

连续降雨条件下工程堆积体产流 产沙对砾石含量的响应

王子吟¹, 魏育超², 李镇³, 骆汉^{1,2}, 谢永生^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 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.中国电建集团 昆明勘测设计院有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: [目的] 探究连续降雨条件下不同砾石含量对陕北沙壤土上方有来水工程堆积体坡面产流产沙的影响, 为生产建设项目水土流失治理提供数据支撑和理论参考。[方法] 通过室内模拟降雨试验, 研究不同砾石含量(0%, 10%, 20%, 30%, 40%)工程堆积体坡面土壤水动力学特性及产流产沙特征。[结果] ①降雨强度相同, 随砾石含量增加, 工程堆积体坡面初始产流时间表现为递减趋势, 减幅为 27.22%~64.62%, 35.09%~71.70%, 47.37%~78.77%, 51.75%~82.31%。次降雨径流率表现为“迅速增加—稳定波动”的变化趋势, 平均径流率随砾石含量、降雨时间的增加显著增大; 但产流峰值随砾石含量增加而降低, 且出现时间逐渐提前。②试验各场次雷诺数的变化范围介于 74.13~165.05, 均小于 500, 水流属于层流; 弗劳德数的变化范围集中在 2.14~3.71, 表现为急流。水流剪切力、水流功率和单位水流功率随降雨场次的增加而显著增加。③0%~40%砾石含量工程堆积体坡面侵蚀速率介于 0.45~6.73, 0.13~4.09, 0.25~1.26, 0.14~0.96, 0.13~0.88 g/(m²·min), 各砾石含量堆积体减沙幅度分别为 36.06%, 49.05%, 55.23% 和 56.62%, 其中高砾石含量(40%)的沙壤土工程堆积体坡面土壤侵蚀强度较小。[结论] 砾石覆盖在沙壤土工程堆积体坡面的水土流失过程中可显著降低土壤侵蚀速率, 从而实现拦蓄水土, 保持较高的减沙效益。

关键词: 工程堆积体; 砾石含量; 连续降雨; 产流产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0091-10

中图分类号: S157.1, P333.5

文献参数: 王子吟, 魏育超, 李镇, 等. 连续降雨条件下工程堆积体产流产沙对砾石含量的响应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 91-100. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.010; Wang Ziyin, Wei Yuchao, Li Zhen, et al. Response of runoff and sediment yield to gravel content in engineered deposit slopes under continuous rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 91-100.

Response of Runoff and Sediment Yield to Gravel Content in Engineered Deposit Slopes Under Continuous Rainfall Conditions

Wang Ziyin¹, Wei Yuchao², Li Zhen³, Luo Han^{1,2}, Xie Yongsheng^{1,2}

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F
University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100,
China; 3.Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: [Objective] The impact of different gravel contents on soil erosion of engineered deposit slopes were explored in the sandy soil region of Northern Shaanxi Province under continuous rainfall conditions in order to provide data support and theoretical references for soil erosion control in production and construction projects. [Methods] Indoor rainfall experiments were conducted to study the hydrodynamic, runoff, and sediment characteristics of engineered deposit slopes with varying gravel contents (0%, 10%, 20%, 30%, 40%). [Results] ① Under the same rainfall intensity, the initial runoff time on the engineered deposit slopes showed a decreasing trend with the increase of gravel content, with ranges of 27.22%—64.62%, 35.09%—71.70%,

收稿日期: 2023-10-13

修回日期: 2023-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“生产建设项目工程堆积体坡面微地貌演化及其与产流产沙的耦合关系研究”(41601300); 承德国家可持续发展议程创新示范区建设科技专项项目“承德市接坝区生态重建及水源涵养能力提升关键技术研究”(202104F003); 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-15)

第一作者: 王子吟(1999—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: wangziyin@nwafu.edu.cn。

通信作者: 骆汉(1985—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持工程方面的研究。Email: hanl@ms.iswc.ac.cn。

47.37%—78.77%, and 51.75%—82.31%, respectively. The runoff coefficient during subsequent rainfall events exhibited a “rapid increase-stable fluctuation” trend, and the average runoff coefficient increased significantly with increasing gravel content and rainfall duration. However, the peak value of runoff decreased with increasing gravel content, and the occurrence time of the runoff peak was gradually advanced. ② The Reynolds index for all experiments ranged from 74.13 to 165.05, all of which were below 500, indicating that the flow type was laminar flow, while the Froude number ranged from 2.14 to 3.71 indicating rapid flow. The shear force, flow power, and unit flow power increased with increasing rainfall time. ③ The ranges of erosion modulus on the engineered deposit slopes were 0.45—6.73, 0.13—4.09, 0.25—1.26, 0.14—0.96, and 0.13—0.88 g/(m² · min), respectively. The sediment reductions for each gravel content were 36.06%, 49.05%, 55.23%, and 56.62%, respectively. The highest gravel content (40%) resulted in the lowest soil erosion intensity of the engineered deposit slopes in the sandy soil region. [Conclusion] Gravel coverage on engineered deposit slopes of sandy loam soil significantly reduces soil erosion rate, thereby achieving soil retention and maintaining high sediment reduction benefits.

Keywords: engineered deposit slopes; gravel content; continuous rainfall; runoff and sediment yield

