

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.02.006

连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀

吕佼容^{1,2}, 张文博³, 胡锦涛^{1,2}, 骆汉³, 谢永生³

(1. 中国科学院水利部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探究砾石对工程堆积体土壤侵蚀的影响与其作用机制, 通过室内模拟降雨研究了连续降雨下不同砾石含量的重壤质堆积体水蚀过程。结果表明: ① 堆积体砾石含量增加, 坡面产流历时延长, 产流率线性减小, 土壤剥蚀率降低; ② 连续降雨下, 堆积体所含砾石主要通过对坡面产流历时、坡面产流率、砾石覆盖率的多重影响发挥减沙作用, 主成分回归方程可表达多个变量与平均土壤剥蚀率的关系; ③ 一定砾石含量下, 堆积体坡面砾石覆盖率随表土的剥离而增大, 导致土壤剥蚀率呈指数函数递减趋势, 并与累积土壤侵蚀总量存在较好的函数关系。工程堆积体所含砾石对土壤侵蚀程度的削减可为生产建设项目下垫面水土保持治理提供重要参考。

关键词: 工程堆积体; 砾石含量; 砾石覆盖率; 连续降雨; 主成分回归

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2019)02-0210-10

工程堆积体是在生产建设项目实施过程中人为扰动地表形成的特殊地貌单元, 是人为加速侵蚀的最主要来源。工程堆积体一般以土石混合体的形式存在于各类施工区内^[1-2], 砾石是影响其坡面侵蚀产沙过程的重要因素。

砾石通过对土壤水文过程(降雨分配)、土壤物理性质(抗蚀性、孔隙)和地貌形态的影响对土壤侵蚀过程发挥重要作用^[3-7]。Chow 和 Rees^[8]研究表明砾石含量与产流率和土壤侵蚀量均呈负相关关系, 坡面径流是土壤侵蚀的动力, 砾石可通过影响土壤水入渗而决定坡面产流量大小^[9-11]。Zhou 等^[12]和王小燕等^[13]研究表明, 土体中砾石一方面增加了非毛管孔隙比例有利于水流入渗, 另一方面又阻断了通道连续性, 增加流路弯曲度, 阻滞水流入渗, 复杂的影响机制使砾石对土壤入渗和产流的影响因下垫面条件而异^[14]。Zhou 等^[15]发现黄土饱和导水率在 40% 砾石含量处有最小值, 而 Shi 等^[16]则发现黄土高原林地土壤稳定入渗率在 15% 砾石含量处有最大值。砾石出露于地表改变了地表粗糙度、表土结构稳定性, 必然对土壤侵蚀产生重要影响^[3, 7]。降雨期间, 砾石覆盖有助于减少土壤雨滴打击和径流冲刷, Wang 等^[7]、王小燕等^[13]、Abrahams 等^[17]和 Zavala 等^[18]均表明土壤侵蚀量与砾石覆盖面积呈负相关关系。当前关于含砾石土壤坡面产流产沙的研究已取得较丰富成果, 而有关含砾石工程堆积体水蚀过程的研究相对较少。康宏亮等^[1]、史倩华等^[19]、李建明等^[20]对工程堆积体产流产沙特征的研究中, 均发现雨强大于 1 mm/min 时堆积体所含砾石有减沙效益, 但对产流量的影响在不同试验中有不同结果: 风沙土^[1]和红壤堆积体^[19]产流量随砾石增加先减小后增大, 在 10% 砾石含量处有最小值, 而壤土堆积体^[20]中砾石对产流率影响较小; 王雪松等^[21]对红壤堆积体的研究也发现砾石含量增加对产流量影响不显著, 但对坡面产沙有促进作用。不同含量的砾石对不同类型和试验条件下工程堆积体土壤侵蚀的影响存在差异, 且以往研究中主要展示了砾石对产流产沙的作用结果, 而其

收稿日期: 2018-06-26; 网络出版日期: 2019-02-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20190222.0824.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601300); “西部之光”西部青年学者 B 类资助项目(XAB2015B06)

作者简介: 吕佼容(1994—), 女, 四川乐山人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面研究。

E-mail: lvjiaorong222@163.com

通信作者: 骆汉, E-mail: hanl@ms.iswc.ac.cn

影响机制却鲜少明确阐述,加之堆积体结构松散、坡度较陡的特征导致砾石影响更加复杂,砾石对工程堆积体土壤侵蚀的影响机制需进一步探究。山区工程开挖方形成的堆积体往往含大量碎石,现有研究成果砾石含量集中在0~30%,对大砾石含量的情况难以适用。同时,随侵蚀过程变化的砾石覆盖率不仅是影响土壤侵蚀的重要因素,也是野外确定堆积体侵蚀量的参照,反映出已发生侵蚀量的大小,目前该领域尚未有研究涉及。

本文采用室内人工模拟降雨试验,探究连续降雨下不同砾石含量对工程堆积体土壤侵蚀的影响及其调控机制,为明晰砾石在工程堆积体水文和土壤侵蚀过程中的作用、准确测算生产建设项目水土流失提供参考。

