

DOI: 10.11766/trxb201808130223

含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征*

赵 满¹ 王文龙^{1, 2, 3†} 郭明明¹ 康宏亮¹ 白 芸² 杨 波¹ 王文鑫¹
陈卓鑫¹

(1 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 榆林学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000)

(3 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要 为明确砾石含量对风沙土工程堆积体坡面径流产沙特征的影响, 以土质坡面为对照, 采用室内模拟降雨试验方法, 研究了不同降雨强度 (1.0、1.5、2.0 和 2.5 mm·min⁻¹) 条件下不同砾石质量含量 (10%、20%、30%) 的风沙土堆积体坡面径流特性及侵蚀产沙规律。结果表明: (1) 1.0、1.5、2.5 mm·min⁻¹ 雨强下, 10% 砾石含量坡面径流率较土质坡面减少 5.03% ~ 39.99%, 而 20%、30% 砾石含量坡面径流率则分别增加 7.48% ~ 74.56%、19.51% ~ 84.31%; 各砾石含量坡面径流率均与雨强呈显著递增的指数函数关系; (2) 土质和含砾石坡面径流形态基本以层流为主; 土质坡面径流流态多为急流, 而含砾石坡面径流则以缓流为主; 各雨强条件下, 10%、20%、30% 砾石含量坡面径流阻力系数较对照分别增加 24.07% ~ 114.10%、51.84% ~ 141.57%、89.04% ~ 288.16%; (3) 1.0、1.5 mm·min⁻¹ 雨强下土质和 10% 砾石含量坡面侵蚀速率随降雨历时呈减小—稳定—增大趋势, 2.0、2.5 mm·min⁻¹ 雨强下, 则呈波动式逐渐增大趋势; 4 种雨强下, 20%、30% 砾石含量坡面侵蚀速率呈缓慢、平稳增加趋势; (4) 雨强为 1.0 mm·min⁻¹ 时土质坡面侵蚀量最小, 雨强 ≥ 1.5 mm·min⁻¹ 时, 含砾石坡面侵蚀量较土质分别减少 41.08% ~ 63.27%、22.80% ~ 67.80%、28.89% ~ 68.50%; (5) 侵蚀量与径流率、雷诺数、弗汝德数均呈显著正相关关系, 与阻力系数则呈显著负相关关系; 结果可为陕北风沙土区生产建设项目工程堆积体水土流失量估算模型的建立提供科学参考。

关键词 降雨强度; 砾石含量; 风沙土; 径流特性; 侵蚀速率

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

随着经济发展, 近年来陕北风沙区生产建设项目 (煤炭、石油、天然气开采、公路建设等) 规模日益扩大, 大面积地表开挖—转移—堆置形成的大量工程堆积体已对当地生态环境造成了严重破坏。由于管理措施较为粗放, 加之气候、地形等因素的影响, 堆积体坡面水土流失异常严重, 并引起了广

泛关注^[1-2]。

生产建设活动形成的工程堆积体具有物质组成复杂、固结性差、坡度陡等特点^[3], 研究表明堆积体坡面物质可蚀性为扰动前的 10 倍 ~ 100 倍^[4], 在暴雨条件下坡面侵蚀形式多样^[5]、侵蚀模数巨大^[6], 属于典型的人为加速侵蚀^[7]。此外, 生产

* 国家重点研发计划重点专项 (YS2016YF5F030019) 和国家自然科学基金项目 (40771127, 41761062) 资助 Supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (No. YS2016YF5F030019) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 40771127, 41761062)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 赵 满 (1995—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1301254459@qq.com

收稿日期: 2018-08-13; 收到修改稿日期: 2018-10-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-01-03

建设活动中对地表和地下岩土层的扰动,导致堆积体土壤中常有大量砾石(粒径 $\geq 2\text{mm}$)存在^[8];砾石可改变土壤结构和物理特性^[9],并通过其自身特性以及在土壤中的排列分布、含量等对堆积体坡面径流特性和侵蚀特征产生重要影响^[10-12];砾石对土壤侵蚀的影响在一些著名的土壤侵蚀模型如EUROSEM^[13]、LISEM^[14]、RUSLE^[15]中均有体现,国内外诸多学者也对此进行了大量相关研究:Poesen等^[16]认为砾石可促进土壤侵蚀,而Rieke-Zapp等^[17]发现砾石(砾石含量5%、10%、20%、40%)可有效减少坡面侵蚀;王雪松等^[18]对红壤堆积体研究发现,砾石(砾石含量10%、20%、30%)可以促进坡面侵蚀,而在相同砾石含量条件下,李建明等^[19]却发现砾石对壤土堆积体坡面侵蚀有抑制作用;室内模拟降雨(砾石含量10%、20%、30%)^[20]和野外原位小区放水试验(砾石含量25%、40%)^[21]均表明,砾石对紫色土堆积体坡面侵蚀具有抑制作用。综上,砾石对堆积体坡面侵蚀产沙因其质量含量和土壤类型的不同而存在较大差异性,但目前针对含砾石堆积体的研究多集中在黄土区^[22]、红壤区^[23]和紫色土区^[24],风沙土作为一种在陕北地区分布广泛的土壤类型,其土壤黏粒含量少,团聚体含量低,结构性差,相同降雨条件下较其他类型土壤的侵蚀过程更加剧烈复杂^[25],在生产建设过程中,风沙土堆积体坡面在掺杂不同质量含量的砾石后其坡面径流特性和侵蚀产沙过程尚需进一步明确。

鉴于此,本研究在对我国陕北地区生产建设项目工程堆积体水土流失现状实地调查的基础上,以土质坡面为对照,采用人工模拟降雨试验的方法探究10%、20%、30%三种砾石含量的风沙土堆积体坡面径流特性和侵蚀产沙规律,为陕北地区风沙土质工程堆积体水土流失量估算模型的建立提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省靖边县,地处毛乌素沙地南缘,跨长城南北,居陕、甘、宁、蒙四省交界地带($36^{\circ}58' \sim 38^{\circ}03' \text{N}$ 、 $108^{\circ}17' \sim 109^{\circ}20' \text{E}$),东西宽91.3 km,南

北长116.2 km,总面积1.06万 km^2 ;煤炭、石油、天然气储量丰富,是我国“西气东输”工程的重要枢纽,也是我国主要能源基地;该区位于我国黄土高原北部风蚀水蚀交错带,属于半干旱大陆性季风气候区,年平均气温 10°C ,年平均降雨量为443.5 mm,且多以暴雨形式出现在夏秋两季。区内土壤类型主要为风沙土,以灌木为主的植被覆盖率为37.34%,部分地区近年来由于煤矿开采和道路建设等大量人为扰动,导致植被盖度急剧下降,生态环境脆弱,同时产生严重水土流失。