上方有来水工程堆积体是指生产建设项目经人为开挖、压埋、堆填等不同扰动方式产生的弃土弃石弃渣,在坡沟堆积或在平地堆积但顶部有较大平台,受降水和堆积体顶部以上来水共同侵蚀,具有复杂物质组成与结构的地貌单元,其特性介于土、石之间,所产生的水土流失具有灾难性和突发性^[1-2]。与传统坡面侵蚀相比,其侵蚀成因、方式等更复杂,易产生滑坡甚至泥石流等自然灾害,治理难度和方法均不同于普通土壤侵蚀^[3]。工程堆积体结构松散、坡度较陡、抗冲性差,在同等条件下比其他土质类型工程堆积体侵蚀强度大,水土流失也更为剧烈^[4]。土壤中的砾石不仅可以改变土壤的物质组成,影响土壤物理特性和水力学特征^[5-6],还在侵蚀过程中决定着地表粗糙度以及表土稳定性,并通过其在土壤中的含量、排列分布,影响土壤的搬运、沉积和侵蚀过程,是影响坡面径流、侵蚀产沙过程的重要因素^[7-10]。目前研究发现,在不同的试验条件下,砾石在水文和泥沙产生过程中有着不同,甚至截然相反的作用^[11]。纪丽静等^[12]、史倩华等^[13]通过对比土质坡面与土质坡面的侵蚀速率,发现砾石能有效抑制坡面侵蚀,具有显著的减沙效应;吕佼容等^[14]研究表明堆积体随砾石含量增加,坡面产流率线性减小,土壤剥蚀率降低。而 Poesen 等^[15]研究结论显示出相反的趋势,试验发现当岩石碎块嵌入土壤后,由于岩石碎块的密封作用,增加的岩石碎块覆盖将导致更大的径流量,砾石还增加了表层土壤的非渗透面积,加速土壤侵蚀;Lv 等^[16-18]研究也表明,平均侵蚀率与弃土堆中的岩石碎块含量呈正线性相关。由于砾石的多重作用,它们可以对土壤水文和侵蚀过程产生不同的影响^[11],另外不同类型土体堆积体坡面侵蚀过程和产沙特征也存在一定差

异^[17]。沙小燕^[18-19]对比研究不同土壤类型堆积体坡面侵蚀后发现风沙土最大,红土坡面次之,壤土坡面最小;丁文斌等^[20]试验发现黄沙壤堆积体相比于紫色土堆积体土壤侵蚀更为剧烈。此外,降雨是坡面径流侵蚀最根本的动力来源^[19],雨滴击溅具有分散表层土壤颗粒的作用,雨滴击溅作用根据不同的降雨强度、地表特征、薄层水流深度,影响土壤的产流产沙过程。上述研究多集中在降雨强度、坡度坡长等角度阐述水土流失机制,而关于降雨时间对坡面水土流的影响方面的研究报道较少。不同降雨历时对坡面侵蚀过程也有差异^[20],当前试验研究因降雨时间有限,多控制在 20~30 min,对于长时间多场次的降雨情况难以适用。因此,本研究针对陕北沙壤土工程堆积体水土流失特征,通过模拟野外自然条件下连续降雨,开展不同砾石质量含量(0, 10%, 20%, 30%, 40%)工程堆积体坡面的室内降雨试验,明晰不同砾石含量工程堆积体坡面土壤水动力学特性及产流产沙过程。研究结果可为解释砾石含量对坡面产流产沙的影响提供科学依据,为完善和修订工程堆积体土壤侵蚀测算模型提供基础资料和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤 试验所用土壤为沙壤土,于 2023 年 4 月采自陕西省榆林市定边县境内白于山(107°59'E, 37°59'N),是全国风沙危害和水土流失重点地区,其机械组成详见表 1。

1.1.2 砾石 试验所用砾石为陕西省咸阳市杨陵区境内工程用河卵石,是碳酸盐类矿物,主要成分为花岗岩,是常见建筑用石,砾石最大直径为 5.34 cm,单颗平均质量为 40.87 g,呈不规则形状,透水性差。

表 1 试验用土机械组成

Table 1 Soil texture of test

粒径/mm	<0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	0.2~0.25	>0.25
含量/%	17.47	3.35	7.48	17.95	33.17	15.08	5.22	0.28	0

1.1.3 模拟降雨装置 本试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅下喷二区进行,模拟降雨装置高度为 18 m,雨滴降落地表的终点速度满足试验要求且降雨均匀度超过 80%。

1.1.4 试验土槽 设计的试验装置为梯形槽,长、宽、高尺寸为 3.5 m×2.0 m×1.8 m,装置左右两侧用 1 cm 有机透明塑料板围筑,装置中间用钢板隔开,前缘设计集水槽以便收集径流泥沙,装置底部有 6 个钢轮。整个装置内表面用玻璃胶涂抹,减小边界效应对试验的影响,装置如图 1 所示。

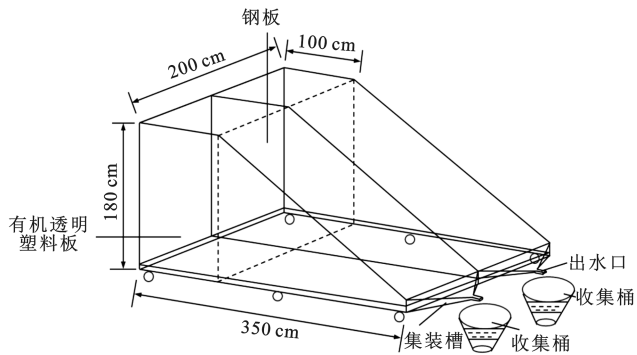


图 1 降雨试验装置

Fig.1 Rainfall test device

1.2 试验方法

本试验模拟实际生产建设项目中的弃土弃渣堆积体,将土壤分批过筛后与砾石按照设计比例称重,均匀混合后采用传送带将试验材料送至试验土槽上方 2.8 m 高度,使其自由落下堆积在装置内,模拟野外工程堆积体自然堆积过程。由于装置两侧及后缘有阻挡,工程堆积体呈斜坡形状,堆积过程中人工微调坡面,使工程堆积体坡脚刚好到装置出水口边缘,坡度为堆积完成后的自然休止角,形成一个高度为 1.6 m,上底长 1.0 m,下底 3.4 m,坡长为 2.85 m,坡角为 33°的梯形体,堆积完成后,人工将坡顶削平,使坡顶形成一个 1 m×2 m 的平台。根据研究区气象资料,结合定边县的降雨特征,选取代表性雨强 1.0 mm/min 作为本试验控制雨强,试验设置 0, 10%, 20%, 30%, 40% 共 5 个砾石含量(质量百分数),连续进行 4 场降雨,每场间隔 24 h。重复试验 2 次,共计 40 场降雨试验。每次试验前先将装填好的土槽用防水布遮盖静置 24 h 进行自然沉降,降雨开

始在试验槽利用梅花桩法布设雨量筒,多次率定雨强,确保误差不超过 5% 后进行试验,等降雨稳定后,迅速撤去防水布并开始第一次计时,当坡面水流呈薄层状并由上而下流至出水口时视为产流开始,记录初始产流时间并重置计时器开始第二次计时。产流后前 3 min 每 1 min 采集一次泥沙样,之后每隔 3 min 采集一次,并在同时段用高锰酸钾测定断面流速,每场降雨持续 42 min。试验结束后将采集泥沙样称重,烘干至恒重后再次称重。每场降雨结束后,用防水布将坡面覆盖,静置 24 h 后,重复以上步骤,直至连续完成 4 场降雨。