1 材料与方方法

1.1 试验装置与材料

试验在中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅下喷区进行,降雨高度18 m,能够模拟雨滴降落地表的终点速度,雨强可调节范围为30~350 mm/h,降雨均匀度可达80%以上。模拟工程堆积体堆置于一个坡度可调的矩形钢槽内(长3.5 m,宽1 m,深0.5 m),根据野外自然堆积体休止角将钢槽坡度设置为33°^[22]。试验所用土壤为取自陕西杨凌的重质土壤,按国际质地划分为粉砂质黏土质地,其机械组成见表1。装槽前通过洒水或阴干的方式控制土壤含水量在15%左右。试验所用砾石为取自陕西省周至县境内采石场的硅质石灰岩,为常见建筑用石,直径为1~4 cm,呈不规则多面体形状,透水性小。

表1 供试土壤机械组成及有机质含量

Table 1 Mechanical composition and organic matter content of the tested soil

粒径	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.10 mm	0.10~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.01 mm	有机质
质量百分数/%	1.82	0.41	9.78	1.23	21.38	65.38	0.88

1.2 试验方法

将控制好含水量的土壤与砾石按照设计的质量比均匀混合,采用分层装填的方式填土,先在钢槽底部装填10 cm厚的石英砂,模拟土壤水自然下渗环境。设计装土厚度为40 cm,采用传送带将混合好的试验材料送至试验钢槽上方自由落下,模拟自然堆积体过程。下层10 cm夯实,土壤容重为1.5 g/cm³左右,并对表面进行打磨处理防止土体滑塌;上层30 cm不压实,表面刮平,容重为1.1~1.2 g/cm³。装填完成后静置24 h使槽内土石体自然沉降。

根据研究区气象资料选取最具代表性暴雨雨强1.5 mm/min作为本试验控制雨强^[23]。结合野外调查结果设计0、20%、40%、60%等4个砾石含量(质量百分数),每个处理连续降雨3场,每场降雨间隔24 h,重复试验3次。

在降雨前先将装填好的钢槽用防水布遮盖,将雨强调节到1.5 mm/min并采用梅花桩法进行率定,确保误差不超过5%。雨强达到要求后迅速去掉防水布,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,记下产流时间并重置计时器进入观测时段。每场降雨观测时段持续45 min。产流后前3 min每分钟接一次泥沙样,之后每隔3 min接一次,试验结束后将泥沙样烘干(105℃)至恒重。距坡顶0.25~3.25 m处从上至下设置3个1 m长的观测坡段,每次降雨开始前和结束后都对3个坡段分别拍照,经过图像处理得到砾石覆盖率,取其均值作为坡面的砾石覆盖率。一次降雨结束后,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3场降雨数据处理用Microsoft Excel软件,参数检验、分析用IBM SPSS 23软件,图片处理用Photoshop软件,图片中砾石所占像素与全图总像素的百分比为砾石覆盖率,绘图用Origin 9.0软件。

2 结果与分析

2.1 砾石覆盖率

降雨前 20%、40%、60% 砾石含量下堆积体坡面砾石覆盖率(C) 分别为 4.0%、12.6%、41.1%，3 场降雨后 C 分别增加至 16.0%、26.9%、81.6%。从图 1(a) 来看，随着砾石含量的增加， C 增大。同体积的土石混合堆积体，砾石含量增加的同时土壤在减少，所以砾石含量越多， C 的增加效应越明显，可解释砾石含量从 40% 增加至 60% 时， C 增幅最大，约为砾石含量 0~20%、20%~40% 时 C 增幅的 3 倍。一定砾石含量下，随着降雨的进行表土被剥离，坡面砾石出露面积逐渐增大。图 1(b) 显示随着累积降雨量的增加， C 呈“快速增加—缓慢上升”的变化过程，增长速率在第一场降雨期间最快，后两场降雨增长速率降低，表明土壤侵蚀主要发生在第一场降雨，后续侵蚀量减小，从而新增 C 较小。