1.2 供试材料

试验所用土壤取自陕西省靖边县,类型属于砂壤土。过6 mm筛去除杂物后测量其含水量,通过人工洒水或者阴凉处风干的方法,保证装填时其含水量在10%左右,土壤颗粒粒径和有机质含量如表1所示。试验所需砾石取自陕西省山阳县高速公路附近山体自然滑坡体,经机械粉碎、分选获取,并以野外侵蚀产沙过程中砾石能够被搬运的粒径范围为依据,确定试验砾石粒径为2~50 mm。试验前对研究区内70多处生产建设项目堆积体进行实地调查发现,粒径 $2\text{ mm} \leq D < 14\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm} \leq D < 25\text{ mm}$ 、 $25\text{ mm} \leq D$ 的砾石分别占到样本数的31%、48%、21%,故将粉碎后砾石过14 mm、25 mm、50 mm筛,将其分为2~14 mm、14~25 mm、25~50 mm三个等级,并按照质量比3:5:2进行混合,作为试验用砾石;砾石质量含量低于40%的堆积体坡面占到调查总数的90%以上,所以将砾石按照质量含量10%、20%、30%分别与土壤均匀混合后装填,并设置0作为对照。

1.3 试验设计与指标测定

试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工降雨大厅进行。通过收集研究区多年降雨气象资料,统计夏、秋时节发生暴雨时频率较高的30 min雨强作为本次试验雨强的设计依据,最终将雨强设计为1.0、1.5、2.0、2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,降雨场次为16场。试验所用径流小区为降雨大厅内液压式可升降变坡钢槽,规格为5 m \times 1 m \times 0.5 m,底部设有渗水孔,据工程堆积体坡面土壤侵蚀标准试验小区建设要求,将小区坡度定为 25° ^[26](图1)。槽底均匀铺上一层5 cm厚细沙,并在细沙层表面垫上纱布,以满足野外降雨条件下入渗过程。为便于控制土体容重,设计进行土体分层装填:土层总厚

表1 土壤颗粒机械组成及有机碳含量

Table 1 Soil particle size composition and organic carbon contents for tested soil

土壤类型 Soil type	颗粒机械组成 Particle mechanical composition/%					有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)
沙土 Aeolian sandy soil	<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.1 mm	0.1 ~ 2 mm	0.160
	5.90	10.20	26.27	35.80	21.84	

度为45 cm, 分为下、中、上三层, 厚度依次为20 cm、15 cm、10 cm; 下层、中层均夯实, 表面进行打磨处理, 使土层之间更易结合, 根据野外调查资料, 容重控制在1.30 g·cm⁻³; 上层土体不夯实, 但土层表面要平整, 容重控制在1.10 g·cm⁻³。根据 Mehuis等^[27]提出的土石体容重公式来计算每次装填土石量。

$$\rho_T = 1 / ((1 - W) / \rho_b + W / \rho_s) \quad (1)$$

式中, ρ_T 为土石体容重, g·cm⁻³; ρ_b 为风沙土容重, 试验中下、中、上层依次为1.30、1.30、1.10 g·cm⁻³; ρ_s 为砾石密度, 2.65 g·cm⁻³; W 为砾石质量含量, %。每次试验结束后用相同方法进行装填。

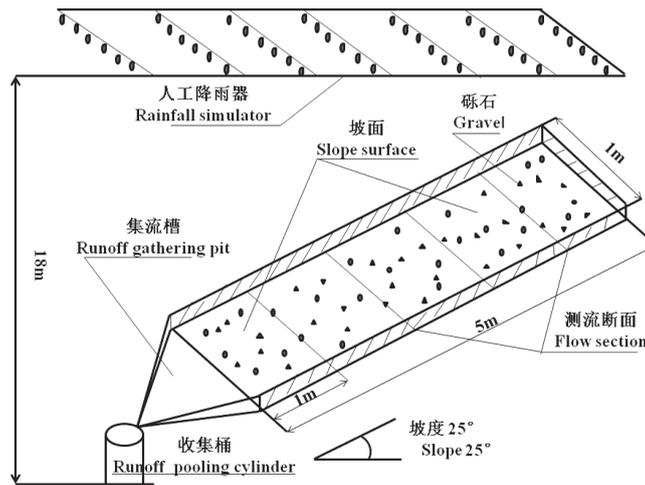


图1 模拟降雨试验布设简图

Fig.1 Layout of the simulated rainfall experiment

试验在模拟降雨系统中的下喷区进行, 该区降雨喷头高度为18 m (图1), 可满足自然降雨条件下雨滴降落的终点速度, 各次试验的降雨均匀度均高于80%。正式试验前率定雨强: 首先用雨布将小区遮盖, 在降雨场地四角各放置一个雨量筒, 测定单位时间、单位面积降雨量, 保证4个雨量筒所测得雨强与设计雨强相对误差不高于5%; 雨强率定完毕后, 揭开小区上方的雨布, 待坡面开始产流后, 记录初始产流时间; 用量筒在集流槽口处收集泥沙样品, 同时用秒表记录接样时间, 用精度为0.01g的电子秤称量所接泥沙样品质量, 样品在烘

箱中烘干后再称量泥沙干重。试验小区从坡顶开始每隔1 m用绳划分出一个断面, 坡面开始产流后用高锰酸钾染色法来测量断面处流速, 用秒表记录时间, 用钢尺来测量坡面径流宽度。

1.4 数据分析与绘图

(1) 径流深 h : 测量时段内坡面平均径流水深, 计算公式如下:

$$h = \frac{q}{Vbt} \quad (2)$$

式中, h 为径流深, m; q 为 t 时间内的径流量, m³; t 为径流取样时间, s; V 为断面处平均流速,

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 为过水断面宽度, m 。

(2) 径流率 Q : 通过观测时间段内样品重量减去烘干后泥沙重量获得, 计算公式为:

$$Q = \frac{M_2 - M_1}{6 \times 10^4 \rho t} \quad (3)$$

式中, Q 为径流率, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; M_2 为浑水样品重量, g ; M_1 为烘干后泥沙重量, g ; ρ 为水密度, $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

(3) 雷诺数 Re : 判别水流是层流或紊流的定量标准, 属于无量纲参数, 计算公式为:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (4)$$

式中, R 为水力半径, m ; ν 为水流黏滞系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 与温度有关, 通过试验时测得水温计算。

(4) 弗汝德数 Fr : 判别水流是急流或紊流的定量标准, 属于无量纲参数, 计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

式中, g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

(5) Darcy-Weisbach阻力系数 f : 径流流动过程中受到来自于水土界面阻碍水流运动力的总称, 计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (6)$$

式中, R 为水力半径, 薄层水流可用径流深 h 代替, m ; J 为水力能坡, $J = \sin\theta$, θ 为坡度。

(6) 侵蚀速率 D : 单位时间内一定面积内泥沙输移质量, 计算公式为:

$$D = \frac{M}{bLt} \quad (7)$$

式中, D 为侵蚀速率, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; M 为测量时间段内泥沙干重, g ; L 为坡长, m 。

采用SPSS 18.0、Excel 2010进行试验数据处理分析, 采用Origin 8.5进行绘图。

2 结果

2.1 不同砾石含量工程堆积体径流特征

2.1.1 径流率 由图2可知, 各砾石含量堆积体径流率均随雨强增大而增大。雨强为 1.0 、 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 各砾石含量堆积体径流率增长率分