1.3 数据统计与分析

本试验中所计算指标包括流速(V)、雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、径流率(Q)、侵蚀速率(E)、径流剪切力(τ)、水流功率(W)和单位水流功率(P),其计算公式如下。

流速采用 $KMnO_4$ 染色示踪法测定,测距为 1 m,取 2 段流速求其平均值并乘以修正系数即为平均流速。

径流深为取样时间内平均径流深度,其计算公式为:

$$h = \frac{q}{Vbt} \tag{1}$$

式中: h 为径流深(m); t 为径流样取样时间(s); q 为取样时间内测得的径流量(m^3); V 为平均流速(m/s); b 为过水断面宽度(m)。

雷诺数为判定水流流型的参数,其计算公式为:

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \tag{2}$$

式中: Re 为雷诺数; ν 为水流黏滞系数(m^2/s)。

弗劳德数为判定水流流态的指标,其计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{3}$$

式中: Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度(m/s^2),取 $g = 9.8 m/s^2$ 。

径流率为单位时间内径流体积,其计算公式为:

$$Q = \frac{6(M_1 - M_2)}{100\rho t} \tag{4}$$

式中: Q 为径流率(L/min); M_1 为 t (s) 时间内浑水质量(g); M_2 为 t (s) 时间泥沙干重(g); ρ 为水密度($1.0 g/cm^3$)。

侵蚀速率为单位面积单位时间内的土壤侵蚀量，其计算公式为：

$$E=\frac{M_2}{St}$$

(5)

式中： E 为侵蚀速率 $[(\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))]$ ； S 为堆积体坡面的面积 (m^2) 。

径流剪切力为引起土壤颗粒分散和输移的径流冲刷动力，其计算公式为：

$$\tau=\gamma_m\cdot g\cdot R\cdot J$$

(6)

式中： τ 为径流剪切力 $(\text{Pa}$ 或 $\text{N}/\text{m}^2)$ ； γ_m 为浑水密度 (kg/m^3) ； R 为水力半径 (m) ； J 为水力坡降。

水流功率为作用于单位面积土体的水流所消耗的功率，其计算公式为：

$$W=\tau\cdot V$$

(7)

式中： W 为水流功率 $[\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})]$ 。

单位水流功率为表征单位质量水体势能随时间的变化率，其计算公式为：

$$P=V\cdot J$$

(8)

式中： P 为单位水流功率 (m/s) 。

利用 Microsoft Excel 整理试验数据，采用 IBM SPSS Statistics 27 进行数据分析，利用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 工程堆积体坡面产流特征

2.1.1 初始产流时间 每组试验的初始产流时间具体表现为第一场降雨历时最长，其余依次为第 2 场降雨、第 3 场降雨、第 4 场降雨，在后续降雨场次中，各砾石含量下初始产流时间迅速减小并趋于稳定（表 2）。与首场降雨相比，第 4 场降雨的初始产流时间分别缩短了 93.25%（0%），93.33%（10%），92.88%（20%），92.94%（30%），90.09%（40%）。不同场次下的各砾石含量堆积体坡面初始产流时间表现为：纯土堆积体>10%砾石含量>20%砾石含量>30%砾石含量>40%砾石含量。相较纯土堆积体，其余坡面初始产流时间分别缩短了 27.22%~64.62%（10%），35.09%~71.70%（20%），47.37%~78.77%（30%），51.75%~82.31%（40%）。

表 2 不同降雨场次、砾石含量初始产流时间

砾石含量/%	初始产流时间/s			
	第 1 场	第 2 场	第 3 场	第 4 场
0	1 690.01±0.20	424.22±0.42	195.70±0.69	114.32±0.34
10	1 230.56±0.41	150.09±0.34	105.38±0.53	82.38±0.28
20	1 040.86±0.83	120.25±0.42	80.95±0.98	74.87±0.52
30	850.45±0.35	90.35±1.17	60.76±0.22	60.02±1.02
40	555.09±0.52	75.54±0.20	60.29±0.43	55.29±0.85

2.1.2 产流特征 在次降雨中随着降雨持续时间的延长，堆积体坡面径流率在降雨初期（0—3 min）迅速增加，然后在降雨中后期（12—42 min）趋于稳定，在不同砾石含量的次降雨中具体表现为：第 4 场降雨>第 3 场降雨>第 2 场降雨>第 1 场降雨（图 2）。首场降雨径流速率较低是因为土壤初始含水量较小，而前期入渗率较高，随着堆积体的含水量逐渐饱和，入渗速率达到稳定，径流速率变得相对恒定。因此，第 1 场降雨径流速率小于后 3 场降雨的径流率。使用线性回归对砾石含量、场次对径流率的影响进行分析，将砾石含量、场次作为自变量，径流率作为因变量，建立回归模型，构建回归方程为：

$$Q=0.731+0.057G+0.220S$$

$$(R^2=0.260,\ p<0.05)$$

(9)

式中： G 为砾石含量（%）； S 为降雨场次（场）。

由回归方程可知，径流率随砾石含量和场次的增加而显著增加。连续降雨下的 0%~40%砾石含量径

流率峰值分别为 2.50,1.86,1.92,2.19,2.32 L/min，与纯土堆积体相比，10%~40%砾石含量堆积体坡面产流量峰值分别减少 0.64,0.58,0.31 和 0.18 L/min，其中 10%砾石含量下坡面产流量峰值最低，仅为纯土堆积体坡面的 74.47%。产流量峰值的出现时间随砾石含量的增加逐渐提前，分别为第 4 场降雨 36 min（0%）、第 4 场降雨 30 min（10%）、第 4 场降雨 24 min（20%）、第 4 场降雨 15 min（30%）、第 3 场降雨 27 min（40%）。