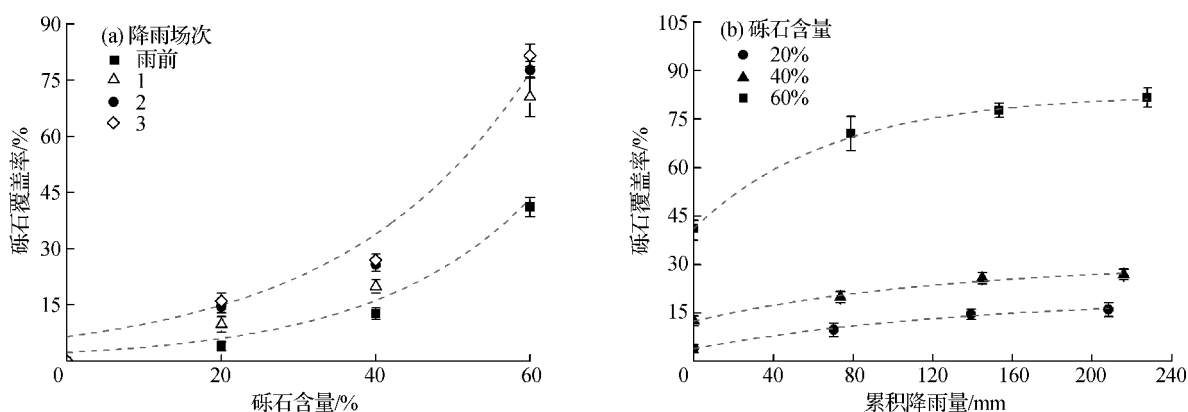


图1 砾石覆盖率(C) 随砾石含量和累积降雨量的变化

Fig. 1 Variation of C with rock fragment content and accumulated rainfall

2.2 产流历时

产流历时(T_0) 指坡面开始接受降雨至坡面形成薄层水流且自小区出口流出的时间，是下垫面差异性的综合反映，影响因素有土壤特性、地面坡度和地表覆盖等^[24]。初始阶段降雨全部入渗，坡面无径流产生；当土壤入渗能力小于雨强时，超渗部分降雨即形成坡面积水，坡面积水再汇聚向坡面低处流动形成坡面漫流。工程堆积体中砾石改变了土壤孔隙状况和表土微地貌特征，进而影响坡面产流过程。图 2 为各降雨场次下 T_0 随砾石含量的变化，从图 2 可以看出，同一砾石含量下第 1 场降雨 T_0 显著大于后两场降雨，后两场降雨 T_0 之间相差甚微，分别比第 1 场降雨缩短了 25.0%~45.3%、29.5%~46.7%。 T_0 分别与土壤初始含水量(W) 和中值砾石覆盖率(C_{mid} ，降雨始末砾石覆盖率中值) 的偏相关分析结果(表 2) 表明，各砾石含量下 T_0 呈显著的负相关关系，偏相关系数为 -0.980~-0.776，是导致 T_0 差异的主要因素， C_{mid} 与 T_0 基本无显著的相关性。第 1 场降雨初期， W 较小，为 14.2%~15.7%(表 3)，初期雨滴浸润土壤，入渗率较大，产流历时延长；第 2 场、第 3 场降雨 W 为 24.1%~26.0%，接近土壤饱和含水量，导致土壤入渗能力降低，坡面产流历时明显缩短。

同一降雨场次下， T_0 随着砾石含量的增加而延长。当第 1 场降雨初期土壤含水量较低时，雨滴直接打击易使土表形成暂时性结皮阻止入渗^[21]，此时砾石与表土的周边接触^[25] 可形成入渗点，所以当砾石含量增加，土表入渗点越多，相应地 T_0 越大；后两场降雨初期表土初始含水量均较高，但随着砾石含量增加，砾石出露面积越大，凹凸起伏的表面有利于洼地蓄水，使水头抬升促进降雨入渗；同时，土体内砾石含量越

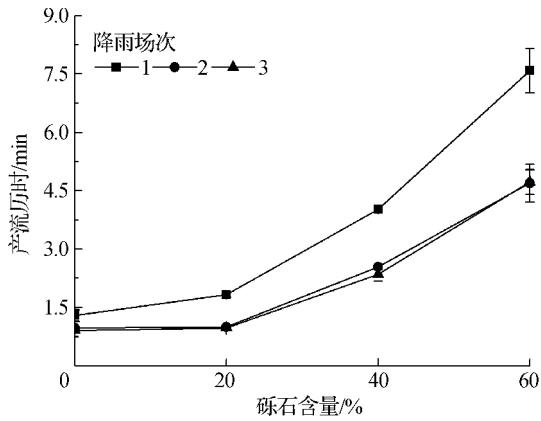


图 2 产流历时 (T_0) 随砾石含量的变化

Fig. 2 Variation of T_0 with rock fragment content

表 2 各砾石含量下产流历时 (T_0) 与土壤初始含水量 (W) 和中值砾石覆盖率 (C_{mid}) 的偏相关系数

Table 2 Partial correlation coefficient of T_0 and W and C_{mid} under each content

砾石含量	偏相关系数 / %	
	W	C_{mid}
0	-0.776*	-
20%	-0.980**	-0.711*
40%	-0.845**	-0.031 ns
60%	-0.965**	0.604 ns

注: ** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾)相关性显著; ns 相关性不显著。

多, 土壤中大孔隙数量越多, 入渗速率越快, 越不容易产生超渗产流, 多重作用导致 T_0 随着砾石含量的增加而延长。对 3 个降雨场次下 T_0 与砾石含量 (R_c) 作回归分析, 结果显示 3 种砾石含量下 T_0 与 R_c 均呈显著的幂函数关系: $T_0 = BR_c^\alpha$ ($B = 1.162 \sim 0.745$, $\alpha = 0.031 \sim 0.029$, $n = 12$), $P < 0.01$, $R^2 = 0.893 \sim 0.967$ 。 T_0 的差异还导致试验中各处理堆积体坡面累积降雨量 (I_c) 不同(表 3), T_0 越大, I_c 增加。

