

雨强和砾石含量对壤土与风沙土堆积体产流产沙的影响

张一博¹, 赵浚棋¹, 唐凯金¹, 魏育超^{2,3}, 李镇^{1,4}, 魏宇航¹, 骆汉^{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.渭南市水土保持和

移民工作中心, 陕西 渭南 714000; 4.中国电建集团昆明勘测设计院有限公司, 云南 昆明 650233)

摘要: [目的] 研究砾石含量和降雨强度对壤土和风沙土两种土质工程堆积体产流产沙的影响, 为生产建设项目高质量水土流失防治提供理论参考和数据支撑。[方法] 在室内模拟降雨条件下, 选择土石混合堆积体作为工程侵蚀下垫面代表, 定量分析堆积体在 4 种砾石含量(0, 10%, 20%, 30%)和 3 种降雨强度(1.0, 1.5 和 2.0 mm/min)下的产流产沙特征。[结果] ①两种堆积体径流率呈现“先递增后波动”趋势。风沙土堆积体在低雨强(1.0 和 1.5 mm/min)下径流率和径流功率低于壤土堆积体, 但在高雨强(2.0 mm/min)和高砾石含量(30%)条件下增速更大, 达到或超过壤土堆积体水平, 在类似条件下可能引发更严重的土壤侵蚀。②两种堆积体的侵蚀速率均随雨强增加而上升, 随砾石含量增加而降低, 风沙土堆积体的侵蚀速率普遍高于壤土堆积体。风沙土堆积体在 1.0 和 1.5 mm/min 雨强条件下, 10% 砾石含量时侵蚀速率降幅最大, 分别为 11.89% 和 73.10%; 2.0 mm/min 雨强条件下 30% 砾石含量时降幅最大, 为 26.16%; 壤土堆积体在 1.5 和 2.0 mm/min 雨强条件下 30% 砾石含量时侵蚀速率降幅最大, 分别为 75.23% 和 56.35%。③风沙土堆积体在 10% 砾石含量下径流功率较纯土降幅达 16.09%~26.92%; 壤土堆积体在 1.5 和 2.0 mm/min 雨强条件下, 30% 砾石含量时径流功率降幅达 18.71%~23.13%; 在 1.0 mm/min 雨强条件下砾石的减弱作用不明显。[结论] 风沙土堆积体径流率和径流功率在高雨强(2.0 mm/min)高砾石含量(30%)条件下增速更大, 快速增至与壤土堆积体相当或更大, 可能发生更严重侵蚀。两种土质堆积体侵蚀速率均随雨强增大而增大, 随砾石含量增加而减小。

关键词: 工程堆积体; 降雨强度; 砾石含量; 产流产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0011-14

中图分类号: S157.1

文献参数: 张一博, 赵浚棋, 唐凯金, 等. 雨强和砾石含量对壤土与风沙土堆积体产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 11-24. Zhang Yibo, Zhao Junqi, Tang Kaijin, et al. Effects of rainfall intensity and gravel content on runoff and sediment production from loam and aeolian sandy soil accumulation bodies [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 11-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.001; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.001.

Effects of rainfall intensity and gravel content on runoff and sediment production from loam and aeolian sandy soil accumulation bodies

Zhang Yibo¹, Zhao Junqi¹, Tang Kaijin¹, Wei Yuchao^{2,3}, Li Zhen^{1,4}, Wei Yuhang¹, Luo Han^{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

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Weinan Soil and Water

Conservation and Resettlement Work Center, Weinan, Shaanxi 714000, China; 4.China Power Construction

Corporation Kunming Institute of Survey, Design & Research Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650233, China)

Abstract: [Objective] The effects of gravel content and rainfall intensity on runoff and sediment production characteristics of engineering accumulation bodies composed of loam and aeolian sandy soil were investigated, in

收稿日期: 2025-01-03

修回日期: 2025-05-16

采用日期: 2025-05-19

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“降雨触发生产建设项目工程堆积体侵蚀-失稳过程及机理”(2025JC-YBMS-285); 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-15)

第一作者: 张一博(2000—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。Email: zyb1205i@163.com。

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。

order to provide theoretical guidance and data support for effective soil erosion prevention in production and construction projects. [Methods] Indoor rainfall simulation experiments were conducted using soil-rock mixed accumulation bodies as representative engineering erosion underlay surfaces, while the runoff and sediment production characteristics were quantitatively analyzed under four gravel content levels (0, 10%, 20%, and 30%) and three rainfall intensities (1.0, 1.5, and 2.0 mm/min). [Results] ① Both accumulation bodies exhibited a ‘first increasing, then fluctuating’ trend in runoff rate. Among them, aeolian sandy soil accumulation bodies demonstrated lower runoff rates and hydraulic power than those of loam under low rainfall intensities (1.0 and 1.5 mm/min). However, they showed greater growth rates under high rainfall intensity (2.0 mm/min) and high gravel content (30%), the aeolian sandy soil exhibited greater growth rates, reaching or even exceeding loam levels, indicating potential for more severe erosion under similar conditions. ② Erosion rates of both accumulation bodies increased with an increase in rainfall intensity and decreased with an increase in gravel content, with aeolian sandy soil consistently exhibiting higher erosion rates. And for aeolian sandy soil, maximum reductions in erosion rate occurred at 10% gravel content under 1.0 mm/min (11.89%) and 1.5 mm/min (73.10%) rainfall, and at 30% gravel content under 2.0 mm/min (26.16%) rainfall. For loam, maximum reductions occurred at 30% gravel content under 1.5 mm/min (75.23%) and 2.0 mm/min (56.35%) rainfall. ③ Aeolian sandy soil demonstrated 16.09%—26.92% reductions in hydraulic power at 10% gravel content relative to that in the pure soil. Loam exhibited 18.71%—23.13% reductions in hydraulic power at 30% gravel content under 1.5—2.0 mm/min rainfall, whereas gravel showed limited mitigation effects under 1.0 mm/min rainfall. [Conclusion] Aeolian sandy soil accumulation bodies demonstrated accelerated runoff rates and hydraulic power growth under high rainfall intensity (2.0 mm/min) and high gravel content (30%), potentially leading to severe erosion which reaching or exceeding loam levels. For both soil types, erosion rates were positively correlated with rainfall intensity and negatively correlated with gravel content.

Keywords: engineering accumulation body; rainfall intensity; gravel content; runoff and sediment production

近年来生产建设项目数量增速加快,虽然全国水土流失面积下降,但生产建设项目导致的水土流失面积却大量增加^[1]。生产建设项目施工时大量的机械开挖造成地表裸露破坏,形成典型的人为水土流失地貌单元。土石方挖填后产生的弃土弃渣倾倒堆放形成高陡的工程堆积体。土石混合堆积使堆积体土壤结构破坏,遇到短历时强降雨易发生严重水土流失。

陕西省是中国重要的能源和农业大省,各类生产建设项目广泛存在于全省范围内,如在北部风沙土分布地区的煤炭开采和风电项目,中部和南部壤土分布地区的现代农业开发和交通基础设施建设项目。随着生态文明建设的推行,工程建设过程更加注重堆积体水土流失的防控。堆积体水土流失主要是由坡面径流侵蚀引起的,降雨强度在土壤径流和侵蚀过程中有显著影响^[2]。而砾石的存在不仅改变土壤的物理特性和水力学特征,还决定地表粗糙度和表土的稳定性,是影响坡面产流产沙过程的重要因素^[3],Dai等^[4]发现砾石能通过形成砾石骨架增加边坡稳定性,提高砾石—土壤层的抗剪强度。砾石含量和雨强影响堆积体在降雨下的稳定性^[5]和产流

产沙特征^[6-7]。研究表明存在砾石的工程堆积体相比纯土堆积体在降雨下侵蚀明显减少,抗冲刷能力提高,且侵蚀量随砾石含量增加而增加,在高坡度(58%,84%)和高流量条件下更为明显。砾石含量的不同也会改变堆积体土壤的孔隙度,进而影响其水土流失过程^[8],而二者共同作用还使堆积体产流产沙规律呈现复杂性^[9],在低砾石含量条件下,低强度的降雨也会导致严重的土壤侵蚀^[10]。砾石的存在会加剧坡面侵蚀,含有砾石的红壤土堆积体侵蚀性参数比纯红土堆积体高出20~30倍^[11];有研究^[12]指出单位面积的侵蚀量随砾石含量的增加而减少。此外砾石含量和降雨强度对堆积体产流产沙特征的影响存在阈值效应,在砾石含量和降雨强度综合影响下堆积体的侵蚀率会突然增加^[8],有研究^[13]发现砾石覆盖度在20%以下时,径流深、径流剪切力和水流功率随砾石覆盖增加而增加,随着砾石覆盖度超过20%流速和单位水流功率开始下降并趋于稳定。此外王雪松等^[14]还探讨了不同大小的石块对工程堆积体坡面产流和产沙的影响,发现较大的石块更能促进坡面产流和产沙,且随着降雨强度增加大石块与小石块堆积体之间的产流量差异增大,而产沙量差异减小。