2.2 工程堆积体坡面流水动力学参数变化规律

不同降雨场次下首场降雨的纯土堆积体坡面平均流速最小，为 0.10 m/s；砾石含量 40%时流速最大，为 0.14 m/s，增加了 40%。在后续场次中堆积体坡面径流平均流速随降雨场次的增多而增大，具体表现为：第 4 场降雨>第 3 场降雨>第 2 场降雨>第 1 场降雨。连续降雨下坡面平均流速随砾石含量的增加显著增加，含砾石堆积体坡面平均流速是纯土堆积体的 1.04,1.09,1.22,1.24 倍。30%砾石含量堆积体

流速随降雨场次的增加幅度最小,增幅为 19.86%;纯土堆积体平均流速增幅明显,增加幅度为 43.55%。使用线性回归对砾石含量、场次对流速(V)的影响进行分析,构建回归方程为:

$$V=0.085+0.007G+0.012S \quad (10)$$

$(R^2=0.415, p<0.05)$

由回归方程可知,流速随着砾石含量和场次的增加而增加。

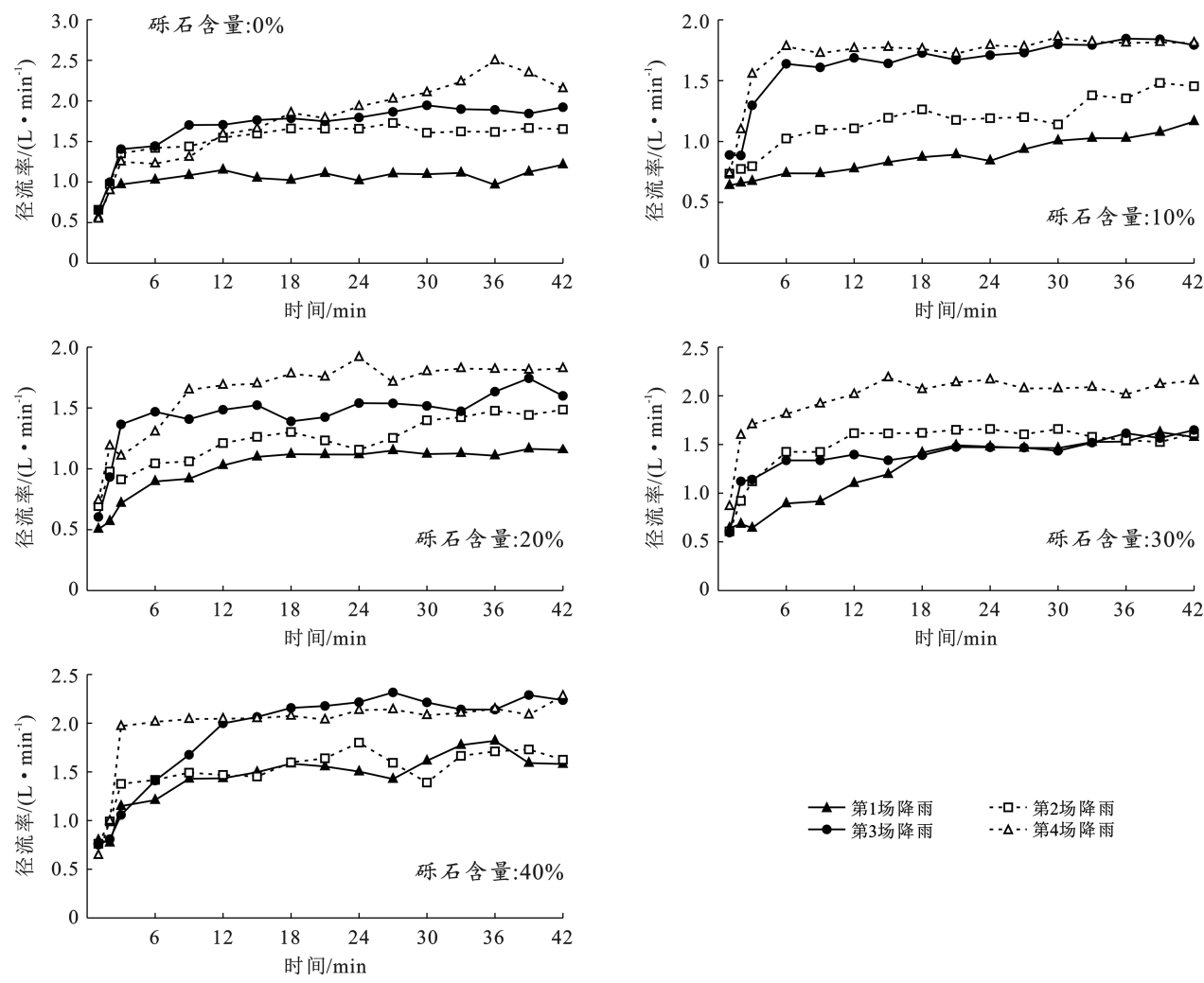


图 2 径流率随降雨场次、时间、砾石含量变化过程

Fig.2 Variation process of runoff rate with different rainfall frequency, runoff time and gravel content

依据明渠流判定标准,雷诺数小于 500 时,水流属于层流;当雷诺数大于 2 000 时,水流属于紊流;当雷诺数介于 500~2 000 时,水流属于过渡流。首场降雨和连续降雨条件下,雷诺数均随砾石含量的增加而增加。试验条件下雷诺数的变化范围介于 74.13~165.05,远小于 500,按照明渠流的判别方法,水流属于层流。从图 3 可以看出,雷诺数在连续降雨条件下,随砾石含量增加呈现显著增加趋势。与首次降雨相比,0%~40%砾石含量的堆积体末场降雨雷诺数分别增加了 96.53%,61.13%,61.06%,58.05%,36.26%。