别为 $0.03 \sim 0.05 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$ 、 $0.06 \sim 0.10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$, 随砾石含量增加径流率增幅较小。 2.0 和 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 径流率呈产流前期($0 \sim 9 \text{ min}$)迅速增加, 中后期($9 \sim 42 \text{ min}$)波动增长趋势: 2.0 和 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, $0 \sim 9 \text{ min}$ 内土质坡面径流率增长率为 $0.15 \sim 0.26 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$, 10% 、 20% 、 30% 砾石含量坡面为 $0.26 \sim 0.49 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$, 分别为同等雨强下土质坡面的 1.46 倍 ~ 2.33 倍; $9 \sim 42 \text{ min}$ 内, 土质坡面为 $0.13 \sim 0.24 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$, 含砾石坡面为 $0.03 \sim 0.15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$, 分别为土质坡面的 0.23 倍 ~ 0.92 倍。

图3为平均径流率随雨强和砾石含量变化关系。由图3a可知, 0 、 10% 、 20% 和 30% 砾石含量坡面平均径流率均随雨强增大而增大, 变化范围分别为 $1.11 \sim 2.41 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $1.42 \sim 3.70 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $3.12 \sim 5.90 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $5.92 \sim 7.45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 回归分析表明, 各砾石含量坡面平均径流率与雨强均呈显著指数函数关系($R^2=0.942 \sim 0.983$, $P<0.05$), 其中 30% 时二者关系最好($P<0.01$)。对产流过程(图2)分析可知, 1.0 、 1.5 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下径流率均随砾石含量的增加呈先减后增趋势, 在 10% 砾石含量时最小, 分别为 1.12 、 1.42 、 $5.92 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; 相比土质坡面, 1.0 、 1.5 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下 10% 砾石含量坡面平均径流率减幅为 $5.03\% \sim 39.99\%$, 20% 、 30% 砾石含量坡面平均径流率增幅分别为 $7.48\% \sim 74.56\%$ 、 $19.51\% \sim 84.31\%$ 。

为明确雨强和砾石含量对径流率的影响, 逐步回归分析径流率与雨强和砾石含量的关系, 结果表明径流率与二者呈极显著线性关系(式(8))。

$$Q = 3.290I + 5.978G - 2.765, R^2 = 0.928, P < 0.01, N = 16 \quad (8)$$

式中, Q 为径流率, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; I 为雨强, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; G 为砾石质量含量, $\%$ 。

2.1.2 径流流态、流型和阻力系数 图4为各雨强下 Re 、 Fr 、 f 随砾石含量的变化。由图4a可知, 各砾石含量坡面 Re 均随雨强增大而增大, 土质坡面 Re 与雨强呈显著指数函数关系($P<0.05$); 试验 Re 分布范围为 $36.64 \sim 705.8$, 除 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强条件下土质坡面径流流型为紊流外, 其余雨强和砾石含量条件下坡面径流流型均为层流。试验 Fr 分布范围为 $0.72 \sim 1.62$, 土质坡面 Fr 分布范围

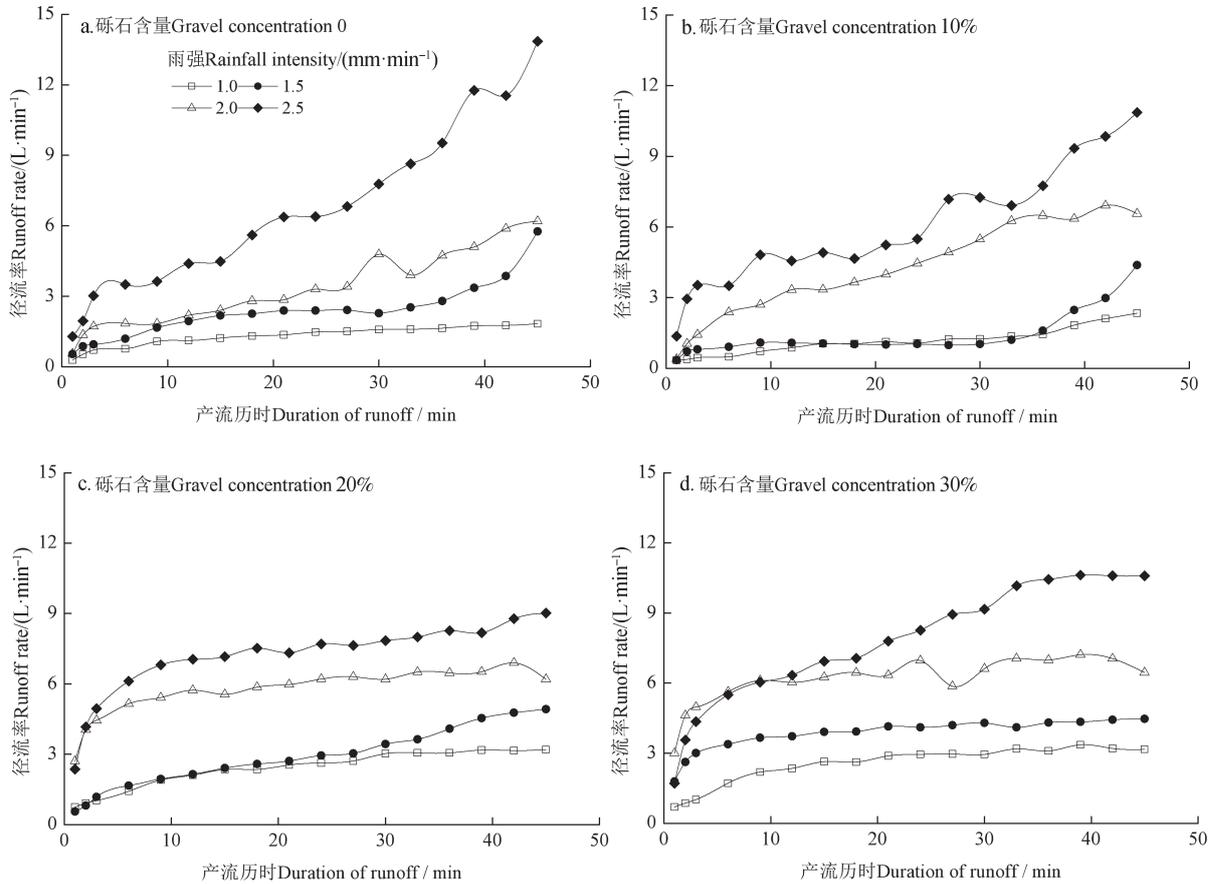


图2 不同砾石含量和雨强条件下径流率随产流历时变化

Fig. 2 Variation of runoff rate with time on slopes of the stacks relative to gravel concentration and rainfall intensity