黄土高原及风沙区是土壤侵蚀典型区域,交错分布的风沙土和壤土其侵蚀机制差异直接影响生态保护策略(如风沙土堆积体需优先控制初期径流,而壤土需注重长期结构稳定性维护)。已有研究^[15]通过模拟降雨试验分析不同土质堆积体侵蚀过程的异同,结果表明壤土堆积体产流产沙增速较风沙土堆积体更缓,且搬运泥沙颗粒各组分比例更均匀。Lü等^[16]的研究结果表明随着砾石含量从0%增加到30%,黏壤土的侵蚀率降低了55.6%而砂壤土的侵蚀率却增加了52.8%。近年研究多聚焦单一土壤类型(如黄土或红壤土)堆积体的侵蚀特征^[6],而对风沙土和壤土堆积体的产流产沙特征缺乏对比研究,工程堆积体侵蚀过程在不同雨强、不同堆置形态,尤其在土壤类型之间存在明显差异^[15],在王文龙等^[17]构建的工程堆积体侵蚀预测模型中,风沙土与壤土的土石质因子差异显著,对这些差异的进一步对比研究可提高模型参数的区域适用性,深化不同土质堆积体水土流失

机理的认识,以指导更精准的水土流失防治工作及更合理的水土保持措施配置。基于此,本研究选择土石混合堆积体作为研究对象,采用室内人工模拟降雨试验定量分析4种砾石含量(0,10%,20%,30%)和3种降雨强度(1.0,1.5和2.0 mm/min)对两种土质堆积体产流产沙特征的影响,旨在为工程堆积体的高质量水土流失防控提供理论参考和数据支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验通过将风沙土和壤土分别与不同含量的砾石混合以模拟实际工程堆积体。于2023年6月采样,风沙土取自定边县安边镇白于山境内,壤土取自陕西省杨凌农业高新技术产业示范区的五泉镇茂陵村周边。将砾石按照不同质量含量分别与土壤均匀混合后装填,并设置纯土堆积体作为对照。试验土壤颗粒组成详见表1。

表1 供试土壤样品机械组成

Table 1 Particle mechanical composition of soil samples

单位:%

土类	不同粒径(mm)颗粒含量						
	<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
风沙土	20.82	7.48	17.95	33.17	15.08	5.22	0.22
壤土	24.99	8.40	21.88	34.50	8.40	1.58	0.25

研究所用砾石为生产建设项目中多用的破口石,主要由碳酸盐类矿物组成,砾石最大直径为5.34 cm,单颗平均质量为40.87 g,砾石组成详见表2。

表2 供试砾石样品机械组成

Table 2 Mechanical composition of gravel samples

直径/mm	2~10	10~30	30~50	>50
所占比例/%	27.00	51.00	18.00	2.00

1.2 试验装置

试验装置为梯形槽,长、宽、高尺寸为3.5 m×2.0 m×1 m,装置左右两侧用透明塑料板围筑,中间用钢板隔开,前缘设计集水槽收集径流泥沙。装置内表面用玻璃胶及凡士林涂抹以防漏水,减小边界效应影响。

1.3 试验方法

试验于2023年7—9月在西北农林科技大学水土保持研究所降雨大厅内进行,降雨高度16 m,能够满足雨滴到达终点的速度要求。降雨大厅内雨强范围为30~260 mm/h,采用雨量筒法标定,均匀度公式^[18]计算得到降雨均匀度可达80%以上。根据前人研究^[19]及研究区气象资料,选取暴雨事件中常见降

雨强度为试验控制雨强:1.0,1.5和2.0 mm/min,选取以往风沙土和壤土堆积体研究中对产流产沙影响较大及出现阈值的4种砾石含量0(纯土),10%,20%,30%作为试验控制砾石含量^[15],共计12种试验组,每组连续3场降雨,降雨强度一致,每场降雨时间间隔24 h,共计36场降雨试验。降雨前用防水篷布遮盖梯形槽,进行雨强率定,待降雨稳定后迅速揭开篷布,从坡面产流开始计时。计时开始后,前3 min每1 min取样1次,之后每隔3 min取样1次,记录每次取样时间和泥沙样品体积,并采用高锰酸钾染色法测量坡面流速,在坡面临边位置从上到下设置3个1 m长的测流区,记录高锰酸钾溶液流过测流区的时间,用测流区长度除以流经时间即可得出坡面流速,3个测流区流速的平均值即为此刻坡面流速。每场降雨持续45 min。降雨结束后,测定浑水样品质量后静置约8~12 h,倒掉上层清液,置于烘箱内烘干,最后称量烘干样质量。

1.4 指标计算

试验计算指标包括径流率(Q)、侵蚀速率(E)和径流功率(W)。

(1) 径流率。单位时间内径流体积,计算公式为

$$Q = \frac{M_1 - M_2}{1000t} \quad (1)$$

式中: Q 为径流率(L/min); M_1 为 t (min) 时间内浑水质量(kg); M_2 为 t (min) 时间内泥沙干重(kg)。

(2) 侵蚀速率。单位时间单位面积内泥沙运移质量, 计算公式为

$$E = \frac{M_2}{St} \quad (2)$$

式中: E 为侵蚀速率[g/(m²·s)]; S 为堆积体坡面的面积(m²); t 为接样时间。

(3) 径流功率。作用于单位面积土体的径流所消耗的功率, 计算公式为

$$W = \tau \cdot V \quad (3)$$

式中: W 为径流功率[N/(m·s)]; V 为流速(m/s); τ 径流剪切力(Pa 或 N/m²), 其计算公式为

$$\tau = \gamma_m g R J \quad (4)$$

式中: γ_m 为浑水密度(kg/m³); R 为水力半径(m); J 为水力坡降。

2 结果与分析

2.1 径流率变化特征

2.1.1 壤土径流率变化特征

(1) 1.0 mm/min 雨强条件下第 1 场降雨 20% 砾石含量壤土堆积体径流率前 5 min 迅速增加后平稳, 其他堆积体前 10 min 快速增长后趋于稳定, 总体径流率表现为: 0% > 10% ≈ 20% > 30% (图 1)。第 2 场总体径流率表现为: 20% > 0% > 30% > 10%; 第 3 场降雨 0% 处理组呈缓慢递增, 总体径流率表现为: 20% > 30% > 0% > 10%。

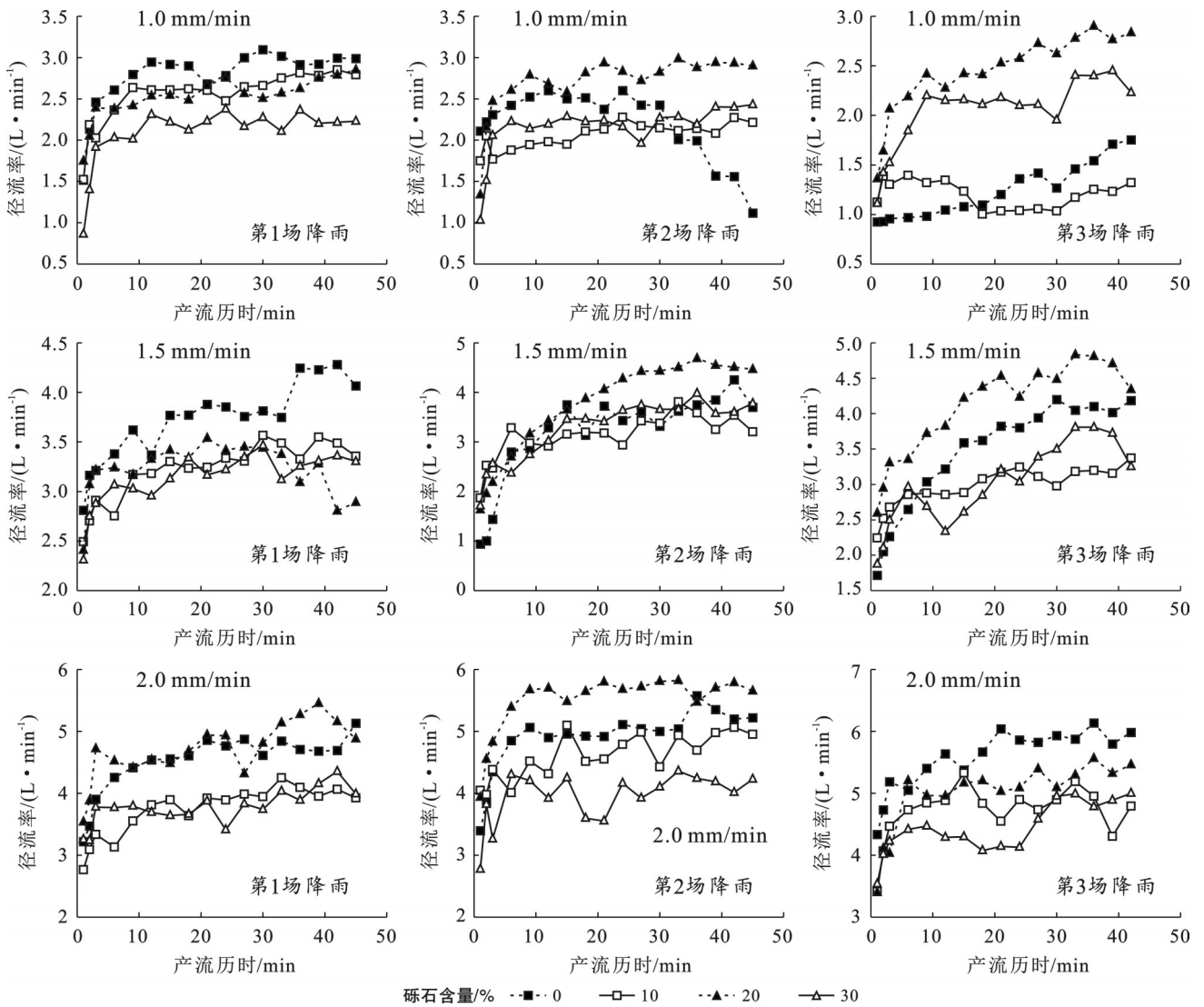


图 1 壤土径流率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.1 Variation process of runoff rate with time, rainfall intensity and gravel content of loamy soil