使用线性回归对砾石含量、场次对雷诺数的影响进行分析,将砾石含量、场次作为自变量,雷诺数作为因变量,构建回归方程为:

$$Re=62.089+4.827G+18.724S \quad (11)$$

$(R^2=0.260, p<0.05)$

由回归方程可知,雷诺数随着砾石含量和场次的增加而增加。

弗劳德数是水流判别指标。弗劳德数小于 1,水流为缓流,弗劳德数等于 1,水流为临界流,弗劳德数大于 1,则水流为急流。本试验条件下,弗劳德数介于 2.67~3.91 范围,均为急流。由图 3 可看出,不同砾石含量坡面的弗劳德数随降雨场次的增加总体呈显著增加的变化趋势,部分坡面弗劳德数呈现“先增后减再增”趋势。通过分析回归对砾石含量、场次对弗劳德数(Fr)的影响进行分析,建立回归模型,拟合方程为:

$$Fr=2.260+0.204G+0.117S$$

$(R^2=0.224, p<0.05)$

由回归方程可知,弗劳德数随着砾石含量和场次的增加而增加。

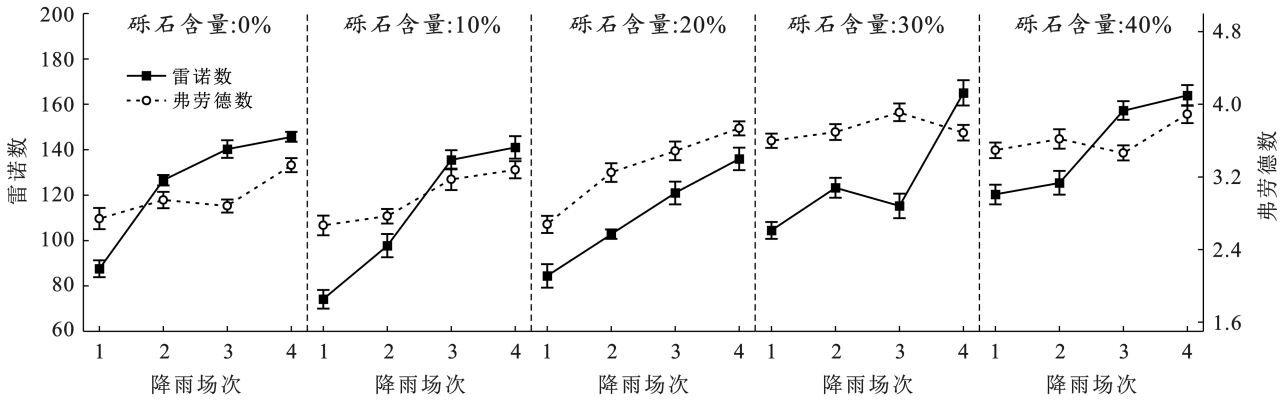


图 3 雷诺数和弗劳德数随降雨场次、砾石含量变化过程

Fig.3 Variation of Reynolds number and Froude number with rainfall frequency and gravel content

同一砾石含量条件下,径流剪切力随降雨场次的增加而增加。0%~40%砾石含量堆积体末场降雨的水流剪切力与首场降雨相比分别增加 1.44, 1.30, 1.15, 1.29 和 1.19 倍。

归方程如下:

$$\tau=1.129-0.111G+0.088S$$

$(R^2=0.281, p<0.05)$

由回归方程可知,径流剪切力随与场次显著正相关,与砾石含量显著负相关。

连续降雨条件下当砾石含量从 10% 增加到 40%,纯土堆积体坡面径流剪切力分别是含砾石堆积体坡面的 1.07~1.23 倍、1.54~1.71 倍、1.16~1.86 倍、1.18~1.42 倍。利用线性回归方法对砾石含量、降雨场次对径流剪切力(τ)的影响进行分析,构建回

从图 4 可以看出,不同降雨场次和砾石含量条件下坡面水流功率和单位水流功率变化趋势,同一砾石含量条件下,水流功率和单位水流功率均随着降雨的持续显著增加。

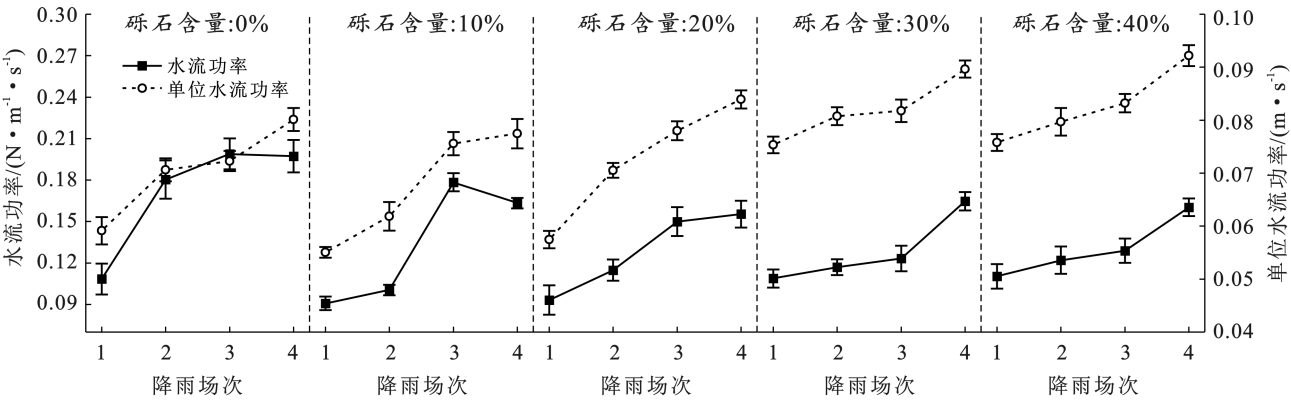


图 4 水流功率和单位水流功率随降雨场次、砾石含量变化过程

Fig.4 Changes of flow power and unit flow power with rainfall frequency and gravel content

使用线性回归对砾石含量、场次对水流功率(W)、单位水流功率(P)的影响进行分析,建立回归模型,构建回归方程为:

$$W=0.108-0.009G+0.023S$$

$(R^2=0.269, p<0.05)$

$$P=0.047+0.004G+0.007S$$

$(R^2=0.415, p<0.05)$

加,随砾石含量的增加而减小,单位水流功率随着砾石含量和场次的增加而增加。

2.3 工程堆积体坡面产沙特征

当砾石含量在 0%~40%时,坡面土壤侵蚀速率均呈现波动变化趋势。从图 5 可以看出,当砾石含量 $\leq 10\%$,前 3 场降雨下坡面的土壤侵蚀速率变化较为稳定,第四场随降雨时间增加土壤侵蚀速率起伏较大,在降雨后期(27 min)发生突增;而当堆积体砾石