表 3 不同砾石含量下堆积体初始含水量、累积降雨量和稳定入渗率

Table 3 Initial soil water content, accumulated rainfall and final infiltration rate under different treatments

砾石含量 R_c / %	降雨场次	土壤初始含水量 W / %	累积降雨量 I_c / mm	稳定入渗率 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
纯土	1	15.7	69.4	0.067
	2	25.1	138.4	0.058
	3	26.0	207.3	0.055
20	1	14.6	70.2	0.148
	2	24.1	139.2	0.157
	3	25.2	208.2	0.150
40	1	15.1	73.5	0.160
	2	25.7	144.8	0.173
	3	26.0	215.9	0.171
60	1	14.2	78.9	0.307
	2	24.4	153.4	0.334
	3	25.0	227.7	0.329

2.3 入渗和产流特征

产流和入渗是降雨再分配的两条路径, 坡面产流开始后, 入渗量为降雨量与产流量之差。各砾石含量下 单次降雨坡面产流率总体表现为先增加后趋于稳定的变化过程(图 3)。第 1 场降雨的初始阶段产流率最小, 因为初期土壤含水量较小, 为雨滴浸润土壤和砾石的过程。随着时间推移, 表土逐渐湿润, 入渗率降低, 产流率迅速上升, 入渗率达到稳定时, 产流率也进入稳定阶段 (27 ~ 45 min)。协方差分析结果表明, 同一砾石含量的 3 场降雨下产流率变化过程只随时间有显著差异 ($P < 0.001$), 降雨场次对其无显著影响 ($P > 0.05$)。

从不同砾石含量之间来看, 产流率随砾石含量增加而减小。当砾石含量增加, 土体内土石界面增加对土壤水下渗有促进作用, 但同时入渗流路弯曲度和断面不透水面积也增加, 抑制降雨入渗^[15], 当促进作用大于抑制作用, 稳定入渗率则体现为增大。表 3 显示, 稳定入渗率随砾石含量增加而增大, 说明砾石含量越

多,其促进入渗的作用越明显。与入渗率变化规律相反,次降雨平均产流率随砾石含量的增加而减小;同一砾石含量下随降雨场次的增加略有上升,如图4所示。双因素方差分析结果显示,砾石含量对平均产流率有显著影响($P < 0.001$),而降雨场次之间无显著差异,亦无交互作用影响。前文所述各处理下3场降雨产流率变化过程也无显著差异($P > 0.05$),可知一定砾石含量下随降雨场次增加逐渐扩大的砾石覆盖率对产流率变化并无显著影响。

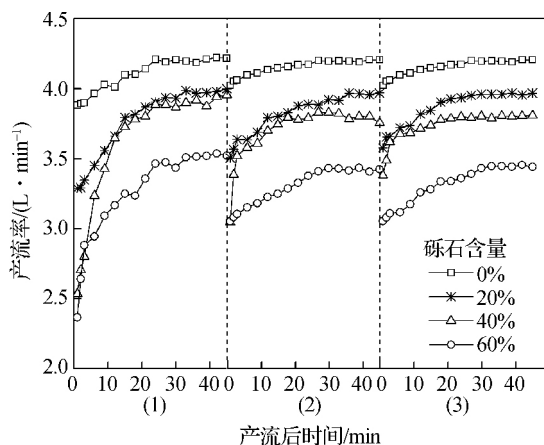


图3 不同砾石含量下工程堆积体产流率随时间变化过程

Fig. 3 Variation of runoff rate with time under different treatments

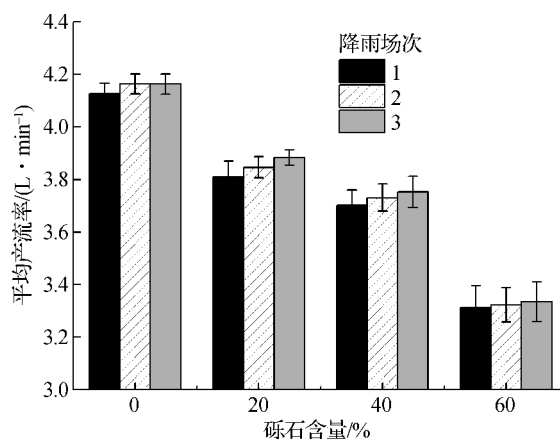


图4 次降雨平均产流率随砾石含量和降雨场次的变化

Fig. 4 Average runoff rates under different treatments and rainfall events

纯土堆积体坡面平均产流率比各含砾石堆积体大 7.90% ~ 24.90%, 稳定入渗率比各含砾石处理小 0.091 ~ 0.263 mm/min, 砾石的存在可明显增强入渗, 减少堆积体坡面产流。3 场降雨总平均产流率与砾石含量的回归分析结果显示, 两者存在良好的线性关系:

$$\bar{R}_t = 0.013R_c + 4.152, \quad n = 12, \quad F = 218.337, \quad P = 0.000, \quad R^2 = 0.952 \quad (1)$$

