG C F, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of north China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(24):157-164.
- [4] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.
LIN Q M, DING W F, ZHANG C W, et al. Hydrodynamic characteristics of runoff in red slope erosion process under simulated rainfall experiments[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(2):16-21.
- [5] 王明慧,黄来明,陈翠柏.西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(12):3287-3293.
WANG M H, HUANG L M, CHEN C B. Difference in soil water holding capacity and the influencing factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(12):3287-3293.
- [6] POESEN J, LAVEE H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena, 1994,23(1/2):1-28.
- [7] 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.
WANG X Y, LI Z X, XU Q X, et al. Review of effects of rock fragment cover on soil water erosion processes[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011,9(1):115-120.
- [8] 占顺.砾石覆盖对坡面流水动力学特性试验研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
ZHAN S. Effects of rock fragment cover on hydraulics by overland flow[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [9] BUNTE K, POESEN J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J]. Water Resources Research, 1993,29(5):1415-1424.
- [10] SUN J, YU X, FAN D, et al. Hydrological and erosive response of soil surfaces to rainfall intensity as affected by gravel fragment coverage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,73(3):353-362.
- [11] LIU J J, ZHANG K D, PENG Y, et al. Effect of gravel coverage on the hydrodynamic characteristics of overland flow on the Loess Plateau in China[J]. Journal of Hydrology, 2023,627:e130322.
- [12] 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.
MA C L, DAI C T, LIU Y J, et al. Effects of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):150-155.
- [13] 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.
CHEN X Y, LI L, SHE D L. Hydrodynamic characteristics of rainfall runoff on saline-alkali slope covered by gravel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(1):116-120.
- [14] FANG H B, ZHAO L, WU X D, et al. Soil taxonomy and distribution characteristics of the permafrost region in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2015,12(6):1448-1459.
- [15] 王子滢,李周园,董世魁,等.近40年青藏高原生态格局演变及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(22):8941-8952.
WANG Z Y, LI Z Y, DONG S K, et al. Evolution of ecological patterns and its driving factors on Qinghai-Tibet Plateau over the past 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(22):8941-8952.
- [16] 梁博,聂晓刚,万丹,等.喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性K值影响[J].土壤学报,2018,55(6):1377-1388.
LIANG B, NIE X G, WAN D, et al. Impacts of forest typical of the southern piedmont of the Himalaya Mountains on soil physicochemical properties and erodibility K[J].

- Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6):1377-1388.
- [17] 张子琦, 焦菊英, 陈同德, 等. 拉萨河流域洪积扇不同植被类型土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6801-6815.
ZHANG Z Q, JIAO J Y, CHEN T D, et al. Soil stoichiometry characteristics of different vegetation types in alluvial fans of the Lhasa River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6801-6815.
- [18] 章志鑫, 陈同德, 王颢霖, 等. 拉萨河流域不同植被类型坡面砾石形态与分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 256-263.
ZHANG Z X, CHEN T D, WANG H L, et al. Morphology and distribution characteristics of gravel on slopes of different vegetation types in Lhasa River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 256-263.
- [19] 强德厚, 刘俊卿, 尼玛楚多, 等. 拉萨夏季一次典型降水过程雨滴谱特征及 Z-I 关系分析[J]. 气象科技, 2022, 50(4): 554-562.
QIANG D H, LIU J Q, NIMA C D, et al. Analysis on characteristics of raindrop spectrum distribution and Z-I relationship of a typical summer precipitation process in Lhasa[J]. Meteorological Science and Technology, 2022, 50(4): 554-562.
- [20] 强德厚, 刘俊卿, 丁建芳, 等. 青藏高原夏季一次冰雹过程的微物理特征[J]. 气象, 2024, 50(6): 701-710.
QIANG D H, LIU J Q, DING J F, et al. Microphysical characteristics of a summer hailstorm in Tibetan Plateau[J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(6): 701-710.
- [21] 方广玲, 香宝, 赵卫, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
FANG G L, XIANG B, ZHAO W, et al. Study on soil erosion in LaSa River basin based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 6-12.
- [22] 李建军, 陈玉兰, 焦菊英, 等. 基于多元非线性空间建模的拉萨河流域沟蚀发生风险探测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 73-82.
LI J J, CHEN Y L, JIAO J Y, et al. Detecting gully occurrence risks using multivariate nonlinear spatial modeling in the Lhasa River basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(17): 73-82.
- [23] 符素华, 路炳军, 叶芝茵. 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.
FU S H, LU B J, YE Z H. Effects of rock fragments on runoff and soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 15-18.
- [24] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574.
LUO R T, ZHANG G H, CAO Y. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow [J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567-574.
- [25] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
XIAO P Q, YAO W Y, SHEN Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237.
- [26] 王静雯. 坡面流水动力学特性及增阻机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
WANG J W. Hydrodynamic characteristics of overland flow and its increasing resistance mechanisms[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [27] 陈卓鑫, 王文龙, 康宏亮, 等. 砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6545-6556.
CHEN Z X, WANG W L, KANG H L, et al. Effects of gravel on runoff and sediment yield of red soil engineering accumulation slopes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6545-6556.
- [28] BUNTE K, POESEN J. Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1994, 19(2): 115-135.
- [29] 刘京晶, 马岚, 黎俊佑, 等. 不同覆盖条件下坡面流体力学特征试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 115-123.
LIU J J, MA L, LI J Y, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of overland flow under different resistance conditions [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 115-123.
- [30] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 229-235.
ZHANG K D, WANG G Q, LÜ H X, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 229-235.
- [31] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 236-240.
XIAO P Q, ZHENG F L, YAO W Y. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 236-240.
- [32] LIU X N, FAN D X, YU X X, et al. Effects of simulated gravel on hydraulic characteristics of overland flow under varying flow discharges, slope gradients and gravel coverage degrees [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): e19781.

(下转第77页)