(2) 1.5 mm/min 雨强条件下第 1 场降雨径流率约 3 min 达到稳定状态, 0% 处理组径流率总体较高, 变

化范围为 3.326~4.281, 第 2 场降雨 0% 堆积体 10 min 左右出现波动, 变化范围为 3.135~4.255, 10% 前 6 min

迅速递增后趋于平稳,变化范围为 2.917~3.811, 20% 堆积体前 30 min 递增后平稳,变化范围为 1.633~4.433,30% 堆积体前 3 min 迅速递增后出现波动,变化范围为 2.377~3.980。第 3 场降雨 0% 堆积体径流率递增速度随产流历时减缓。

(3) 2.0 mm/min 雨强条件下径流率增加后波动,变化范围分别为 10% (3.133~4.252), 20% (4.316~5.451), 30% (3.409~4.351)。第 2 场降雨 0%, 20% 砾石含量壤土堆积体前 10 min 径流率迅速递增后趋于平稳,10%, 30% 砾石含量壤土堆积体径流率呈波动变化。第 3 场降雨径流率变化范围和幅度与第 2 场无明显区别,初始径流率高于第 2 场降雨。

2.1.2 风沙土径流率变化特征

(1) 1.0 mm/min 雨强条件下,第 1 场降雨 30% 砾石含量堆积体径流率先递增后平稳,0%, 10%, 20% 堆积体前 3 min 迅速递增后波动,总体为 20%,

30% 砾石含量处理的径流率较高(图 2);第 2 场降雨 0%, 10% 堆积体前 3 min 迅速递增后波动,20%, 30% 堆积体前 15 min 增大后出现波动,总体呈现:30% > 20% > 10% > 0%;第 3 场降雨 20%, 30% 堆积体径流率较高。

(2) 1.5 mm/min 雨强条件下,第 1 场降雨堆积体径流率前 5 min 递增后波动;第 2 场降雨径流率波动范围变大;第 3 场降雨径流率出现小幅波动,变化范围分别为 0% (1.889~2.988), 10% (1.699~2.719), 20% (2.06~3.033), 30% (1.945~2.932)。

(3) 2.0 mm/min 雨强条件下,第 1 场降雨 4 种堆积体径流率先增加后平稳再波动;第 2 场降雨 0%, 30% 堆积体径流率较高,先递增后小幅波动;第 3 场降雨变化幅度增大,分别为 0% (2.457~4.814), 10% (2.795~4.255), 20% (3.746~5.728), 30% (4.003~5.965)。

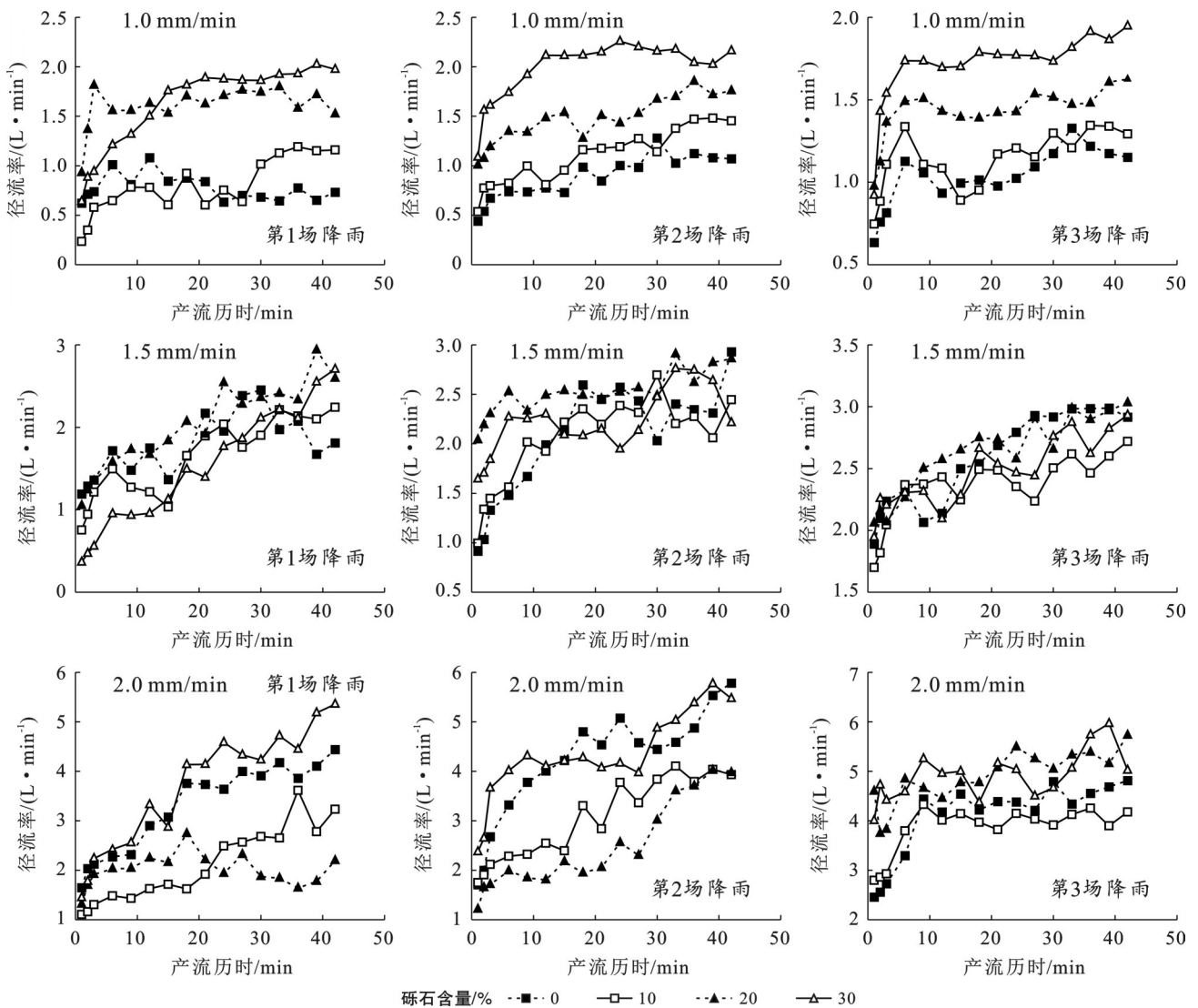


图 2 风沙土径流率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.2 Variation process of runoff rate with time, rainfall intensity and gravel content of aeolian soil

2.1.3 壤土与风沙土径流率对比

为了量化雨强和砾石含量对堆积体径流率的影响,通过回归分析反映土壤饱和度和结构变化对径流的影响,研究两类土质堆积体对雨强和砾石含量的敏感性差异,为工程堆积体的砾石配比优化和雨强阈值预警提供理论依据,采用线性回归分析壤土堆积体和风沙土堆积体砾石含量(G)和雨强(S)对径流率(Q)的影响,壤土堆积体的回归方程为:

$$Q = -0.22799 - 0.59747G + 2.43828S$$

$$(R^2 = 0.6925, p < 0.0001) \quad (5)$$

对于风沙土堆积体回归方程为:

$$Q = -1.29832 + 1.57968G + 2.25440S$$

$$(R^2 = 0.56361, p < 0.0001) \quad (6)$$

壤土堆积体径流率随砾石含量增加而减少,随雨强增加而增加此时径流率变化主要由降雨强度驱动,且砾石含量系数相比雨强系数更大,对径流率变化起主导作用;风沙土堆积体径流率随着砾石含量和雨强增加而增加,且雨强系数相比砾石含量系数更大,对径流率变化起主导作用。壤土堆积体在1.0 mm/min雨强条件下20%砾石含量的径流率较高,10%砾石含量较低。在1.5和2.0 mm/min雨强条件下,20%砾石含量同样较高,30%和10%砾石含量低于0%。