式中: \bar{R}_t 为总平均产流率, L/min; R_c 为砾石含量, %。

2.4 坡面产沙特征

2.4.1 次降雨平均土壤剥蚀率变化

图5为次降雨平均土壤剥蚀率随砾石含量和降雨场次的变化, 纯土堆积体平均土壤剥蚀率(D_r)为 1.056 ~ 1.370 g/(m²·s), 含砾石堆积体 D_r 为 0.213 ~ 0.896 g/(m²·s), 比纯土堆积体减少了 47.3% ~ 79.8%。从图5可以看出, D_r 随砾石含量的增加而减小, 砾石存在于工程堆积体内有明显的减沙效益。同时, 砾石含量一定时, D_r 随降雨场次增加有下降趋势。

坡面产沙与侵蚀动力和下垫面条件有关。雨滴击溅和坡面径流是坡面发生土壤侵蚀的驱动力, 且径流是泥沙运移的载体; 下垫面条件中微地貌特征、土壤特性等都影响着坡面产沙。本试验中砾石含量不仅对坡面产流历时、产流率有显著影响, 同时对砾石覆盖率、表土抗蚀性有决定性作用, 其通过多方面作用影响着坡面产沙。次降雨产流历时(T_0)、累积降雨量(I_c)、平均产流

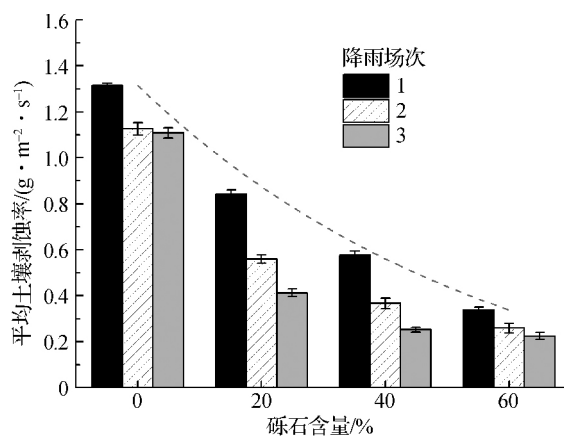


图5 平均土壤剥蚀率(D_r)随砾石含量和降雨场次的变化

Fig. 5 Variation of D_r with rock fragment contents and rainfall events

率(R_f)、表土初始含水量(W)、中值砾石覆盖率(C_{mid})、砾石含量(R_c)与平均土壤剥蚀率(Dr)的相关分析结果见表 4, 除了 W , 其余 5 个变量均与 Dr 存在显著的相关关系。对这 5 个变量做共线性诊断, 结果显示 R_f 、 R_c 和 C_{mid} 之间存在严重共线性。

表 4 相关分析结果

Table 4 Correlation coefficients of Dr and effecting factors

自变量	T_0	I_c	R_f	W	C_{mid}	R_c
Dr	-0.603**	-0.343*	0.862**	-0.220	-0.764**	-0.903**

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

2.4.2 平均土壤剥蚀率影响因素主成分回归分析

对影响平均土壤剥蚀率的 5 个因素进行主成分分析, 结果如表 5 所示。从表 5 中可知, 前 2 个主成分的贡献率达到了 95% 以上, 所表达的综合信息可以代表多个影响坡面产沙的影响因子。主成分 1 的特征值为 2.656, 贡献率为 73.13%, 明显大于其他主成分的贡献率, 其特征向量中荷载较高的为平均产流率(R_f)、砾石含量(R_c)、中值砾石覆盖率(C_{mid}), 这也表明 R_f 、 R_c 、 C_{mid} 是影响土壤侵蚀的主要因素。主成分 2 的特征值为 1.121, 贡献率为 22.43%, 其特征向量中荷载较高的是产流历时和累积降雨量。以主成分 P1 和 P2 进行最小二乘回归分析, 建立回归模型:

$$Dr = -0.047T_0 - 0.100I_c + 0.084R_f - 0.099C_{mid} - 0.085R_c + 0.120$$

$$(F = 54.284, P = 0, R^2 = 0.753) \tag{2}$$

式中: Dr 为次降雨平均土壤剥蚀率, $g/(m^2 \cdot s)$; T_0 为次降雨产流历时, min ; I_c 为次降雨累积降雨量, mm ; R_f 为次降雨平均产流率, L/min ; C_{mid} 为次降雨中值砾石覆盖率, %; R_c 为堆积体砾石含量, %。

式(2)中各自变量系数的正负分别表示其对平均土壤剥蚀率作用的正向和负向, 其中只有平均产流率与土壤剥蚀率有正相关作用。各变量的标准化系数分别为 -0.126、-0.267、0.224、-0.266、-0.227, 标准化系数绝对值的大小可表示其对因变量的作用大小, 其中累积降雨量、平均产流率、中值砾石覆盖率和砾石含量都对土壤剥蚀率的影响较大, 仅产流历时的影响较小。

表 5 主成分的特征值及贡献率

Table 5 Characteristic values and contributions ratio of important principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
P1	3.656	73.13	73.13
P2	1.121	22.43	95.55
P3	0.122	2.44	97.99
P4	0.084	1.68	99.67
P5	0.013	0.32	100.00