由回归方程可知,水流功率随场次的增加而增

含量在 20%~40% 时,坡面土壤侵蚀速率保持较低水平波动增大,与低砾石含量相比变化较为稳定。随着砾石含量的增加,各坡面的平均土壤侵蚀速率显著下降。在连续降雨条件下,纯土堆积体坡面侵蚀速率变化范围为 0.45~6.73 g/(m²·min);而 10%, 20%, 30%, 40% 砾石含量坡面侵蚀速率波动范围分别为 0.13~4.09, 0.25~1.26, 0.14~0.96, 0.13~0.88 g/(m²·min)。10%~40% 砾石含量堆积体坡面平均

土壤侵蚀速率较纯土堆积体的减少幅度为 35.79%, 48.11%, 55.18%, 56.21%。采用线性回归对砾石含量、场次对侵蚀速率的影响进行分析,构建回归方程为:

$$E=0.691-0.173G+0.262S \tag{16}$$

$(R^2=0.135, p<0.05)$

由回归方程可知,土壤侵蚀速率随场次的增加而增加,随砾石含量的增加而减少。

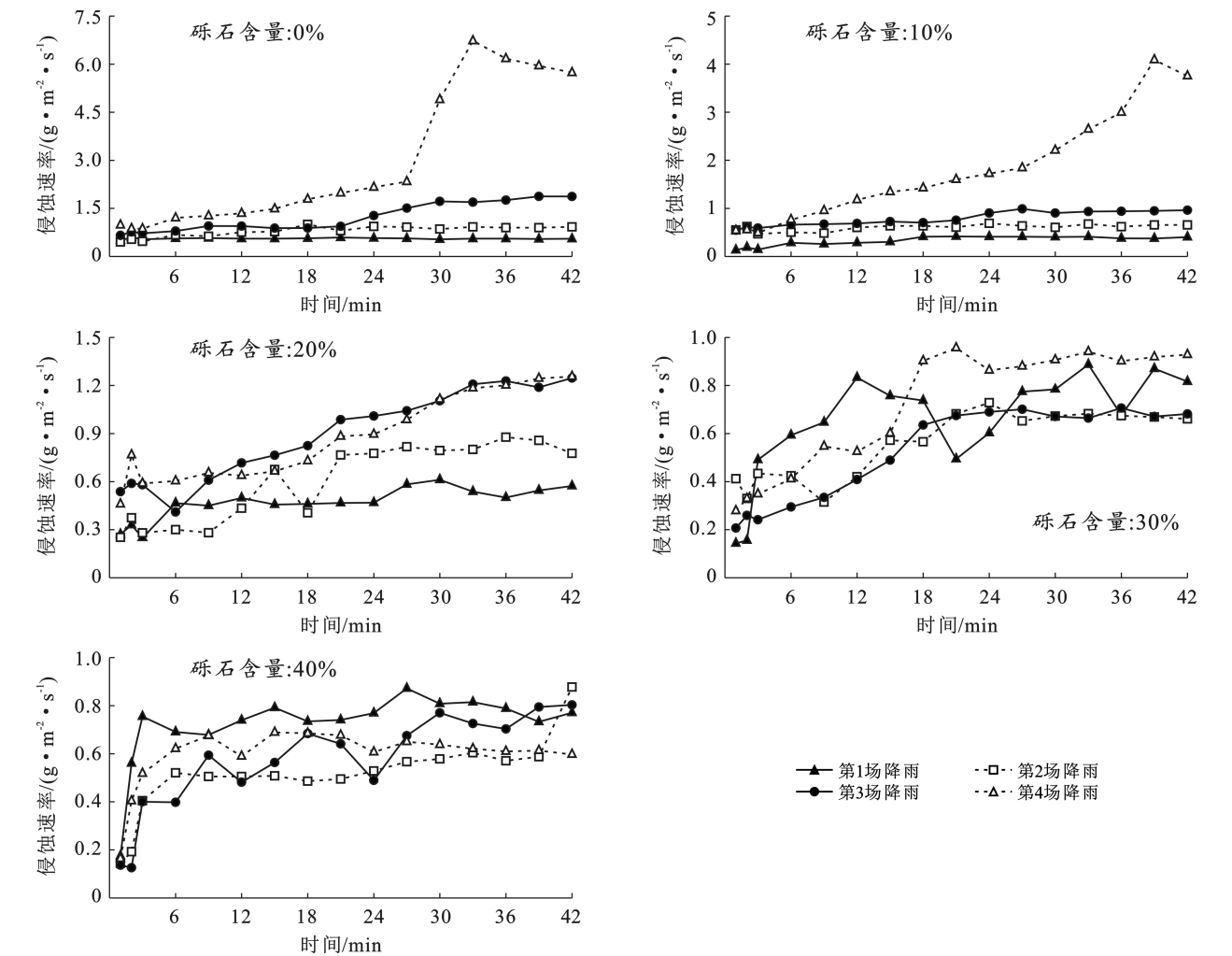


图 5 侵蚀速率随降雨场次、时间、砾石含量变化过程
Fig.5 Changes of erosion rate with rainfall frequency, time and gravel content

从图 6 可以看出,首场降雨不同砾石坡面侵蚀量表现为:40%>30%>0>20%>10%,随砾石含量增多侵蚀量逐渐增加;但在连续降雨条件下 0%~40% 砾石含量堆积体坡面累积产沙量表现为:砾石含量 0>10%>20%>30%>40%,随着砾石含量的提高,坡面侵蚀总量逐渐降低,其中 10%~40% 砾石含量堆积体坡面与纯土堆积体坡面相比,累积泥沙量分别减少 36.06%, 49.05%, 55.23%, 56.62%。

3 讨论

本文通过室内连续降雨试验发现降雨场次和砾石含量影响坡面的初始产流时间。初始产流时间是从降雨开始到坡面形成薄层水流并可以在小区出口处采集到径流样品所消耗的时间,降雨过程中砾石的存在破坏土壤表层结构,使土壤孔隙状况发生改变,为坡面径流的产生创造条件,因而与产流时间密切相