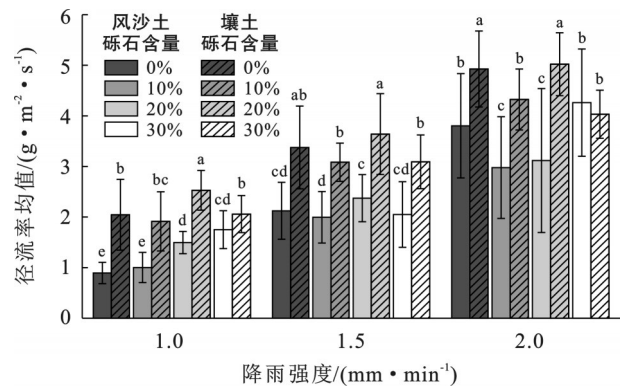
风沙土堆积体在1.0 mm/min雨强条件下30%,20%和10%砾石含量的径流率分别比0%高95.98%,67.43%和12.16%。在1.5 mm/min雨强条件下20%砾石含量的径流率较高,30%和10%砾石含量低于0%。在2.0 mm/min雨强条件下30%砾石含量的径流率较高,20%和10%砾石含量低于0%。高雨强条件下风沙土径流率对砾石含量的反应与壤土相似。在1.0 mm/min雨强条件下,壤土堆积体的径流率比风沙土堆积体分别高129%,91%,68.99%和17.53%(图3)。在1.5 mm/min雨强条件下,壤土堆积体的径流率比风沙土堆积体分别高58.92%,54.52%,53.39%和50.82%。在2.0 mm/min雨强条件下,壤土堆积体的径流率比风沙土堆积体分别高29.54%,45.20%,61.08%,但在30%砾石含量下径流率比风沙土低5.38%。

2.2 径流功率变化特征

2.2.1 壤土径流功率变化特征

①1.0 mm/min雨强条件下,第1场降雨径流功率随砾石含量的变化前3 min迅速增加后出现波动,30 min时堆积体径流功率较低,变化范围0.086~0.230(图4);第2场降雨径流功率前30 min总体呈:

20% > 0% > 30% > 10%;第3场降雨20%,30%堆积体径流功率前10 min增大后出现波动,径流功率较高。②1.5 mm/min雨强条件下,第1场降雨0%堆积体径流功率和变化范围更大,变化范围0.264~0.574;第2场降雨径流功率前5 min迅速递增后出现波动;第3场降雨变化趋势与第2场相似,0%,20%径流功率较高,变化范围0%(0.161~0.440),20%(0.236~0.457)。③2.0 mm/min雨强条件下径流功率前5 min迅速递增后波动,10%,30%径流功率较小。第2场降雨较第1场波动幅度增大,第3场降雨0%径流功率最大,变化范围0.404~0.596。



注:相同降雨强度下不同字母代表不同土壤类型和砾石含量处理之间差异显著($p < 0.05$),相同字母代表差异不显著($p > 0.05$)。下同。

图3 两种土质堆积体在不同雨强和砾石含量下的平均径流率

Fig.3 Average runoff rates of two types of soil deposits under different rainfall intensities and gravel contents

2.2.2 风沙土径流功率变化特征

①1.0 mm/min雨强条件下,第1场降雨径流功率随砾石含量的变化总体为:20% > 30% > 0% > 10%(图5);第2场降雨中波动幅度变小,变化范围0%(0.056~0.101),10%(0.072~0.137),20%(0.095~0.189),30%(0.105~0.216),总体呈:30% > 20% > 10% > 0%;第3场总体30% > 20% > 10% > 0%。②1.5 mm/min雨强条件下,第1场降雨20%砾石含量径流功率较高,变化范围0.088~0.335,第2场降雨30%砾石含量径流功率较高,第3场降雨10%砾石含量径流功率较低。变化范围0%(0.131~0.368),10%(0.101~0.188),20%(0.198~0.323),30%(0.182~0.29)。③2.0 mm/min雨强条件下,第1场降雨变化范围0%(0.136~0.431),10%(0.101~0.35),20%(0.172~0.271),30%(0.035~0.449),第2场降雨20%砾石含量径流功率较低,第3场降雨0%,10%砾石含量径流功率较低,变化范围分别为0%(0.216~0.501),10%(0.234~0.463)。

2.2.3 壤土与风沙土径流功率对比分析

为定量分析砾石含量和雨强对两种堆积体径流功率的影响,解释两者对径流功率变化的驱动机制,并对比两种土质的响应差异,为差异化水土流失防治策略提供理论依据和数据支撑,采用线性回归分析壤土堆积体和风沙土堆积体在不同砾石含量(G)和雨强(S)条件下对径流功率(W)的影响。

对于壤土堆积体回归方程为:

$$W = -0.1191 + 0.16525G + 0.21649S \quad (R^2 = 0.39047, p < 0.0001) \quad (7)$$

对于风沙土堆积体回归方程为:

$$W = -0.04612 - 0.1135G + 0.25877S \quad (R^2 = 0.70511, p < 0.0001) \quad (8)$$

壤土堆积体径流功率随砾石含量和雨强的增加而增加,增加壤土堆积体的砾石含量系数大于风沙土堆积体,径流功率对砾石含量的变化更为敏感,而风沙土

堆积体雨强系数更大,其径流功率对雨强的变化更为敏感。

风沙土堆积体的平均径流功率在 10% 砾石含量下最小,在 30% 砾石含量下最大。壤土堆积体的平均径流功率在 10% 砾石含量下最小。在 1.0 mm/min 雨强条件下 20% 砾石含量的平均径流功率最大。在 1.5 mm/min 和 2.0 mm/min 雨强条件下 0% 砾石含量的平均径流功率最大。壤土堆积体在 1.0 mm/min 雨强条件下,从 0% 到 30% 砾石含量的平均径流功率分别比风沙土堆积体高 55.25%, 73.54%, 50.29% 和 16.08% (图 6)。在 1.5 mm/min 雨强条件下,分别比风沙土堆积体高 73.77%, 97.97%, 61.02% 和 18.84%。在 2.0 mm/min 雨强条件下,0%, 10% 和 20% 砾石含量分别比风沙土堆积体高 36.3%, 44.88% 和 42.83%, 在 30% 含量下平均径流功率与风沙土堆积体大致相同。

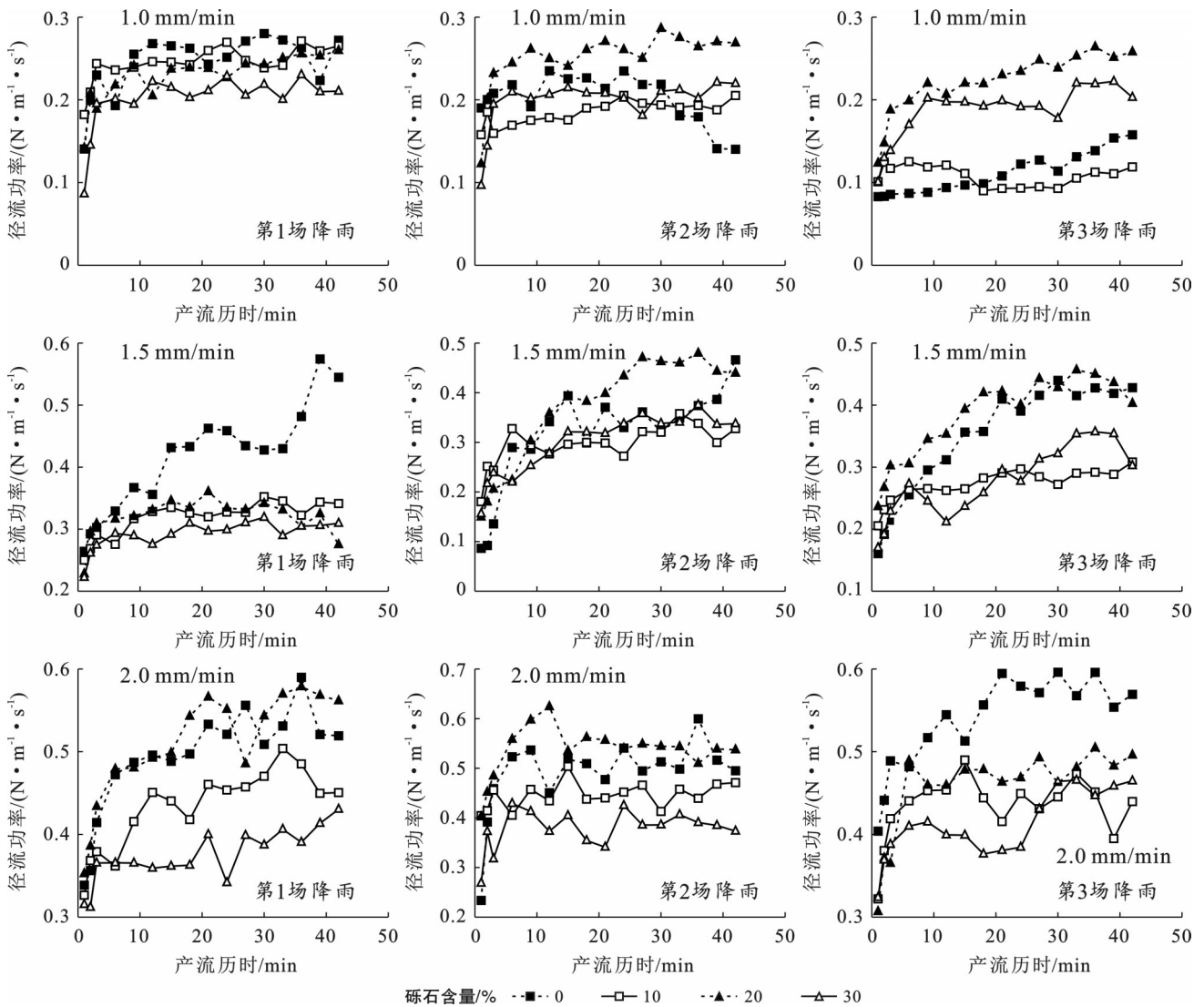


图 4 壤土径流功率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.4 Variation process of runoff power with time, rainfall intensity and gravel content of loamy soil