2.4.3 土壤剥蚀率变化过程

将各处理下 3 场降雨土壤剥蚀率变化过程点绘于图 6。从图 6(a) 来看, 单次降雨期间, 纯土堆积体土壤剥蚀率呈“快速增加—趋于稳定”的变化过程。次降雨初期产流率快速增加导致剥蚀率的快速上升。第 1 场降雨期间, 坡面浮土较多导致剥蚀率在初期增长最快, 这也可解释第 1 场降雨平均剥蚀率较第 2 场、第 3 场降雨大(图 5)。浮土被冲刷殆尽后第 2 场降雨土壤剥蚀率相对减小, 第 3 场降雨前期土壤剥蚀率有一个峰值变化过程, 这是因为期间坡面发育出细而浅的细沟, 径流相对汇集导致土壤剥蚀率增加, 待细沟形态稳定后土壤剥蚀率逐渐减小并趋于稳定。经观察, 含砾石堆积体坡面未出现细沟。图 6(b) 一图 6(d) 次降雨期间, 含砾石堆积体土壤剥蚀率呈“快速增加—逐渐减小”的变化过程。初期土壤剥蚀率增加的原因与纯土堆积体相同, 随着降雨的继续, 土壤剥蚀率逐渐减小。

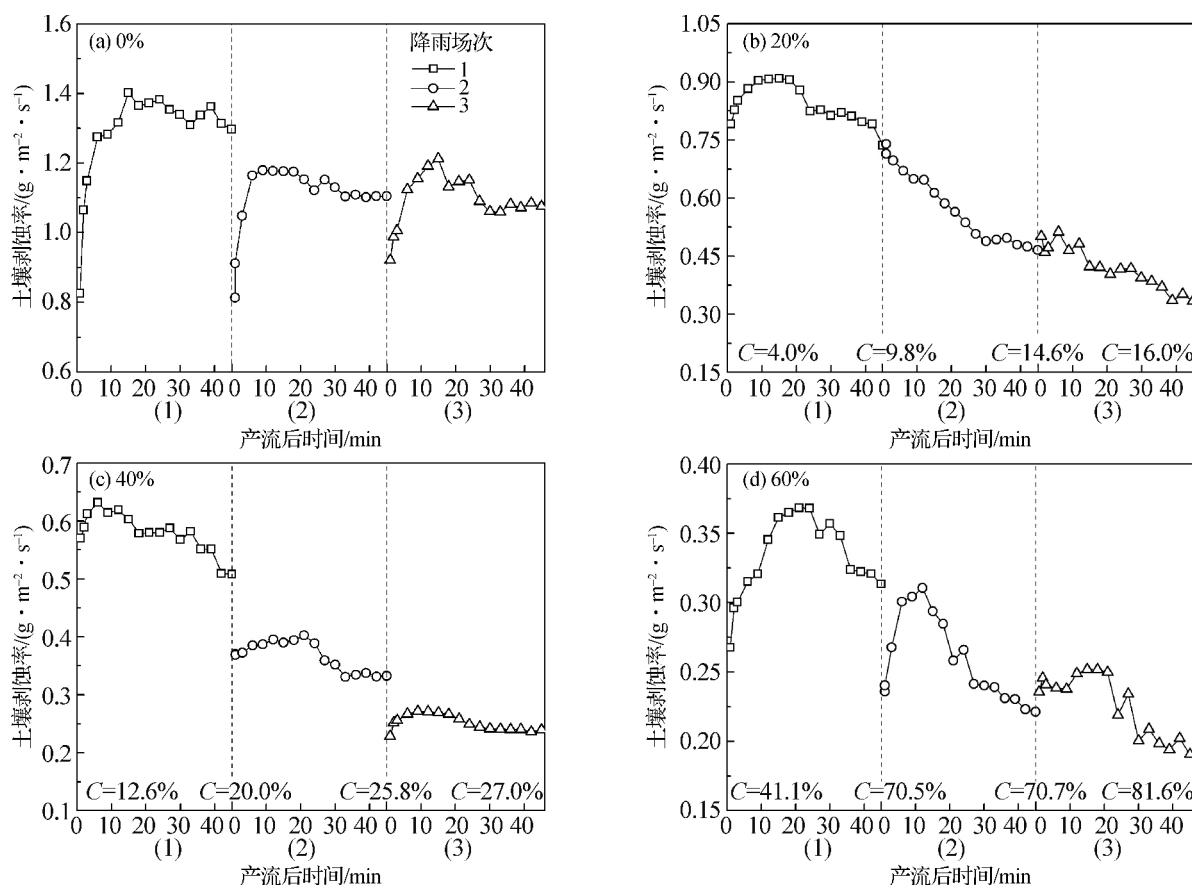


图6 各砾石含量下土壤剥蚀率随时间的变化

Fig.6 Variation of soil detachment rate with time under different treatments

同一砾石含量下3场降雨过程整体来看, 纯土堆积体剥蚀率先增加后趋于稳定, 而含砾石堆积体剥蚀率呈持续减小趋势。前文已阐明产流率变化过程和其平均值均在降雨场次间无显著变化, 且雨强恒定, 说明侵蚀营力基本不变。从下垫面条件分析, 纯土堆积体3场降雨下, 少量细沟发育导致地貌条件有一定差异, 但并未致使土壤剥蚀率整体趋势的明显变化; 而对于含砾石堆积体, 3场降雨下砾石覆盖率的扩大导致地貌条件发生较大变化, 致使连续3场降雨下, 土壤剥蚀率整体随累计产流后时间呈指数函数减小趋势:

$y = at^{\beta}$ ($a = 0.351 \sim 0.974$, $\beta = -0.008 \sim 0.004$), $P < 0.01$, $R^2 = 0.733 \sim 0.954$ 。

砾石含量一定时, 随着降雨场次的增加, 砾石覆盖率的变化也可反映已发生土壤侵蚀量大小, 将砾石覆盖率与累积土壤侵蚀量点绘于图7, 发现二者存在较好的函数关系, 最佳拟合方程可决系数均大于0.9, 这可为野外确定工程堆积体已发生侵蚀量提供参考。从图7可以看出, 砾石含量越大, 累积土壤侵蚀量随砾石覆盖率的增加速率越缓慢。

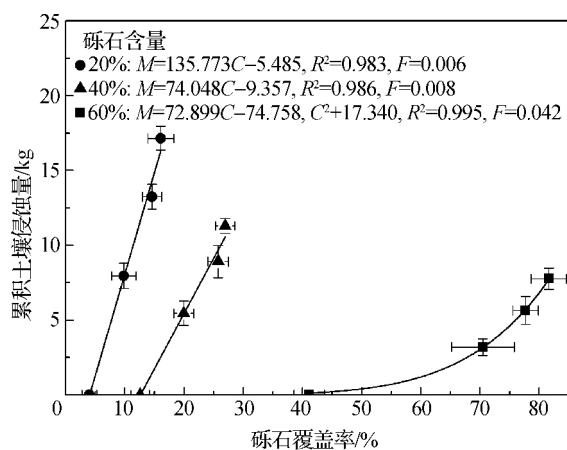


图7 砾石覆盖率(C)与累积土壤侵蚀量(M)的关系

Fig.7 Relationship between C and accumulated soil loss amount

3 讨 论

本文通过模拟降雨试验发现随着砾石含量的增加,工程堆积体坡面产流率线性减小,入渗能力显著增强。与史倩华等^[19]和康宏亮等^[1]对红壤和风沙土堆积体研究中,砾石含量10%时存在产流率变化阈值的结果不同,也不同于李建明等^[20]和王雪松等^[21]得出的砾石对产流无显著影响的结论。本试验砾石含量变化范围较大,各水平之间跨度20%,当砾石含量增加,不仅土石界面形成的非毛管孔隙利于入渗,砾石与砾石之间也因为相互接触架构形成更多的大孔隙^[26],且这些砾石形成“骨架”使土壤镶嵌其间,堆积体物质组成及其疏松,经饱和后疏松土体沉降致密,遂在砾石“骨架”与土壤之间形成大量空间与孔隙,进一步增加了大孔隙数量作为“优先流”通道^[26],砾石促进入渗的作用远大于抑制作用^[10],使入渗能力明显增强,与Urbanek和Shakesby^[9]、Novák等^[10]的研究结果一致。同时供试土壤、砾石粒径组成和在土壤中的分布不同也是产生差异的原因。产流率和砾石覆盖率的变化是不同砾石含量堆积体土壤剥蚀率变化的主要原因,表土砾石覆盖可消散雨滴击溅动能,增强抗蚀性^[3],影响水动力学特性、削弱径流侵蚀力^[17,19,27],本试验结果显示含砾石堆积体逐渐增大的砾石覆盖率导致土壤剥蚀率随时间呈指数含量递减趋势,与Wang等^[7]、Zavala等^[18]的结果相似。但本试验中砾石覆盖率非控制变量,其对工程堆积体微地形变化的贡献、坡面产沙动态变化的定量关系未来还需进一步探究。

4 结 论

(1) 重壤质工程堆积体所含砾石使土壤入渗能力增强,产流历时随砾石含量增加而延长,坡面产流率随着砾石含量的增加线性减小;同一砾石含量下产流历时主要与初始土壤含水量有关,不同降雨场次间产流率差异不显著。

(2) 堆积体中所含砾石通过不同的作用机制减少了坡面土壤剥蚀率,其对平均产流率、中值砾石覆盖率、产流历时的影响均对坡面产沙发挥作用。多个影响因子与平均土壤剥蚀率的关系可用线性主成分回归方程表达。

(3) 砾石含量一定时,砾石覆盖率在第1场降雨期间增长最快,后增长速率减缓;受到砾石覆盖率的影响,3场降雨土壤剥蚀率整体随时间呈指数函数递减趋势;且逐渐扩大的砾石覆盖率与已发生累积土壤侵蚀总量存在较好的函数关系。

参考文献:

- [1] 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. (KANG H L, WANG W L, XUE Z D, et al. Experimental study on runoff and sediment yield from engineering deposition with gravel in the northern windy-sandy region, Shaanxi [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 256-265. (in Chinese))
- [2] 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 X, XIE Y S, JING M X, et al. Standardization parameter for spoilbank underlying surface simulation of development construction project [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 229-234. (in Chinese))
- [3] CERDA A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 52: 59-68.
- [4] COUSIN I, NICOUILLAUD B, COUTADEUR C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil [J]. Catena, 2003, 53: 97-114.
- [5] NEARING M A, POLYAKOV V O, NICHOLS M H, et al. Slope-Velocity-Equilibrium and evolution of surface roughness on a stony hillslope [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2017, 21: 3221-3229.