关^[21]。在降雨到达地面后,初始阶段坡面含水率较小,因此降雨落在坡面后全部入渗,无径流产生;随降雨历时增加土壤入渗能力减小,土壤含水量逐渐上升,工程堆积体顶部具有 1 m 宽的积水平台,使得降雨在坡顶低洼处聚集形成积水,当其蓄满向低处流动时,产流形成^[17]。首场降雨土壤含水率低,需在表层全部湿润后才形成径流,故产流时间较长,后续场次由于土壤初始含水率较高,积水区域的形成加快,因此初始产流时间较首场降雨缩短^[22]。随着砾石含量的增加,大量砾石覆盖在土壤表面,增大入渗孔隙的弯曲度,阻碍了降雨入渗,加速洼地积水溢出,也使得产流时间提前^[23](表 2)。这与吕佼容等^[14]在连续降雨下不同砾石含量重壤质堆积体产流历时随砾石含量的增加而延长的结论不同,但史倩华等^[13]对于红壤区不同砾石含量工程堆积体破面产流开始时间与砾石含量呈负相关、梁洪儒等^[24]对于褐土坡面产流时间随砾石含量增大而减小试验结论与本研究一致,可能是土壤质地不同、砾石大小不同、装填土方式不同导致的土壤入渗性能差异,改变了堆积体原有的入渗通路,从而使得产流时间有所差异。

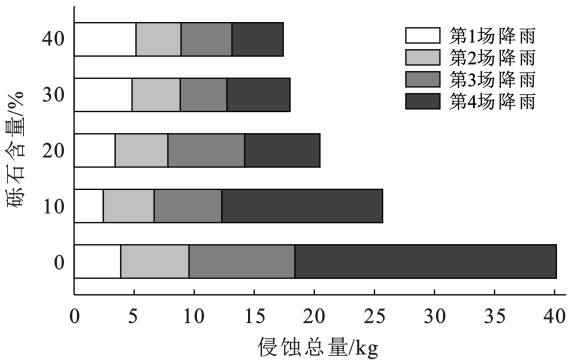


图 6 不同降雨场次、砾石含量的侵蚀总量
Fig.6 Total erosion of different rainfall events and gravel content

工程堆积体坡面产流过程受到土壤特性、土石比例、降雨强度以及时长等因素的综合影响^[16]。本研究试验结果表明,在 1.0 mm/min 雨强条件下,坡面径流率随工程堆积体砾石含量的增加而增大(图 2)。同等降雨强度下赵满对风沙土堆积体的研究发现,低砾石含量(10%)坡面径流率较土质坡面减少,而高砾石含量坡面径流率则逐渐增加^[4],与本研究结果有所差异,主要原因在于降雨时长不同导致砾石含量对雨水下渗的作用不同,堆积体内部砾石的存在可以增加土石之间的“入渗点”,通过促进雨水入渗从而抑制径流产生,也可以阻碍雨水下渗通路,使径流被迫在土壤表面流动,减少径流的弯曲度和流动路径,从而促进坡面产流^[11]。降雨历时延长使得砾石促进作用大

于抑制作用,使得坡面径流率不断增加。在连续降雨过程中次降雨坡面产流表现为“迅速增长—稳定波动”的变化趋势(图 2),是因为降雨起始阶段坡面表层土壤入渗能力强,雨水主要用于入渗。随着降雨历时延长,表层土壤含水率升高,入渗速率逐渐减小至稳定,产流率随之增大并趋于平缓。

径流剪切力通过破坏土壤颗粒之间的黏结作用,为坡面土壤侵蚀提供泥沙来源,是土体分离的主要驱动力^[25]。径流剪切力随砾石含量的增加呈现出减小趋势,原因一方面是无砾石覆盖时,雨滴对土壤表层击溅能力更强,击溅产生的细小土体颗粒更容易堵塞土壤孔隙形成临时结皮,导致坡面产流量增加,径流深也随之增加,从而引起水流剪切力增加,且由于坡面水深极浅,坡面上的微小变化就会引起径流能量发生改变^[26];另一方面在于纯土堆积体在第 4 场降雨过程中发生重力侵蚀现象,泥沙产生大量泻溜,导致径流的紊动性增强,使径流样中浑水密度迅速增加,径流剪切力随之急剧增加^[27]。水流功率指作用于单位面积的水流所消耗的功率,即剥蚀一定量土壤所需功率;单位水流功率是表征单位质量水体势能随时间的变化率。径流流速则是影响水流功率和单位水流功率的主要因素。坡面径流流速是计算其他水动力学参数的基础,其大小直接影响坡面土壤颗粒的分离、搬运和沉积过程^[26],在影响坡面流速中,下垫面粗糙度是其中一个重要指标,工程堆积体中含有大小、数量不一的砾石,其表面覆盖砾石的不均性会导致流速随产流历时发生变化,从而影响水动力学参数的变化^[17]。

降雨场次、初始产流时间、径流率、砾石含量等因素是不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀速率变化的主要原因,其中增加堆积体砾石含量可降低雨滴击溅动能,影响坡面流水动力学特性,致使土壤抗蚀性增强,坡面侵蚀速率降低^[14]。这与吕佼容等^[14]关于连续降雨下堆积体土壤流失的试验结果一致,但略小于李瑞栋等^[28]的研究结论,侵蚀程度上的差异主要是由于本试验中陕北沙壤土与李瑞栋等试验所用的陕西壤土相比,结构松散且土体团粒性质差,因此抗蚀性更差。并且由于雨滴击溅和径流冲刷作用,低砾石覆盖的坡面土壤极易被径流搬运从而形成侵蚀泥沙,因此本试验中纯土质和 10%砾石含量坡面在第四场降雨过程中均出现坡面土壤滑塌,使得大量泥沙泻溜,直接导致了堆积体土壤侵蚀速率的“波动和突变”(图 5)。随着砾石含量的增加,土壤数量减少,且表层土壤被径流带走后,裸露在坡面的砾石对土壤起到保护作用,进而侵蚀速率不再剧烈增加,稳定下来并

呈现波动状态,从而实现拦蓄水土,保持较高的减沙效益。另外,试验中所用砾石为工程用河卵石,与研究区中部分工程堆积体所含砾石类型有所不同,从而影响工程堆积体的产流产沙特征,今后要细化砾石种类对工程堆积体侵蚀产沙影响的研究,以提高研究的普适性和精准性。

4 结论

(1) 连续降雨条件下,与纯土堆积体相比,含砾石堆积体坡面初始产流时间逐渐缩短;次降雨径流量表现为“迅速增加—稳定波动”的变化趋势,平均径流率与砾石含量、降雨场次之间呈显著正相关关系;随砾石含量增加,产流峰值逐渐降低且出现时间提前。