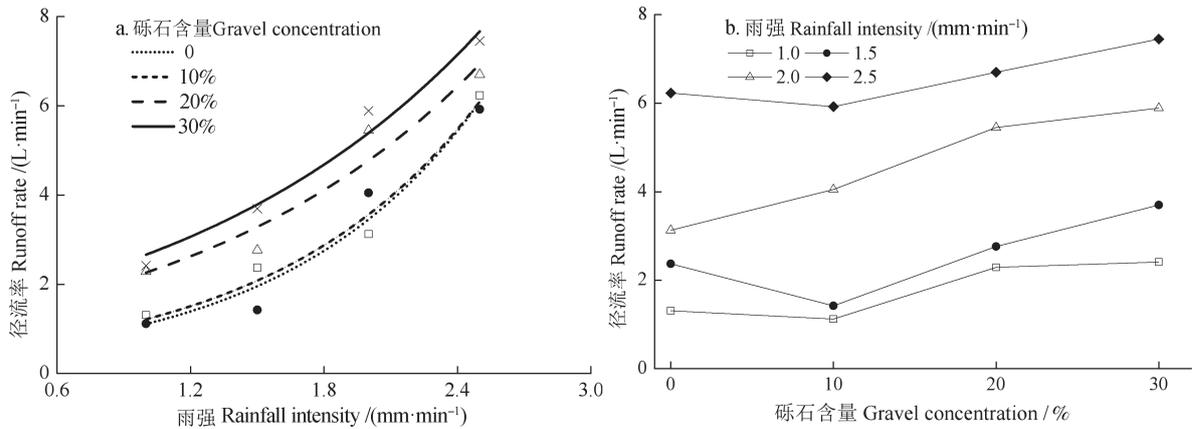
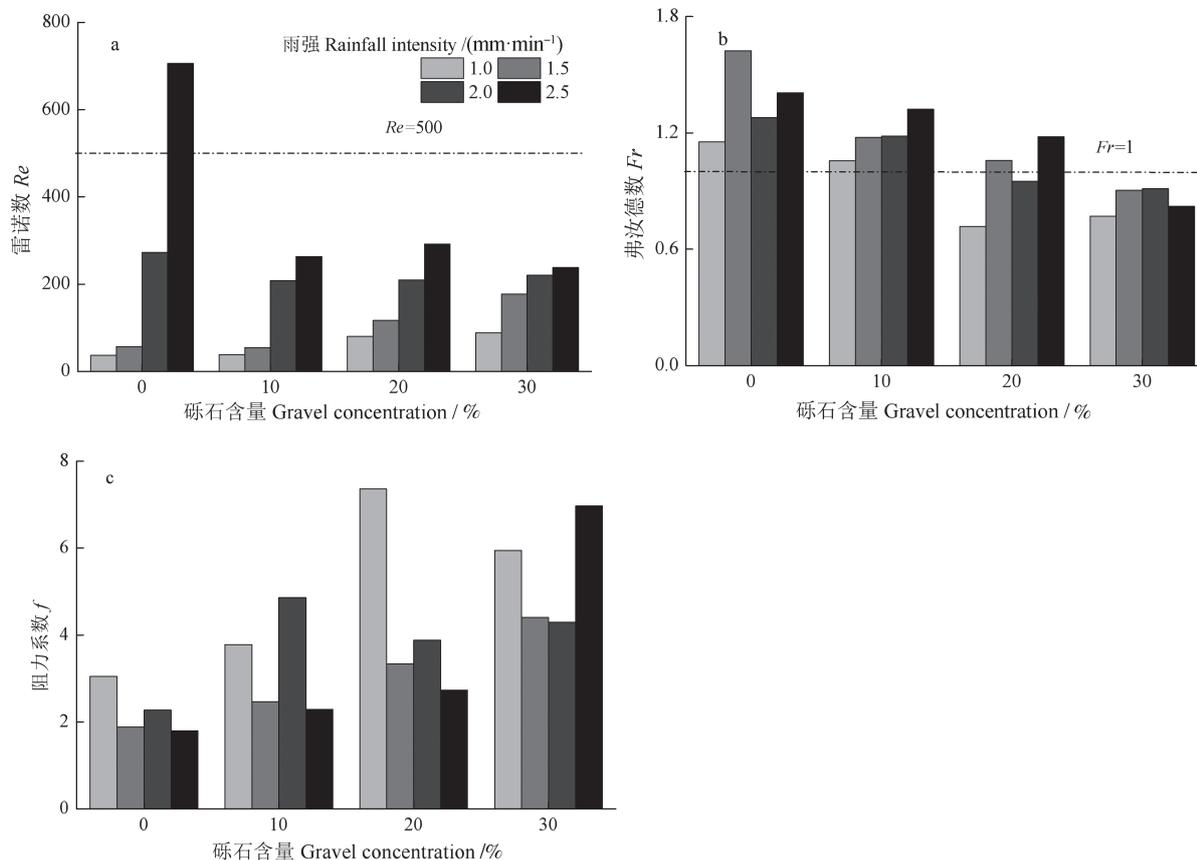


图3 平均径流率随雨强和砾石含量的变化

Fig. 3 Variation of mean runoff rate with rainfall intensity and gravel concentration

为1.28 ~ 1.62, 坡面径流流态为急流; 含砾石坡面 Fr 分布范围为0.72 ~ 1.18, 坡面径流流态主要为缓流; 相较土质坡面, 四种雨强下10%、20%、30%砾石含量坡面 Fr 减幅分别为6.06% ~ 27.50%、16.09% ~ 37.82%、28.63% ~ 44.36%。由图4c可

知, 各雨强下坡面径流阻力系数 f 随砾石含量增加总体呈增长趋势; 土质坡面 f 范围为1.80 ~ 3.05, 含砾石坡面 f 范围为2.73 ~ 6.97; 相较土质坡面, 各雨强下10%、20%、30%砾石含量坡面 f 增幅分别为24.07% ~ 114.1%、51.84% ~ 141.6%、

图4 不同雨强条件下 Re 、 Fr 、 f 随砾石含量的变化Fig. 4 Variations of Re , Fr , f with gravel concentration and rainfall intensity

89.04% ~ 288.2%。

2.2 不同砾石含量工程堆积体产沙特征

2.2.1 侵蚀速率随产流历时变化

图5为堆积体坡面侵蚀速率随产流历时的变化。除1.0 mm·min⁻¹雨强下土质坡面侵蚀速率随产流历时增加而逐渐减小外，整体上，土质和10%砾石含量坡面侵蚀速率呈现减小—稳定—波动增长的过程；其中土质坡面在1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹雨强下侵蚀速率发生突增的时间分别为39 min、30 min、21 min，侵蚀速率发生突增的时间随雨强增大而逐渐提前；10%砾石含量坡面在1.0、1.5 mm·min⁻¹雨强下分别在产流33、36 min侵蚀速率出现突增，2.0、2.5 mm·min⁻¹雨强下侵蚀速率在0~6 min内下降，随后呈波动增长。在各雨强下，土质坡面侵蚀速率变化范围为0.15~50.78 g·m⁻²·s⁻¹，变异系数 CV 变化范围为16%~114%；而20%、30%砾石含量坡面侵蚀速率波动范围分别为0.24~11.38 g·m⁻²·s⁻¹、0.13~13.58 g·m⁻²·s⁻¹， CV 变化范围分别为57%~77%、35%~72%；可以看出，相比于土

质坡面，20%、30%砾石含量坡面侵蚀速率变化范围和波动性均较小。

2.2.2 砾石含量对次降雨侵蚀量影响

由图6可知，各砾石含量堆积体次降雨侵蚀量均随雨强增大而增大；土质坡面次降雨侵蚀量与雨强呈显著线性函数关系 ($P<0.05$)，含砾石坡面次降雨侵蚀量与雨强均呈显著幂函数关系 ($P<0.05$)。雨强为1.0 mm·min⁻¹时，10%、20%、30%砾石含量坡面次降雨侵蚀量分别为土质坡面的8.61倍、5.57倍、4.64倍，含砾石坡面侵蚀量均要高于土质坡面。雨强为1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹时，土质坡面次降雨侵蚀量最大，分别为51.16 kg、93.64 kg、199.32 kg，与之相比，三种雨强下10%、20%、30%砾石含量坡面次降雨侵蚀量分别减少22.80%~50.08%、37.06%~66.49%、41.08%~68.50%，含砾石坡面侵蚀量均要低于土质坡面。