- [6] BUNTE K, POESEN J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow [J]. *Water Resources Research*, 2010, 29: 1415-1424.
- [7] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China [J]. *Geomorphology*, 2012, 151/152: 234-242.
- [8] CHOW T L, REES H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75: 227-232.
- [9] URBANEK E, SHAKESBY R A. Impact of stone content on water movement in water-repellent sand [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 60: 412-419.
- [10] NOVAK V, KNAVA K, SIMUNEK J. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method [J]. *Geoderma*, 2011, 161: 177-181.
- [11] 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 & Landforms*, 2010, 32: 1063-1076.
- [12] ZHOU B B, SHAO M A, WANG Q J, et al. Effects of different rock fragment contents and sizes on solute transport in soil columns [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10: 386-393.
- [13] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 189-195. (WANG X Y, WANG T W, CAI C F, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 189-195. (in Chinese))
- [14] 王慧芳, 邵明安, 王明玉. 小碎石与细土混合介质的导水特性 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1086-1093. (WANG H F, SHAO M A, WANG M Y. Hydraulic conductivity of mixtures of rock fragments and fine earth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1086-1093. (in Chinese))
- [15] ZHOU B B, SHAO M A, SHAO H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 341: 462-472.
- [16] SHI Z J, XU L H, WANG Y H, et al. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11: 9350-9361.
- [17] ABRAHAMS A D, GAO P, AEBLY F A. Relation of sediment transport capacity to stone cover and size in rain-impacted interrill flow [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 25: 497-504.
- [18] ZAVALA L M, JORDAN A, BELLINFANTE N. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56: 95-104.
- [19] 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 Q H, WANG W L, GUO M M, 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. (in Chinese))
- [20] 李建明, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 黄土区生产建设工程堆积体砾石对侵蚀产沙影响 [J]. *泥沙研究*, 2014(4): 10-17. (LI J M, WANG W L, HUANG P F, 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(4): 10-17. (in Chinese))
- [21] 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. (WANG X S, XIE Y S, CHEN X, et al. Effects of rock fragment on soil erosion rule of engineering pyramidal accumulation in Northern Jiangxi [J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(1): 67-74. (in Chinese))
- [22] 戎玉博, 骆汉, 谢永生, 等. 雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响 [J]. *泥沙研究*, 2016(6): 12-18. (RONG Y B, LUO H, XIE Y S, et al. Effect of rainfall intensity on erosion and rill evolution of engineering piles [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(6): 12-18. (in Chinese))
- [23] FANG H Y, SUN L Y, TANG Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29: 2649-2658.
- [24] 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 L H, WANG Y F, WANG J, 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. (in Chinese))

- [25] 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 T X, ZHU Y J, SHAO M A, 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. (in Chinese))
- [26] NASRI B, FOUCHÉ O, TORRI D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils [J]. Catena, 2015, 131: 99-108.
- [27] 王雪松, 陈曦, 马洪超, 等. 赣北红土区工程堆积体坡面水动力特性[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 412-422. (WANG X S, CHEN X, MA H C, et al. Hydrodynamic characteristics of engineering spoil bank slopes in the red soil region of Northern Jiangxi province, China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 412-422. (in Chinese))

Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events*

LYU Jiaorong^{1,2}, ZHANG Wenbo³, HU Jinsheng^{1,2}, LUO Han³, XIE Yongsheng³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To examine the effects of rock fragment contents of spoil heaps on hydrological and sediment yielding processes, multiple simulated rainfall experiments were conducted in the laboratory. The results showed that, as the rock fragment content in the spoil heap increased, the duration of runoff generation on the slope was prolonged, the rate of runoff decreased linearly, and the soil detachment rate decreased. Under multiple rainfall events, rock fragments in spoil heaps decreased sediment yield primarily through the effects on runoff generation duration, runoff rate and rock fragment cover, and principal component regression could express the relationship between these factors and the average soil detachment rate. Under a certain rock fragment content, as surface soil was detached under multiple rainfall events, the rock fragment cover increased, which caused the soil detachment rate to decrease exponentially and also had a significant functional relationship with the accumulated total soil loss. The erosion reduction effect of the rock fragments contained in the spoil heaps can provide an important reference for water and soil conservation of the underlying surface of production and construction projects.

Key words: spoil heaps; rock fragment content; rock fragment cover; multiple rainfall events; principal components regression

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 41601300) .