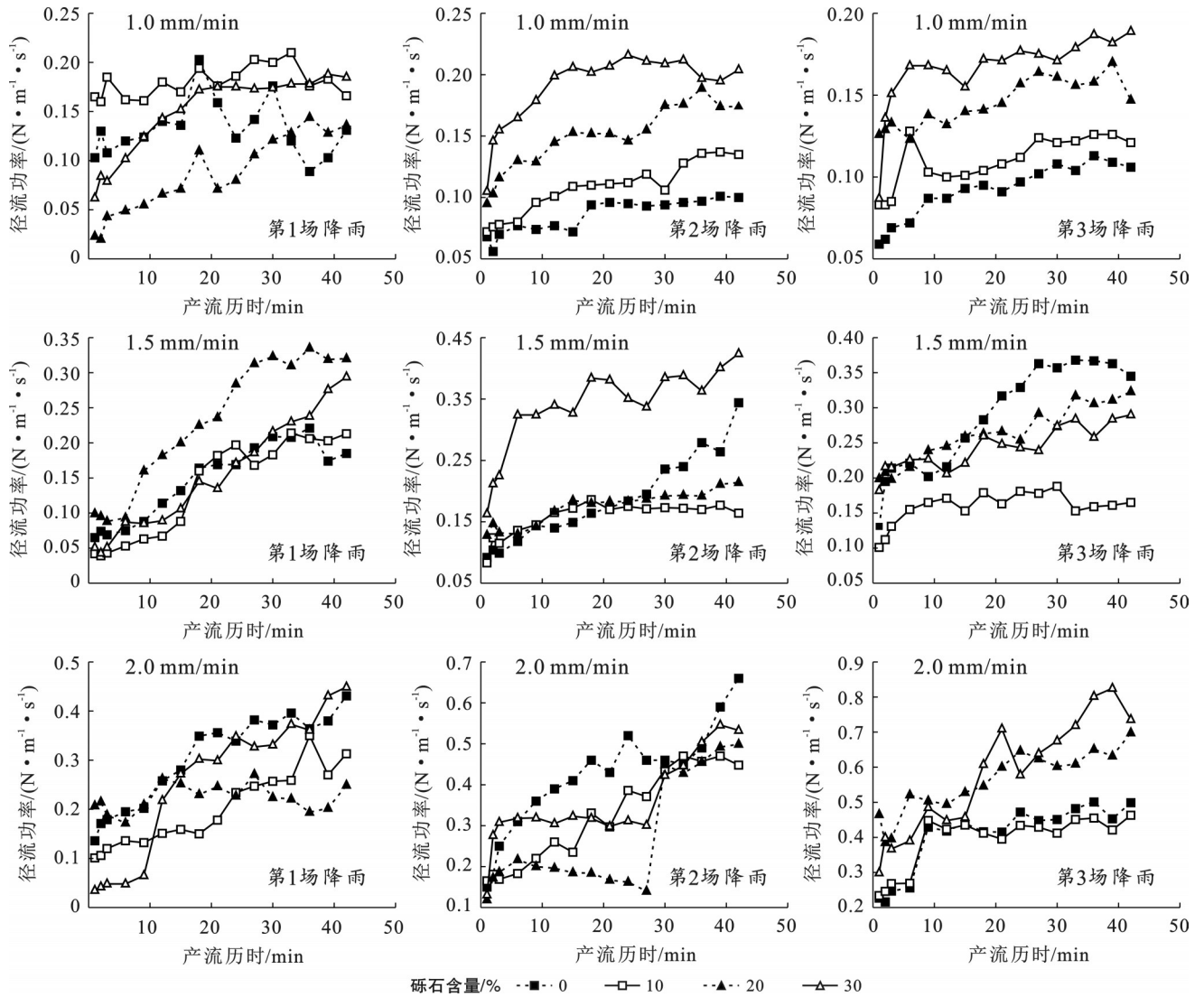


图5 风沙土径流功率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.5 Variation process of runoff power with time, rainfall intensity and gravel content of aeolian sandy soil

2.3 侵蚀速率变化特征

2.3.1 壤土侵蚀速率变化特征

① 1.0 mm/min 雨强条件下, 30%, 20% 砾石含量堆积体侵蚀速率较高。第1场降雨侵蚀速率3 min 达顶峰(图7), 第2, 3场降雨30%, 20% 堆积体侵蚀速率前3 min 迅速增大后出现波动, 10%, 0% 堆积体侵蚀速率稳定。变化范围第2场10% (0.104~0.164), 0% (0.084~0.209)。第3场10% (0.043~0.070), 0% (0.031~0.091)。② 1.5 mm/min 雨强第1场降雨下30% 砾石含量下侵蚀速率和波动幅度最小。第2场降雨中10% 和30% 砾石含量下的侵蚀速率和波动范围较小, 第3场降雨中10% 和30% 砾石含量下的侵蚀速率较低, 变化范围分别为0.333~0.578(10%), 0.174~1.362(30%)。③ 2.0 mm/min 雨强条件下侵蚀速率峰值和变化范围出现增大趋势。第1场降雨30% 砾石含量堆积体侵蚀速率低, 变化范围1.450~3.600, 第2场降雨10%, 30% 堆积

体侵蚀速率较低, 变化范围分别为10% (2.728~4.076), 30% (1.323~3.370)。第3场降雨0% 堆积体侵蚀速率较高, 变化范围为1.097~4.208。

2.3.2 风沙土侵蚀速率变化特征

① 1.0 mm/min 雨强的第1场降雨中侵蚀速率波动较大, 侵蚀速率变化范围分别为0% (0.437~1.180), 10% (0.393~1.026), 20% (0.736~1.710) 和30% (0.515~1.746)(图8)。第2, 3场降雨中侵蚀速率波动较小, 尤其是0% 和10% 砾石含量下。② 1.5 mm/min 雨强条件下0% 砾石含量堆积体的侵蚀速率和波动较高, 变化范围分别为1.465~7.615(第1场), 4.386~6.909(第2场) 和2.089~4.208(第3场)。其他砾石含量侵蚀速率较小, 波动较为平稳。③ 2.0 mm/min 雨强条件下前两场降雨中侵蚀速率波动较大。第3场降雨中平均侵蚀速率较小, 变化范围分别为0% (0.811~5.81), 10% (0.746~5.494), 20% (1.910~5.267) 和30% (0.977~3.548)。

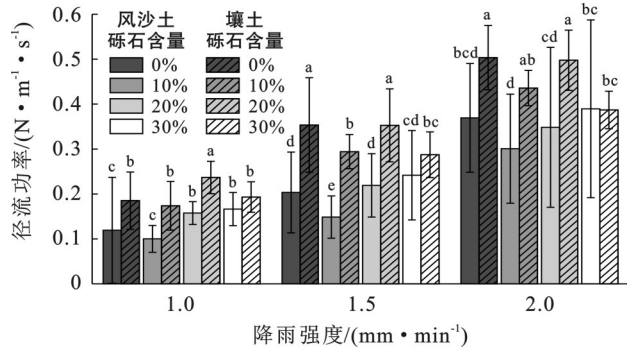


图 6 两种土质在不同雨强和砾石含量下的平均径流功率

Fig.6 Average runoff erosion power of two types of soil deposits under different rainfall intensities and gravel contents

2.3.3 壤土与风沙土侵蚀速率对比

为分析两种堆积体侵蚀速率响应的不同,以及壤土和风沙土堆积体对降雨强度和砾石含量的敏感性差异,采用线性回归分析壤土堆积体和风沙土堆积体在各场次下砾石含量(G)和雨强(S)对侵蚀速率(E)的影响,壤土堆积体回归方程为:

$$E = -1.7507 - 3.0817G + 2.57319S \quad (R^2 = 0.35696, p < 0.0001) \quad (9)$$

风沙土堆积体回归方程为:

$$E = -2.86851 - 3.21705G + 3.92757S \quad (R^2 = 0.53467, p < 0.0001) \quad (10)$$