为明确雨强和砾石含量对次降雨侵蚀量的影响，逐步回归分析次降雨侵蚀量与雨强和砾石含量的关系表明，次降雨侵蚀量与二者呈极显著线性关

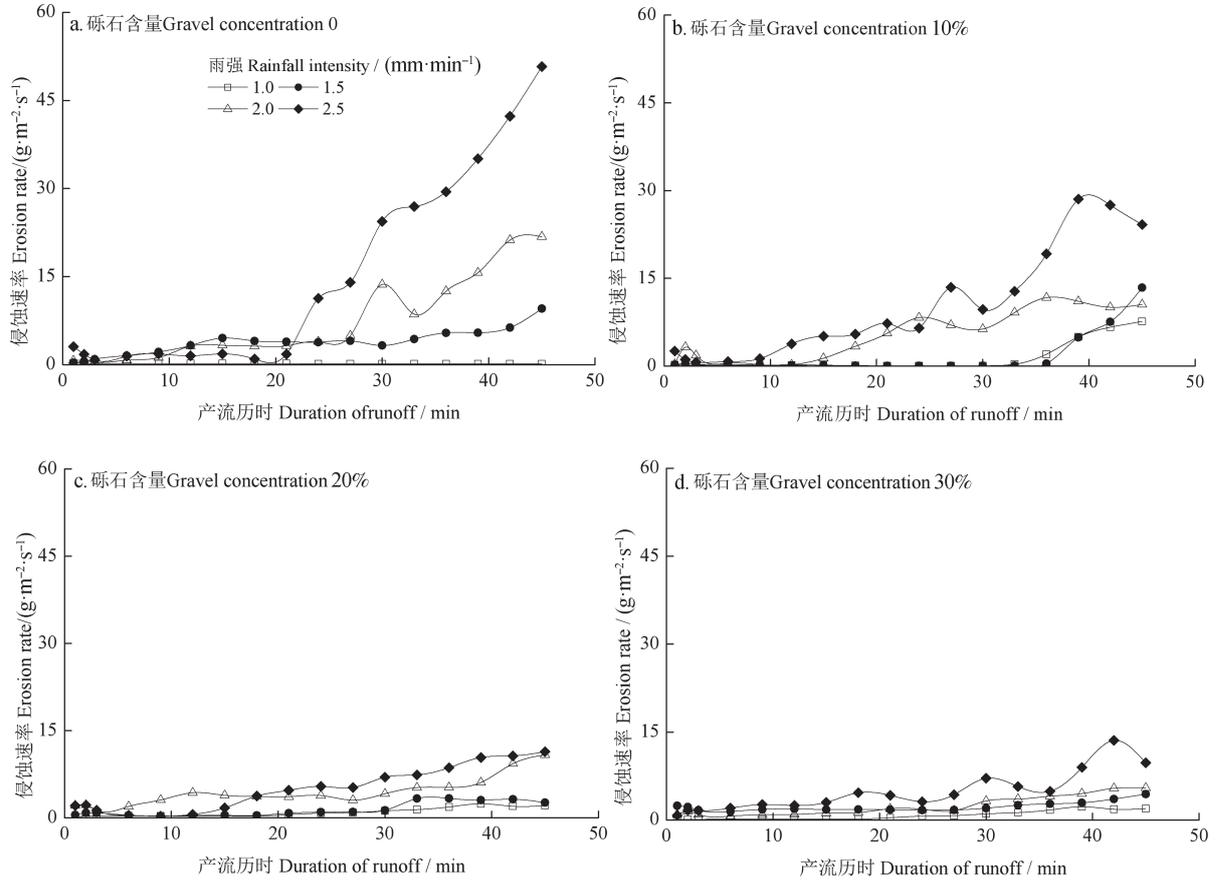


图5 不同雨强和砾石含量条件下坡面侵蚀速率随产流历时的变化
Fig.5 Variation of erosion rate with time, gravel concentration and rainfall intensit

系(式(8))。

$$E=70.379I-185.152G-39.401, R^2=0.760, P<0.01, N=16 \quad (9)$$

式中, E 为次降雨侵蚀量, kg; I 为雨强, mm·min⁻¹; G 为砾石含量, %。

2.3 次降雨侵蚀量与径流特性关系

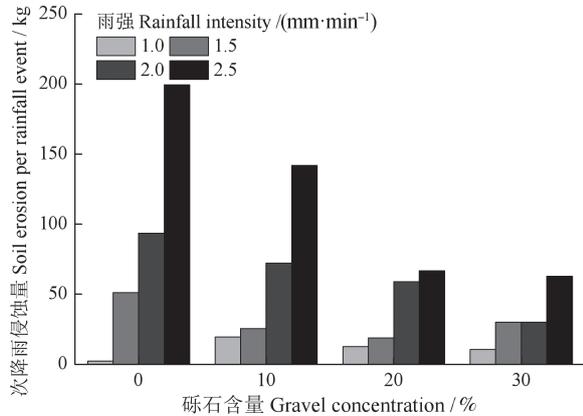


图6 不同雨强条件下次降雨侵蚀量随砾石含量的变化
Fig. 6 Soil erosion rate relative to rainfall intensity and gravel concentration

图7为次降雨侵蚀量随各径流特性参数的变化。为进一步明确侵蚀量与径流特性之间关系, 本文对16场降雨所得径流率、雷诺数、弗汝德数、径流阻力系数与次降雨侵蚀量分别进行了相关性分析和回归分析, 相关性分析表明: 次降雨侵蚀量与径流率、 Re 、 Fr 分别呈极显著或显著正相关关系, 但与 f 相关性较差, 相关系数依次为0.711、0.891、0.550、-0.452, 径流率、 Re 、 Fr 对次降雨侵蚀量具有显著影响; 回归分析表明, 次降雨侵蚀量与径流率、 f 呈显著幂函数关系, 与 Re 、 Fr 呈显著线性函数关系, 具体表达式如图7所示。

3 讨论

3.1 砾石对径流特性的影响

本研究表明, 1.0、1.5、2.5 mm·min⁻¹雨强下10%砾石含量土体平均径流率要低于0%、20%、30%, 这与部分学者对黄绵土^[28]、红壤^[23]的研究结果类似, 但也有研究表明紫色土在30%砾石