(2) 工程堆积体在连续降雨条件下雷诺数均小于500,水流属于层流;弗劳德数介于2.14~3.71,表现为急流。坡面径流剪切力与场次正相关,与砾石含量负相关;水流功率随场次的增加而增加,随砾石含量的增加而减小;单位水流功率随着砾石含量和场次的增加而增加。

(3) 含砾石堆积体坡面土壤侵蚀速率表现为场次次的增加而增加,随砾石含量的增加而减小。当砾石含量 $\leq 10\%$,降雨后期坡面出现土壤滑塌,土壤侵蚀速率发生突增,而当砾石含量在 $20\% \sim 40\%$ 时,坡面土壤侵蚀速率随降雨历时的增加变化较为稳定,保持在较低水平波动增长。砾石覆盖在堆积体坡面水土流失过程中可有效减少坡面产沙,起到保土作用,其中高砾石含量(40%)的沙壤土工程堆积体坡面土壤侵蚀强度较小。

参考文献(References)

- [1] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
Zhao Xuan, Xie Yongsheng, Jing Minxiao, et al. Standardization parameter for spoilbank underlying surface simulation development construction project [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(5):229-234.
- [2] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(24):94-102.
- [3] 牛耀彬.降雨和上方来水条件下工程堆积体土壤侵蚀特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
Niu Yaobin. Study on characteristics of soil erosion of engineering accumulation under the conditions of rainfall and Inflow [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [4] 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.
Zhao Man, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Run-off and sediment yielding characteristics of slopes of stacks of gravels-containing aeolian sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(4):847-859.
- [5] Ma Donghao, Shao Mingan. Simulating infiltration into stony soils with a dual-porosity model [J]. European Journal of Soil Science, 2008,59(5):950-959.
- [6] 王葆,马俊明,程金花,等.华北土石山区砾石覆盖对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(5):93-98.
Wang Bao, Ma Junming, Cheng Jinhua, et al. Effects of gravel coverage on splash erosion in the mountainous region of Northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):93-98.
- [7] Zhang Yinghu, Zhang Mingxiang, Niu Jianzhi, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: significance and progress [J]. Catena, 2016,147:153-166.
- [8] Khetdan C, Chittamart N, Tawornpruek S, et al. Influence of rock fragments on hydraulic properties of Ultisols in Ratchaburi Province, Thailand [J]. Geoderma Regional, 2017,10:21-28.
- [9] Sekucia F, Dlapa P, Kollar J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments [J]. Catena, 2020,195(1):104807.
- [10] Wu Xiaolong, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China [J]. Soil Water Research, 2021,16:151-163.
- [11] 王永武,朱青,赖晓明,等.土壤水文过程对土壤砾石的响应:全球 Meta 分析[J].中国科学:地球科学,2023,53(9):2094-2109.
Wang Yongwu, Zhu Qing, Lai Xiaoming, et al. Response of soil hydrological processes to soil rock fragments: A global meta-analysis [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023,53(9):2094-2109.
- [12] 纪丽静,王文龙,康宏亮,等.黄土区土质与土石质塬土堆积体水力侵蚀过程差异[J].应用生态学报,2020,31(5):1587-1598.
Ji Lijing, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Differences in hydraulic erosion processes of the earth and earth-rock loess soil engineering accumulation in the Loess Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(5):1587-1598.
- [13] 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.
- Shi Qianhua, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9):2673-2680.
- [14] 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*, 2019, 30(2): 210-219.
- Lv Jiaorong, Zhang Wenbo, Hu Jinsheng, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2):210-219.
- [15] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. *Catena*, 1999, 36: 315-329.
- [16] Lv Jiaorong, Luo Han, Xie Yongsheng. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. *Catena*, 2019, 172:179-189.
- [17] Lv, Jiaorong, Luo Han, Hu Jinsheng, et al. The effects of rock fragment content on the erosion processes of spoil heaps: A laboratory scouring experiment with two soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19:2089-2102.
- [18] 张恒, 高照良, 牛耀彬, 等. 两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 115-127.
- Zhang Heng, Gao Zhaoliang, Niu Yaobin, et al. A comparative study on relationship between rill morphology and sediment yield on slopes of two types of engineering mounds [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1):115-127.
- [19] 沙小燕, 王文龙, 娄义宝, 等. 不同土体类型工程堆积体坡面径流侵蚀动力差异[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(6):191-199.
- Sha Xiaoyan, Wang Wenlong, Lou Yibao, et al. The dynamic difference of runoff erosion on slope surface of different soil engineering accumulation bodies [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(6):191-199.
- [20] 丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3):558-569.
- Ding Wenbin, Li Yexin, Shi Dongmei, et al. Contrast study on simulated runoff erosion of two engineering accumulation slopes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3):558-569.
- [21] 王万忠, 焦菊英, 郝小品. 黄土高原侵蚀产沙强度、面积、数量间相互关系的统计分析[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1):54-60.
- Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin. Statistical analysis on inter-relationship among erosion sediment intensity, area and amount in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1):54-60.
- [22] 王林华, 汪亚峰, 王健, 等. 地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5):120-128.
- Wang Linhua, Wang Yafeng, Wang Jian, et al. Effects of soil surface roughness on runoff generation mechanism on loess slope [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(5): 120-128.
- [23] 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.
- Mao Tianxu, Zhu Yuanjun, Shao Mingan, et al. Characteristics of runoff and infiltration in stony soils under simulated rainfall conditions [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5):1214-1218.
- [24] 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.
- Liang Hongru, Yu Xinxiao, Fan Dengxing, et al. Effect of gravel-sand mulching on slope runoff and sediment yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):57-61.
- [25] Lai Xiaoming, Liu Ya, Li Liuyang, et al. Spatial variation of global surface soil rock fragment content and its roles on hydrological and ecological patterns [J]. *Catena*, 2022, 208:105752.
- [26] 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 Peiqing, Zheng Fenli, Yao Wenyi. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2):236-240.
- [27] 周凡凡. 坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Zhou Fanfan. Study on unbalance characteristics of sediment transport by rainfall runoff erosion on slope [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [28] 李瑞栋, 王文龙, 娄义宝, 等. 模拟降雨条件下砾石含量对黄土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11):3027-3036.
- Li Ruidong, Wang Wenlong, Lou Yibao, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11):3027-3036.