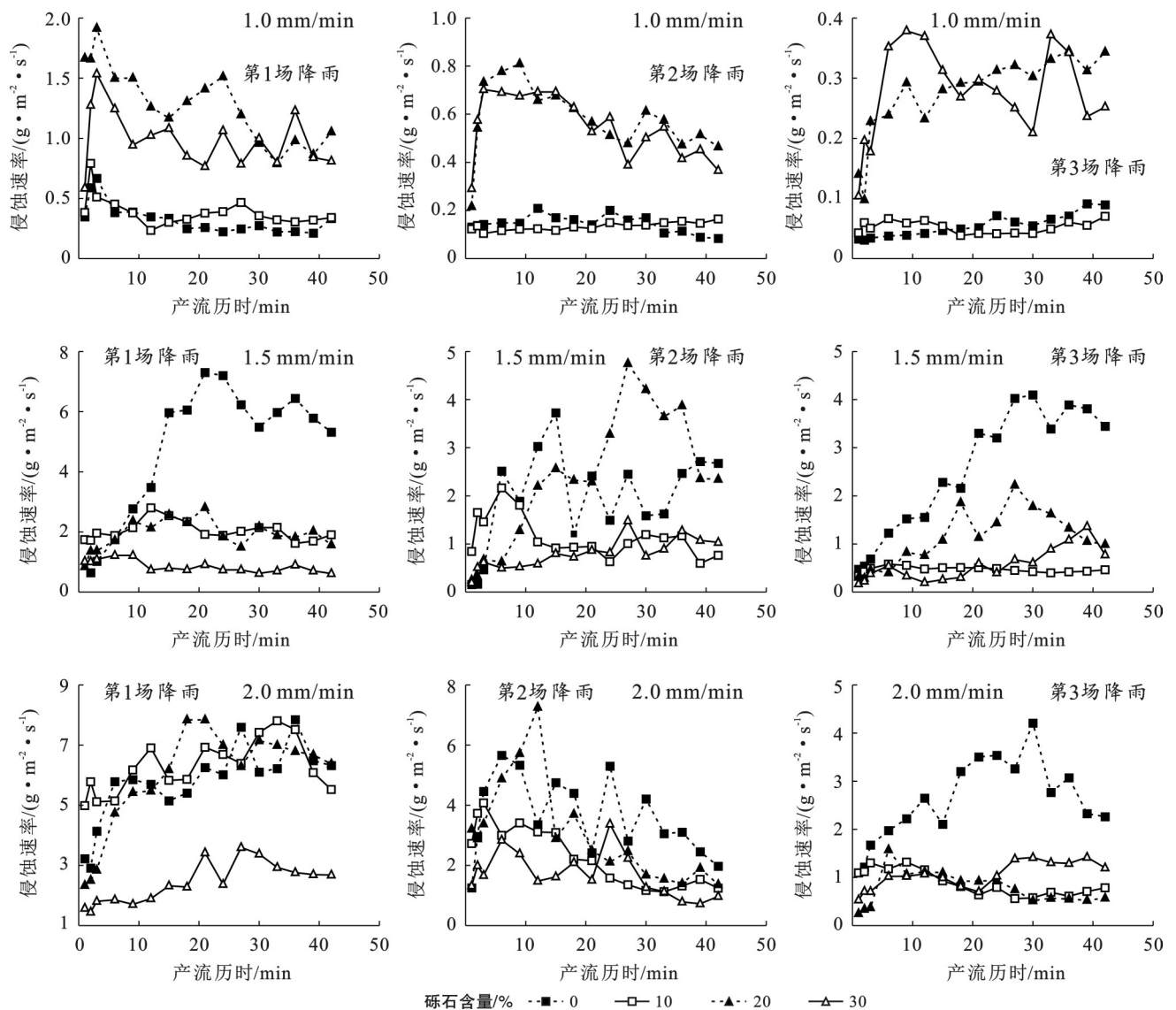


图 7 壤土侵蚀速率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.7 Variation process of soil erosion rate with time, rainfall intensity and gravel content of loamy soil

壤土堆积体和风沙土堆积体侵蚀速率均随砾石含量增加而减小,随雨强增加而增加,风沙土堆积体的雨强系数大于壤土堆积体,其侵蚀速率对雨强的

增加更为敏感,这是由于风沙土本身颗粒松散、凝聚力弱,易被雨水冲刷形成地表径流。较高的渗透性和较低的黏性也导致砾石的存在对土壤结构的改变

较小,使堆积体对砾石含量的敏感性较低。风沙土堆积体在 1.0 mm/min 雨强条件下,10% 砾石含量的平均侵蚀速率低于 0% 含量,20% 和 30% 含量高于 0% 含量。在 1.5 mm/min 雨强条件下,10%,20% 和 30% 砾石含量分别比 0% 含量低 73.1%,56.13% 和 60.9%。在 2.0 mm/min 雨强条件下 10% 和 30% 含量低于 0% 含量。壤土堆积体在 1.0 mm/min 雨强条件下,3 种砾石含量的平均侵蚀速率分别比 0% 含量高 8.74%,304.59% 和 241.4%。1.5 mm/min 雨强

和 2.0 mm/min 雨强条件下 3 种砾石含量均低于 0% 含量。风沙土堆积体的平均侵蚀速率均大于壤土堆积体(图 9)。1.0 mm/min 雨强条件下,从 0% 到 30% 砾石含量的平均侵蚀速率分别比壤土堆积体高 63.9%,55.45%,16.82% 和 16.76%。在 1.5 mm/min 雨强条件下分别比壤土堆积体高 36.04%,3.17%,13.16% 和 59.48%。在 2.0 mm/min 雨强条件下分别比壤土堆积体高出 20.18%,28.42%,39.57% 和 52.81%。

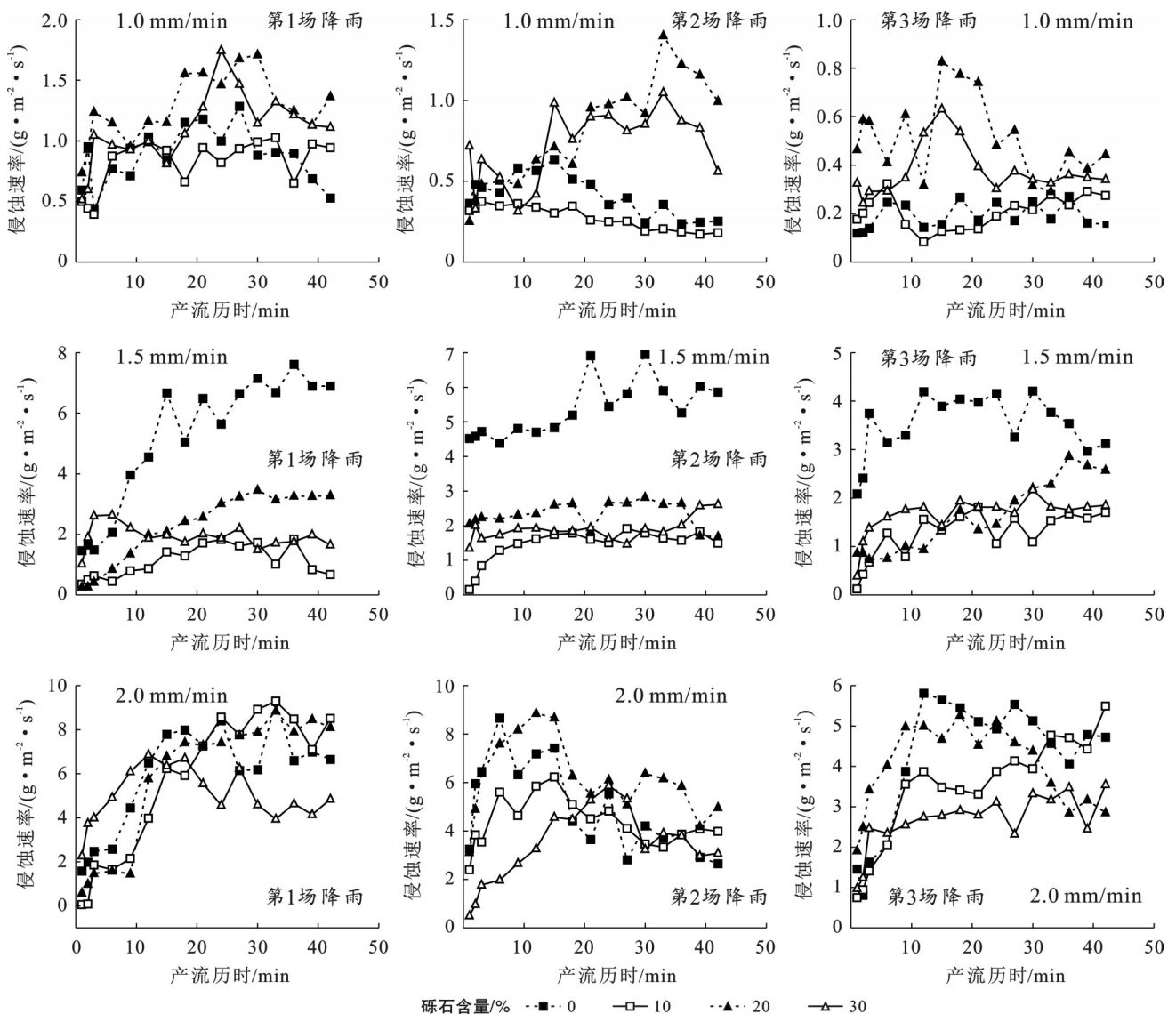


图 8 风沙土侵蚀速率随时间、雨强和砾石含量变化过程

Fig.8 Variation process of soil erosion rate with time, rainfall intensity and gravel content of aeolian sandy soil