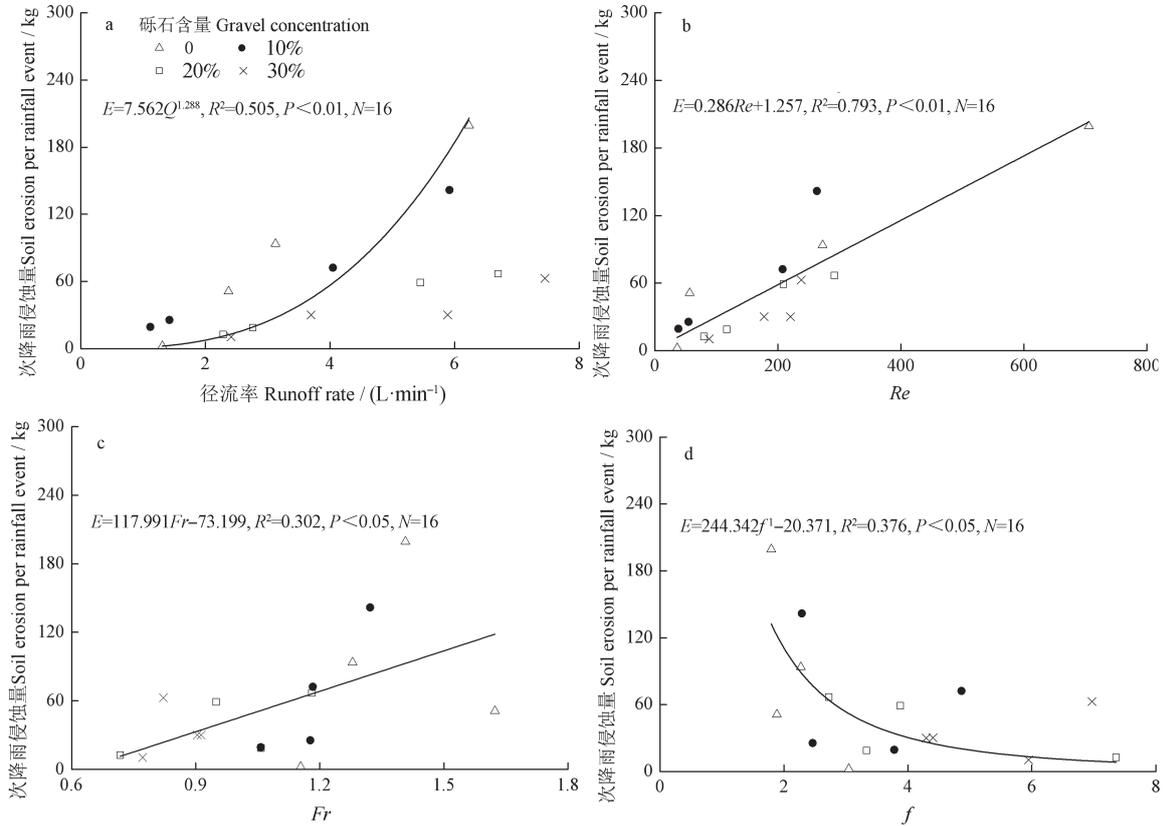


图7 次降雨侵蚀量随径流特性变化

Fig. 7 Variation of soil erosion with characteristics of runoff

质量含量时径流率最小^[20]，这与紫色土质地较为细密，孔隙度小，砾石对其土壤结构影响较小有关。砾石与土壤混合后会破坏土壤固有结构，使土壤孔隙度增大、入渗量增加，导致径流量减小^[29]，但砾石也会增大坡面土体粗糙度，使径流弯曲度增加、路径延长，从而减小入渗、增大径流量^[30]。本次试验，砾石对径流率的影响呈现出“两面性”，砾石对入渗的促进与抑制作用相互叠加，使径流率随砾石含量增加呈现出先减后增趋势。

雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 分别为表征水流流态和流型的重要参数。本次试验雷诺数集中在30~700，各砾石含量坡面径流以层流为主，这与模拟上方来水试验结果（ $43 \leq Re \leq 770$ ）^[31]或者模拟降雨试验结果（ $300 \leq Re \leq 500$ ）^[32]基本一致；雨强对雷诺数影响显著（ $P < 0.05$ ），且二者呈正相关关系。土质坡面径流为急流（ $1.28 \leq Fr \leq 1.62$ ），这与李占斌等^[33]研究结论相似，但略小于张乐涛等^[34]对工程堆积体的研究结果，主要是因为后者坡度和坡长较大，水流汇集

程度较高，使得径流紊动程度增强。相比于土质坡面，含砾石坡面以缓流为主（ $0.72 \leq Fr \leq 1.18$ ），且弗汝德数减幅明显，这与李宏伟等^[35]研究结果基本一致，主要是因为砾石使坡面径流分散程度高，难以汇聚。本研究中含砾石坡面阻力系数较土质坡面增幅明显，这主要是由于砾石一方面增大了水、土接触面粗糙度，另一方面也使坡面径流路径更加曲折延长，导致沟槽对径流阻碍作用增大^[33]。

3.2 砾石对侵蚀产沙影响

降雨过程中，坡面侵蚀形式主要由溅蚀发展为面蚀，再到沟蚀^[36]，侵蚀速率可以反映坡面在某个时刻的侵蚀状况^[19]；2.5 mm·min⁻¹雨强下，风沙土坡面平均侵蚀速率高达14.67 g·m⁻²·s⁻¹，是相同雨强下红壤的98倍、壤土的4.5倍^[18-19]；其他类型土壤诸如红壤、黄绵土、紫色土等产流过程中侵蚀速率一般呈现增加—衰减—稳定趋势，而风沙土侵蚀速率则呈减小—稳定—波动增加趋势，产流过程中有“突变”现象出现，且波动次数要明显多于其他土壤，特别是在产流中后期，其侵蚀速率仍

在逐渐增大。 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下土质坡面侵蚀速率随降雨历时变化幅度较小, 主要是由于坡面侵蚀形式为溅蚀和面蚀^[37], 侵蚀速率呈下降趋势则是坡面薄层水流流动过程中入渗量较大所导致^[32]。 1.5 、 2.0 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质和10%砾石含量坡面产流过程中侵蚀速率呈现较大波动性, 并且产流过程中侵蚀速率有突变现象; 侵蚀速率的“波动和突变”与坡面侵蚀沟的出现直接相关, 主要是由侵蚀沟发育过程中出现的重力侵蚀现象(沟壁崩塌、坡面土壤滑塌)所导致^[37-38], 这也表明风沙土堆积体坡面在较大雨强下, 不仅有沟蚀出现, 同时伴有重力侵蚀, 二者互相促进, 造成侵蚀形式较为复杂多变。20%、30%砾石含量坡面在4种雨强下侵蚀速率变化范围均较小, 主要是因为砾石周围松散颗粒被水流冲刷殆尽后, 出露于坡面的砾石“覆盖”在坡面表面, 有效地抑制了雨滴溅蚀, 延缓了地表结皮形成^[39]; 当坡面裸露砾石数量较多时, 相应的侵蚀沟的形成和发育程度较低, 也即砾石阻碍侵蚀沟的发育, 并可以抑制沟头溯源、沟岸扩张、沟床下切, 降低了沟壁重力侵蚀发生几率, 因此导致侵蚀速率波动范围和波动性均变小。

因土壤类型、雨强等因素的不同, 砾石或促进侵蚀, 或抑制侵蚀: 有研究发现, 壤土堆积体随砾石含量增加, 侵蚀量逐渐减小^[19], 对黄绵土的研究表明, 侵蚀产沙量受砾石含量变化的影响较小^[28]; 相同砾石质量含量红壤堆积体因雨强、坡度不同, 砾石对侵蚀量的影响也存在较大差异^[18,23]。本研究中 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质坡面侵蚀量低于含砾石坡面。由上文可知, 雨强较小时, 土质坡面主要发生溅蚀和面蚀, 所以在降雨过程中容易产生结皮, 此外, 该雨强下坡面径流流速较缓, 且多为层流, 对泥沙的搬运能力也较弱, 故侵蚀量较小; 含砾石坡面则因为砾石的存在, 增大了土壤孔隙度, 抑制了结皮现象的发生, 并使砾石周围土壤成为侵蚀易发区^[40], 因而侵蚀量要相对较大。 1.5 、 2.0 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 相比于土质坡面, 含砾石坡面侵蚀量减幅明显; 且当雨强 $\geq 2.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 侵蚀量与砾石含量呈负相关, 分析其原因, 主要有两方面: (1) 本研究中, 随砾石含量增加, 径流流态变缓(图4b), 坡面径流阻力系数上升(图4c), 相比于土质坡面, 含砾

石坡面径流流速下降, 同时径流用于克服坡面阻力所消耗的能量增加, 导致其侵蚀、携沙能力下降; (2) 砾石与土壤混合装填后, 砾石均匀分布在土层中, 砾石裸露度与砾石含量呈正相关, 随堆积体砾石含量的增加, 坡面砾石裸露度会逐渐增大, 导致径流携沙量下降^[41], 同时坡面会产生“铠甲效应”^[42], 保护坡面免受侵蚀, 二者共同作用, 使侵蚀量下降。

4 结 论

采用室内模拟降雨试验方法, 研究了四种砾石含量(0、10%、20%、30%)对堆积体径流侵蚀特征的影响, 主要结论如下: 土质坡面径流多呈急流态, 而含砾石坡面则以缓流为主。 1.0 、 1.5 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强时, 较土质坡面, 10%砾石含量坡面平均径流率减幅为5.03%~39.99%, 20%、30%砾石含量坡面增幅为7.48%~74.56%、19.51%~84.31%。 1.0 、 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下土质和10%砾石含量坡面侵蚀速率随降雨历时呈减小—稳定—增大趋势, 2.0 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 呈波动式增大趋势; 4种雨强下, 20%、30%砾石含量坡面侵蚀速率均呈缓慢、平稳增加趋势。 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强时, 10%、20%、30%砾石含量坡面次降雨侵蚀量为土质坡面的8.61倍、5.57倍、4.64倍, 当雨强 $>1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 则较土质坡面分别减少22.80%~50.08%、37.06%~66.49%、41.08%~68.50%。风沙土堆积体侵蚀量分别与径流率、雷诺数、弗汝德数、阻力系数呈显著线性(幂)函数关系。该研究可深入了解风沙土区堆积体坡面侵蚀过程和强度, 为工程堆积体边坡治理措施的布设提供一定的设计参考, 同时今后的研究中要认识到重复试验的重要性, 扩大、细化砾石含量的研究范围, 以提高研究的普适性和精准性。

参 考 文 献

- [1] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响. 土壤学报, 2014, 51(5): 983—992
Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. The influence of soil particles fractal and rainfall on runoff and sediment yield in Shenfu coal field (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 983—992

- [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. 农业工程学报, 2013, 29 (24) : 94—102
Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (24) : 94—102
- [3] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下弃渣体坡面不同防护措施的减水减沙效益. 土壤学报, 2017, 54 (6) : 1357—1368
Yang B, Wang W L, Guo M M, et al. Study on runoff and sediment reducing effects of erosion control measures on slopes of slag dumps with simulated rainfall (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (6) : 1357—1368
- [4] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia. Applied Geography, 1995, 15 (4) : 309—323
- [5] 王治国, 白中科. 黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究. 水土保持学报, 1994, 8 (2) : 10—17
Wang Z G, Bai Z K. Rock and soil erosion and its control techniques in the dump of the large surface mine in Loess Area (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8 (2) : 10—17
- [6] 王治国, 李文银. 开发建设项目水土保持与传统水土保持比较. 中国水土保持, 1998 (10) : 16—17, 42, 44
Wang Z G, Li W Y. Comparison of soil and water conservation in development projects with normal soil and water conservation (In Chinese) . Soil and Water Conservation in China, 1998 (10) : 16—17, 42, 44
- [7] 高旭彪, 黄成志, 刘朝晖. 开发建设项目水土流失防治模式. 中国水土保持科学, 2007, 5 (6) : 93—97
Gao X B, Hang C Z, Liu C H. Soil and water conservation models of developing and construction projects (In Chinese) . Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5 (6) : 93—97
- [8] 彭旭东. 生产建设项目工程堆积体坡面土壤侵蚀过程. 重庆: 西南大学, 2015
Peng X D. Runoff erosion process on slope of engineering accumulation caused by production and construction projects (In Chinese) . Chongqing: Southwest University, 2015
- [9] 李燕, 高明, 魏朝富, 等. 土壤砾石的分布及其对水文过程的影响. 中国农学通报, 2006, 22 (5) : 271—276
Li Y, Gao M, Wei C F, et al. Spatial distribution of rock fragment and its influences on soil hydrological processes (In Chinese) . Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (5) : 271—276
- [10] 解迎革, 李霞. 土壤中砾石含量的测定方法研究进展. 土壤, 2012, 44 (1) : 17—22
Xie Y G, Li X. Methodology on rock fragments content evaluation: A review (In Chinese) . Soils, 2012, 44 (1) : 17—22
- [11] 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. 水土保持学报, 2014, 28 (5) : 21—25
Wang X S, Xie Y S, Jing M X, et al. Effect of the different kinds of gravels on soil erosion of spoil bank (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (5) : 21—25
- [12] 丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两种工程堆积体坡面模拟径流侵蚀对比研究. 土壤学报, 2017, 54 (3) : 558—569
Ding W B, Li Y X, Shi D M, et al. Contrast study on simulated runoff erosion of two engineering accumulation slopes (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (3) : 558—569
- [13] 王宏, 蔡强国, 朱远达. 应用EUROSEM模型对三峡库区陡坡水力侵蚀的模拟研究. 地理研究, 2003, 22 (5) : 579—589
Wang H, Cai Q G, Zhu Y D. Evaluation of the EUROSEM model for predicting water erosion on steep slope land in the Three Gorges Reservoir Area, China (In Chinese) . Geographical Research, 2003, 22 (5) : 579—589
- [14] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. Hydrological Processes, 2015, 13 (7) : 955—975
- [15] Carter J, Owens P N, Walling D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. Science of the Total Environment, 2003, 314 (314-316) : 513—534
- [16] Poesen J, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. Catena, 1994, 23 (1-2) : 141—166
- [17] Rieke-zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. Earth Surface Processes & Landforms, 2007, 32 (7) : 1063—1076
- [18] 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. 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 (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2015 (1): 67—74
- [19] 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. *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 (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2014 (4): 10—17
- [20] 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. *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 (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2014, 25 (2): 189—195
- [21] 史东梅, 蒋光毅, 彭旭东, 等. 不同土石比的工程堆积体坡面径流侵蚀过程. *农业工程学报*, 2015, 31 (17): 152—161
Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Runoff erosion process on slope of engineering accumulation with different soil-rock ratio (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (17): 152—161
- [22] 丁亚东, 谢永生, 景民晓, 等. 轻壤土散乱锥状堆置体侵蚀产沙规律研究. *水土保持学报*, 2014, 28 (5): 31—36
Ding Y D, Xie Y S, Jing M X, et al. Study on sediment erosion law of conical scattered spoil bank of light loam (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (5): 31—36
- [23] 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. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (9): 2673—2680
- [24] 李叶鑫, 郭宏忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面入渗特征及影响因素. *环境科学学报*, 2014, 34 (5): 1292—1297
Li Y X, Guo H Z, Shi D M, et al. Infiltration characteristics and its influencing factors of different underlying surfaces from disturbed soils in purple hilly area (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (5): 1292—1297
- [25] 臧荫桐, 汪季, 丁国栋, 等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究. *土壤学报*, 2010, 47 (2): 262—269
Zang Y T, Wang J, Ding G D, et al. Variation of physico-chemical properties of aeolian sandy soil at coal mining subsidence and its evaluation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2): 262—269
- [26] 黄鹏飞, 王文龙, 江忠善, 等. 黄土区工程堆积体水蚀测算模型坡度因子研究. *泥沙研究*, 2015 (5): 57—62
Huang P F, Wang W L, Jiang Z S, et al. Study on slope factor of water erosion model for engineering piles in the Loess Area (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2015 (5): 57—62
- [27] Mehuis G R, Stolzy L H, Letey J, et al. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, 39 (1): 37—42
- [28] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究. *农业工程学报*, 2006, 22 (2): 64—67
Zhu Y J, Shao M A. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (2): 64—67
- [29] 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. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (5): 1214—1218
- [30] Dadkhah M, Gifford G F. Influence of vegetation, rock cover and trampling on infiltration rates and sediment production. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 16 (6): 979—986
- [31] 张翔, 高照良, 袁雪红, 等. 工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究. *泥沙研究*, 2016 (4): 34—40
Zhang X, Gao Z L, Yuan X H, et al. Study on hydraulic parameters of rill flow on slopes of engineering accumulation (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2016 (4): 34—40
- [32] 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. *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-gully system (In Chinese). *Advances in Water*