2.4 侵蚀速率与径流率和径流功率的响应关系

为定量分析径流率和径流功率对侵蚀速率的影响,使用线性回归分析壤土堆积体和风沙土堆积体侵蚀速率(E)对径流率(Q)和径流功率(W)的响应关系。

对于壤土堆积体,回归方程为:

$$E = -1.19636 + 0.8513Q \quad (R^2 = 0.3044, p < 0.0001) \quad (11)$$

$$E = 1.10629 + 2.3458W \quad (R^2 = 0.57196, p < 0.0001) \quad (12)$$

对于风沙土堆积体,回归方程为:

$$E=0.38271+0.92955Q$$

$$(R^2=0.26543, p<0.0001) \quad (13)$$

$$E=-1.97173+13.8798W$$

$$(R^2=0.61283, p<0.0001) \quad (14)$$

两种土质堆积体的侵蚀速率均随径流功率增加而上升,但风沙土的径流功率系数远大于壤土,并且其径流功率对侵蚀速率的解释力也更高($R^2=0.61283$),说明风沙土堆积体的侵蚀速率对径流功率的变化更为敏感,径流功率的增加会导致其侵蚀速率大幅上升。虽然两种土质堆积体的侵蚀速率均与径流率呈正相关关系,但模型解释力较低(壤土: $R^2=0.30440$;风沙土: $R^2=0.26543$),只依靠径流率这一参数无法充分解释侵蚀速率的复杂动态,还需结合其他水动力参数(如径流功率)综合分析。

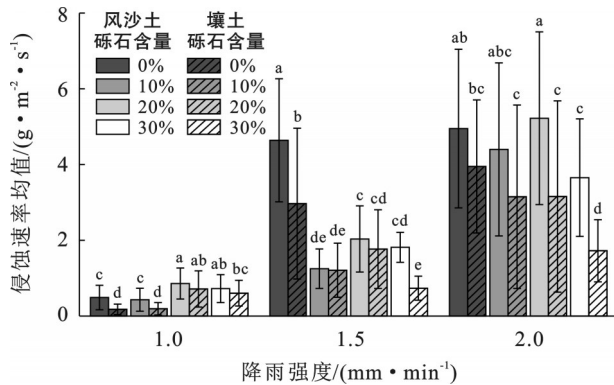


图9 两种土质堆积体在不同雨强和砾石含量下的平均侵蚀速率

Fig.9 Average erosion rates of two types of soil deposits under different rainfall intensities and gravel contents

3 讨论

3.1 壤土和风沙土堆积体径流率对雨强和砾石含量的响应

1.0 mm/min 雨强条件下,砾石含量的增加对壤土堆积体径流率的影响较为有限(图3),随着雨强提升至1.5和2.0 mm/min,20%砾石含量下的径流率显著高于0%和10%砾石含量的处理组,这是因为砾石减少了土壤孔隙的连续性,从而增强了表面径流的汇集效应^[6]。30%砾石含量的径流率在各雨强条件下均低于0%处理组,径流减弱与高砾石含量导致径流深增加、径流路径延长有关^[8]。2.0 mm/min 雨强时,30%砾石含量下风沙土堆积体的径流率增幅变大且高于壤土堆积体,这与康宏亮等^[20]的研究结果一致,这是由于在高雨强和高砾石含量条件下风沙土的水分入渗能力显著降低,从而导致径流率增大。本试验中砾石含量对径流率的影响呈现双重作

用:一方面通过改变土壤结构促进水分渗透,另一方面通过调整地表形态抑制渗透过程。李建明等^[21]研究指出混合砾石破坏了原有结构,提高孔隙率和渗透性,进而减少地表径流量,然而根据史倩华等^[22]研究,砾石的加入会提高坡面粗糙度,造成径流路径的曲折和延伸,反而抑制水分渗透并增加地表径流。以上两种效应(渗透增强与径流路径阻力增加)共同作用可能是导致径流率随着砾石含量增加呈现出下降和上升趋势的关键因素。两种堆积体的产流特性差异体现在各雨强条件下壤土堆积体的径流率普遍高于风沙土堆积体,在1.0 mm/min 雨强条件下远高于风沙土,是由于壤土的团粒结构较为紧密,黏粒含量高,在较低雨强条件下水分下渗能力较弱使径流量显著增加,而在2.0 mm/min 雨强条件下虽然壤土的径流率仍保持较高水平但增幅较小。尤其是在30%砾石含量条件下甚至低于风沙土堆积体。这是由于其黏结性强和良好的结构特性使得土壤径流更容易达到稳定状态^[23],而风沙土结构疏松、孔隙大,结构稳定性受砾石存在的影响较大,在高降雨强度条件下更易形成快速汇流通道,导致径流率大幅增加^[15]。壤土堆积体径流率随砾石含量增加而减少、随雨强增加而增加,反映了壤土本身较强的渗透性和更好的孔隙结构,砾石含量增加时可以增加大孔隙的数量和连通性,相较之下风沙土堆积体颗粒松散,孔隙结构单一,砾石的加入阻碍了水分在孔隙中的渗透,表现出径流率随砾石含量和雨强增加而增加的趋势,与王雪松等^[24]研究结果一致。

3.2 壤土和风沙土堆积体径流功率对雨强和砾石含量的响应对比

较低雨强(1.0和1.5 mm/min)条件下,风沙土堆积体的径流功率低于壤土堆积体,然而随着降雨强度和砾石含量增加,风沙土堆积体的产流不稳定性显著增加,导致其径流功率快速上升,达到与壤土堆积体相同水平(图6)。在高雨强(2.0 mm/min)和高砾石含量(30%)条件下风沙土堆积体相比壤土堆积体更高的径流功率增长速度,意味着在相同条件下风沙土堆积体可能形成更大的水流能量,进而导致更严重的土壤侵蚀,这主要源于风沙土颗粒分选性差、黏粒含量低的结构特征,在高雨强条件下难以维持稳定结构,同时高砾石含量形成的骨架结构加速了径流路径的贯通。而壤土堆积体在中低雨强表现出的更高径流功率与其较高的黏结性和低渗透性有关,壤土中的黏性颗粒遇水形成水稳性团聚体,增加了土壤结构的稳定性和抗剪强度^[25]使其径流参数的响应呈渐进式变化。壤土堆积体在第1场降雨中,径

流功率随砾石含量增加而减少,而随雨强增加而增加。然而在后续降雨中径流功率呈现出随砾石含量和雨强同时增加的趋势,这与王永武等^[26]的研究结果一致。砾石含量的增加会提升坡面粗糙度,通过影响径流的动力特性降低径流速度^[14],而在连续降雨后土壤逐渐趋于饱和,细小颗粒物质被冲走或填充到砾石之间的空隙中,进一步减少了砾石间的储水空间,从而促进径流的形成。风沙土堆积体径流功率随砾石含量增加而减小,随雨强增加而增加。雨水冲刷和径流搬运导致砾石大面积裸露,直接限制了侵蚀沟的形成和发展,同时砾石形成径流障碍,通过减缓径流速度降低了径流功率,这一现象与陈卓鑫等人研究中的现象相吻合^[14]。此外,郭培龙等^[27]研究发现,由于堆积体质地分布不均,坡面细颗粒大量流失后砾石之间形成了较多缝隙,使得部分坡面流顺缝隙进入堆积体内部形成“潜流”,导致了坡面径流减弱和径流功率的降低,故堆积体结构的异质性也对径流功率具有显著影响。

3.3 壤土和风沙土堆积体侵蚀速率对雨强和砾石含量的响应对比

土壤表面和内部的砾石通过改变土壤的物理特性对水文过程产生影响,进而影响土壤侵蚀。已有研究显示在工程堆积体中砾石对土壤产沙的影响存在差异,砾石可能增加坡面土壤的侵蚀量^[26],也可能减缓土壤侵蚀的速度^[19],且砾石对土壤侵蚀量的影响在随降雨强度变化^[28]。在本试验中壤土和风沙土堆积体侵蚀速率随着雨强增加上升,随砾石含量增加下降〔公式(9)–(10)〕。砾石在堆积体中主要通过影响坡面产流时间、产流速率以及砾石的覆盖程度,共同作用来减少土壤侵蚀^[19]。两种土质堆积体的侵蚀特性对雨强和砾石含量的响应差异体现在:高雨强条件下,壤土堆积体侵蚀速率较高,主要因雨强增加土壤湿润速度加快和表层快速饱和。高雨强条件下土壤崩解作用加剧,土壤团聚体破碎,细小颗粒随下渗径流堵塞土壤孔隙,减缓了渗透速率的增加^[29],细颗粒含量和结构变化将显著影响堆积体内部稳定性,加剧内部侵蚀^[30];相对而言,风沙土堆积体在低雨强条件下就表现出较高的侵蚀速率,主要是因为其结构松散,在雨滴击溅下易形成细沟侵蚀,使侵蚀速率迅速增大^[15,31],而随雨强增加雨滴动能增强,对土壤结构的破坏叠加径流冲刷作用使侵蚀速率进一步激增。此外,风沙土堆积体的侵蚀速率在高砾石含量下波动增强与砾石增加导致的土壤结构异质性相关,即砾石阻碍径流均匀分布加剧局部冲刷,表土更易失稳^[32]。

壤土和风沙土堆积体均表现出随砾石含量增加侵蚀速率减小的趋势,和王雪松等^[24]研究结果一致。在30%砾石含量下细沟内砾石较多可移动土壤颗粒较少,使侵蚀速率保持相对稳定且较其他砾石含量下更小,和康宏亮等^[20]研究结果相吻合。