- Science, 2009, 20 (2): 236—240
- [33] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究. 农业工程学报, 2008, 24 (6): 64—68
Li Z B, Qin B S, Kang W, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (6): 64—68
- [34] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性. 水土保持学报, 2013, 27 (4): 34—38
Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydro-dynamic characteristics of steep slope runoff of engineering accumulation under simulated runoff conditions (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (4): 34—38
- [35] 李宏伟, 王文龙, 宋立旺, 等. 工程堆积体水动力学参数及其产沙效应. 水土保持学报, 2013, 27 (5): 63—67
Li H W, Wang W L, Song L W, et al. Study on characteristics of hydrodynamic parameters and its sediment yield for engineering accumulation (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (5): 63—67
- [36] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟. 土壤学报, 2015, 52 (1): 48—56
Wu S F, Liu Z H, Huo Y Y, et al. Development of rill erosion on loess slope and its simulation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (1): 48—56
- [37] 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. 水科学进展, 2016, 27 (2): 256—265
Kong 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 (In Chinese). Advances in Water Science, 2016, 27 (2): 256—265
- [38] 戎玉博, 白玉洁, 王森, 等. 含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征. 水土保持学报, 2018, 32 (1): 109—115
Rong Y B, Bai Y J, Wang S, et al. Characteristics of slope runoff erosion on the cone shaped engineering accumulation with gravel (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (1): 109—115
- [39] 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响. 水土保持学报, 2014, 28 (3): 57—61
Liang H R, Yu X X, Fan D X, et al. Effect of gravel-sand mulching on slope runoff and sediment yield (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (3): 57—61
- [40] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究. 中国水土保持科学, 2011, 9 (1): 99—103
Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Flow velocity and processes of runoff and sediment generation on soils containing gravels (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9 (1): 99—103
- [41] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展. 水土保持学报, 2005, 19 (1): 171—175
Fu S H. Effect of soil containing rock fragment on infiltration (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19 (1): 171—175
- [42] 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. Geomorphology, 2012, 151/152 (1): 234—242

Runoff and Sediment Yielding Characteristics of Slopes of Stacks of Gravels-Containing Aeolian Sandy Soil

ZHAO Man¹ WANG Wenlong^{1,2,3†} GUO Mingming¹ KANG Hongliang¹ BAI Yun² YANG Bo¹
WANG Wenxin¹ CHEN Zhuoxin¹

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Ecological Rehabilitation of Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

(3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 During the production and construction processes in North Shaanxi, large

stacks of soils formed, triggering serious soil and water losses. The existence of gravels in the stack is an important factor affecting the soil erosion in characteristic. Therefore, this study was oriented to explore impact of gravel concentration on runoff and sediment yielding processes on slopes of the gravel-containing aeolian sand stacks. 【Method】 In this study an indoor simulated rainfall experiment was carried out on stacks. The experiment was designed to have three levels of gravel concentration (10%, 20% and 30%), four levels of rainfall intensity ($1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $2.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ and $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) and one pure soil slope (containing zero gravel) as control. The experimental plots were $5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ each in size and laid on slopes 25° in gradient. The nozzles of the rainfall simulator were 18 m high above the ground, providing artificial rainfall over 80% in uniformity. Rainfall intensity was determined before the start of each artificial rainfall event to ensure the artificial rainfalls $< 5\%$ higher or lower than the designed one. During the experiment, flow velocity of runoff on the slope was measured with the dyeing method, flow width measured with a steel ruler, duration of sediment pooling recorded with a stopwatch, and mass of the sample determined with an electronic scale. 【Result】 Results show: (1) Under artificial rainfalls, 1.0, 1.5, or $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in intensity, runoff rates were 5.03% ~ 39.99% lower on the slopes 10% in gravel concentration than on CK, but 7.48% ~ 74.56% and 19.51% ~ 84.31% higher on the slopes 20% and 30% in gravel concentration, respectively; runoff rates on all the slopes increased with rising rainfall intensity, displaying an exponential function relationship; (2) Runoffs on all the slopes formed laminar flows; on CK runoffs rushed a bit, while on the slopes containing gravels they flew slowly; Under rainfalls varying in intensity, drag coefficients of runoffs on slopes, 10%, 20% and 30% in gravel concentration increased by 24.07% ~ 114.10%, 51.84% ~ 141.57% and 89.04% ~ 288.16%, respectively; (3) Under rainfalls 1.0 and $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in intensity, soil erosion rate on CK and the slopes 10% in gravel concentration displayed a variation trend with rainfall going on, i.e. decreasing – stabilizing – increasing, and under rainfalls 2.0 and $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in intensity, it fluctuated more vigorously; Under rainfalls regardless of intensity, soil erosion rate on the slopes 20% and 30% in gravel concentration decreased slowly and then increased steadily; (4) Under rainfalls $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in intensity, CK was the lowest in soil erosion rate and under rainfalls $\geq 1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, soil erosion rate decreased by 41.08% ~ 63.27%, 22.80% ~ 67.80%, 28.89% ~ 68.50% on the slopes 10%, 20% and 30% in gravel concentration, respectively; (5) Soil erosion rate was significantly and positively related to runoff rate, Reynolds number, and Freud number, but negatively to drag coefficient. 【Conclusion】 All the findings in this study will provide a theoretical basis for establishment of a model for predicting water and soil losses of engineering stacks of aeolian-sand soil in North Shaanxi.

Key words Rainfall intensity; Gravel concentration; Sandy soil; Runoff characteristics; Erosion rate

(责任编辑: 檀满枝)