3.4 侵蚀速率对径流率和径流功率的响应

对比两种堆积体的回归结果〔公式(11)–(14)〕,可以发现风沙土堆积体的侵蚀速率对径流率和径流功率的响应都更为敏感。在相同的径流率或径流功率变化下,风沙土的侵蚀速率变化幅度都更大。这与风沙土本身的物理特性有关,其颗粒分选性差、黏粒含量低,在高径流率和径流功率条件下,水流的冲刷更容易破坏土壤结构^[15],导致大量土壤颗粒被侵蚀和搬运,进一步印证了风沙土堆积体的侵蚀速率普遍高于壤土堆积体的现象。结合两种堆积体的径流率和径流功率变化特征,在低雨强条件下,风沙土堆积体的径流率和径流功率低于壤土堆积体,此时其侵蚀速率也相对较低;然而,随着雨强增大,风沙土堆积体的径流率和径流功率迅速上升,在高雨强和高砾石含量条件下甚至超过壤土堆积体,相应的侵蚀速率也随之大幅增加,可能引发更严重的土壤侵蚀。同时风沙土堆积体的侵蚀速率与径流功率的线性回归解释力($R^2=0.61283$)以及径流功率系数(13.8798)明显更高,远超过壤土堆积体,说明径流功率是风沙土堆积体发生侵蚀的更为主要的驱动力。而壤土中更多的黏粒形成的团聚体可以更好地抵抗水流剪切力^[21],相比风沙土堆积体,径流率的长时间冲刷作用对侵蚀速率的影响更大。而径流率在两种土质堆积体中的回归模型解释力较低(R^2 为0.26~0.30)。这是由于侵蚀速率不仅取决于径流率,还受径流功率、土壤抗剪强度及砾石分布等因素共同影响^[33-34]。其他核心驱动力的存在导致径流率一项数据的解释力受限。此外径流率与侵蚀速率的关系呈现出的阈值效应也会导致线性模型无法解释此类非线性变化。例如径流流态变为紊流时导致产沙速率的变化^[35]。后续应该增加试验场次,同时加强对水动力学参数的整合研究,以更全面地验证对比径流率等参数和侵蚀速率的响应关系。

4 结论

(1) 两种堆积体径流率在3个降雨场次下呈现为“先递增后波动”的趋势。风沙土堆积体在较低雨强(1.0和1.5 mm/min)条件下的径流率和径流功率低于壤土堆积体,而雨强增大之后风沙土难以维持稳定结构,加之高砾石含量对径流路径的贯通,在高

雨强(2.0 mm/min)和高砾石含量(30%)下其径流率和径流功率快速上升至与壤土堆积体相当或更高。相比壤土堆积体,风沙土堆积体在高雨强高砾石含量下径流率和径流功率的增速更大,进而可能发生更严重的土壤侵蚀。

(2) 风沙土堆积体在10%砾石含量条件下径流功率较纯土降幅达16.09%~26.92%,而壤土堆积体在30%砾石含量时径流功率达到18.71%~23.13%的降幅,但1.0 mm/min雨强条件下砾石含量增加对径流功率的减弱不明显。

(3) 两种堆积体的侵蚀速率均随雨强增加而上升,随砾石含量增加而降低,风沙土堆积体的侵蚀速率普遍高于壤土堆积体。风沙土堆积体在1.0和1.5 mm/min雨强条件下,10%砾石含量时侵蚀速率相比纯土降幅最大,在2.0 mm/min雨强条件下,30%砾石含量时降幅最大。壤土堆积体在1.5和2.0 mm/min雨强条件下30%砾石含量时侵蚀速率降幅最大。

参考文献 (References)

- [1] 康玲玲,程复,王云璋.我国近17年生产建设项目的变化情况[J].中国水土保持,2019(3):1-3.
Kang Lingling, Cheng Fu, Wang Yunzhang. The variation of production and construction projects in nearly 17 years in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(3):1-3.
- [2] 沙小燕.黄土高原沟壑区不同植被类型沟头土体抗冲性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
Sha Xiaoyan. Study on soil anti-scourability of gully head with different vegetation types in the gully region of the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [3] 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.
- [4] Dai Zhangjun, Huang Kang, Jiang Lingfa, et al. Shear strength characteristics of clay-gravel layer and its slope failure law and mechanism [J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10: 865697.
- [5] 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.
Yang Miaomiao, Yang Qinke, Zhang Keli, et al. Effects of content of soil rock fragments on calculating of soil erodibility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (5) : 1157-1168.
- [6] 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. Runoff and sediment yielding characteristics of slopes of stacks of gravels containing aeolian sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(4):847-859.
- [7] 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 Ming'an, 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.
- [8] Dadkhah M, Gifford G F. Influence of vegetation, rock cover, and trampling on infiltration rates and sediment production [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1980,16(6):979-986.
- [9] Ma Yan, Wang Youqi, Zhang Yuhan, et al. Effects of gravel on the water infiltration process and hydraulic parameters of stony soil in the eastern foothills of Helan Mountain, China [J]. Scientific Reports, 2024,14:16426.
- [10] 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 Xiaoyan, Li Zhaoxia, Xu Qinxue, 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.
- [11] 王雪松,谢永生,陈曦,等.模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J].泥沙研究,2015,40(4):74-80.
Wang Xuesong, Xie Yongsheng, Chen Xi, et al. Study on runoff and sediment yield of a spoil pile under simulated rainfall condition [J]. Journal of Sediment Research, 2015,40(4):74-80.
- [12] 张文博,吕俊容,谢永生,等.不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J].水土保持学报,2020,34(3):49-54.
Zhang Wenbo, Lü Jiaorong, Xie Yongsheng, et al. Comparative study on runoff and sediment yielding in different morphological engineering accumulations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3) : 49-54.
- [13] Shen Haoming, Zhu Zhehao, Chen Yuyang, et al. Influence of gravel coverage on hydraulic characteristics and sediment transport capacity of runoff on steep slopes [J]. Water, 2025,17(3):361.
- [14] 王雪松,谢永生,景民晓,等.不同砾石类型对工程堆积体侵蚀规律的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):21-25.
Wang Xuesong, Xie Yongsheng, Jing Minxiao, et al. Effect of the different kinds of gravels on soil erosion of spoilbank [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(5):21-25.

- [15] 陈卓,高照良,李永红,等.2种扰动土壤工程堆积体坡面泥沙运移特征对比研究[J].水土保持学报,2020,34(1):34-40.
Chen Zhuo, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Comparative study of sediment particle transport on slopes of two disturbed soil engineering accumulations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(1):34-40.
- [16] 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(4):2089-2102.
- [17] 王文龙,李建明,康宏亮,等.生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型构建[J].水土保持学报,2023,37(3):27-34.
Wang Wenlong, Li Jianming, Kang Hongliang, et al. Soil erosion prediction model for spoil heaps in production and construction projects [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):27-34.
- [18] 徐向舟,刘大庆,张红武,等.室内人工模拟降雨试验研究[J].北京林业大学学报,2006,28(5):52-58.
Xu Xiangzhou, Liu Daqing, Zhang Hongwu, et al. Laboratory rainfall simulation with controlled rainfall intensity and drainage [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006,28(5):52-58.
- [19] 李瑞栋,王文龙,娄义宝,等.模拟降雨条件下砾石含量对壤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.
- [20] 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.
Kang Hongliang, Wang Wenlong, Xue Zhide, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3):125-134.
- [21] 李建明,王文龙,黄鹏飞,等.黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响[J].泥沙研究,2014,39(4):10-17.
Li Jianming, Wang Wenlong, Huang Pengfei, et al. Impact on erosion and sediment yield by gravel in pile body of development construction in loess area [J]. Journal of Sediment Research, 2014,39(4):10-17.
- [22] 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.
- [23] 钟莉娜,王军,赵文武.多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2017,72(3):432-443.
Zhong Lina, Wang Jun, Zhao Wenwu. Comparative analysis of the effect of rainfall pattern and land use pattern on soil erosion in different-scale watersheds: A case study in hilly and gully area of the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(3):432-443.
- [24] 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,2015,40(1):67-74.
Wang Xuesong, Xie Yongsheng, Chen Xi, et al. Effects of rock fragment on soil erosion rule of engineering pyramidal accumulation in northern Jiangxi [J]. Journal of Sediment Research, 2015,40(1):67-74.
- [25] 孟生勇,江兴元,杨义,等.降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):104-112.
Meng Shengyong, Jiang Xingyuan, Yang Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023,50(1):104-112.
- [26] 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.
- [27] 郭培龙,王文龙,李建明,等.关中壤土工程堆积体坡面径流和产沙对坡长及砾石含量的响应[J].应用生态学报,2024,35(3):749-758.
Guo Peilong, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. Responses of runoff and sediment yield to slope length and gravel content of Lou soil engineering accumulation slope in Guanzhong region, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(3):749-758.
- [28] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
Xiao Jibing, Sun Zhanxiang, Liu Zhi, et al. Effects of rainfall erosion factor, vegetation type and coverage on soil erosion of sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22):159-166.