

含结构体工程堆积体土壤侵蚀研究

李 镇¹, 张文博¹, 吕佼容², 骆 汉^{1,2}, 谢永生^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,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)

摘要:为探究野外实际调查中常见的含结构体工程堆积体土壤侵蚀过程,设计含结构体工程堆积体和对照组 2 种试验材料(对照组为不含结构体工程堆积体,后文中对 2 种试验材料简称为结构体和堆积体),通过室内模拟降雨试验,研究了结构体和堆积体坡面径流侵蚀特征与雨强和场次的关系。结果表明:(1)初产历时随雨强和场次的增加而减小,结构体对初产历时具有延缓作用,这与结构体的土壤特性和下垫面特征有关;(2)平均径流率和平均流速均随雨强和场次的增加而增大,堆积体平均流速和平均径流率分别是结构体的 1.11~1.22,1.11~1.37 倍,而结构体流速和径流率快速增加和趋于稳定的时间均较堆积体提前,且用时更短;(3)雨强对侵蚀速率、流速和径流率的贡献率较大,场次与侵蚀速率负相关,各条件下结构体的侵蚀速率均大于堆积体,且侵蚀速率和总侵蚀量分别是堆积体的 1.03~2.15,1.36~2.63 倍;(4)径流功率能够更好地描述结构体和堆积体侵蚀动力过程,结构体发生侵蚀的临界径流剪切力和径流功率均小于堆积体。

关键词: 结构体; 工程堆积体; 降雨场次; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0053-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.008

Study on Soil Erosion of Engineering Accumulation with Structure

LI Zhen¹, ZHANG Wenbo¹, LÜ Jiaorong², LUO Han^{1,2}, XIE Yongsheng^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100*)

Abstract: In this paper, taking the common engineering accumulation with structure in field investigation as the research background, two test materials including structural engineering accumulation and control group were designed (the control group is engineering accumulation without structures, which will be referred to as structure and accumulation for short in the later paper). Using the method of indoor rainfall simulation, the effects of rainfall intensity and rainfall field on slope runoff erosion of structure and accumulation were studied. The results show that: (1) the initial production duration decreases with the increase of rainfall intensity and rainfall field times, and the structure can delay the initial production duration, which is related to the soil characteristics and underlying surface characteristics of the structure; (2) The average runoff rate and average velocity increase with the increase of rainfall intensity and rainfall times. The average velocity and average runoff rate of the accumulation are 1.11 ~ 1.22 and 1.11 ~ 1.37 times that of the structure, respectively. The time for the rapid increase and stabilization of the velocity and runoff rate of the structure is earlier and shorter than that of the accumulation; (3) The contribution rate of rainfall intensity to erosion rate, velocity and runoff rate is large, and the rainfall times is negatively correlated with erosion rate. Under all conditions, the erosion rate of structure is greater than that of accumulation, and the erosion rate and total erosion amount are 1.03 ~ 2.15 and 1.36 ~ 2.63 times of accumulation; (4) Runoff power can better describe the erosion dynamic process of structure and accumulation. The critical runoff shear force and runoff power of structure erosion are less than those of accumulation.

Keywords: soil structure; engineering accumulations; multiple rainfall events; soil erosion

收稿日期: 2022-02-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601300)

第一作者: 李镇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: ilwllz@163.com

通信作者: 骆汉(1985—), 男, 博士生导师, 副研究员, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: hanli@ms.iswc.ac.cn

随着城市化、工业化和现代化进程的加快,我国生产建设项目数量明显增多,由其引发的生态环境问题越来越受到广泛关注^[1]。生产建设项目在施工等人为扰动下产生大量弃土弃渣,这种由大量弃土弃渣混合堆积形成的松散堆积体称为工程堆积体。工程堆积体坡面较陡,下垫面各异,抗冲性、稳定性差,比起常见的坡面,因堆弃时间短、表面裸露、防护措施不当等原因,更易在降雨作用下引发强烈的土壤侵蚀,甚至发生滑坡、泥石流等自然灾害。

野外降雨试验通常以自然边坡和人工边坡为研究对象,雨强、降雨量等受天气等环境因素影响较多,室内模拟降雨试验多以人为控制来改变土壤容重、密度和含水率,对试验材料进行过筛分、去除杂质实现试验材料的一致性,但这样处理不能很好地与实际条件相符合^[2]。对工程堆积体进行室内模拟降雨时,会对试验材料进行处理以保证下垫面的一致性^[3-4],这种处理一般会导致工程堆积体中大量的结构体缺失,而通过野外实地调查发现,工程堆积体中存在大量的土壤结构体,这种含有结构体的工程堆积体因存在团粒、巨粒土、固结土块等,土壤结构和性质多样,坡面更容易引发侵蚀和崩塌等灾害^[4-6]。结构体为土壤颗粒通过团聚作用而形成的形状大小各不相同的土块,对土壤质量演变和退化过程具有重要影响^[7-8]。中国对土壤结构体划分为片状、粒状、块状、棱(角)块状和棱柱状结构 5 种类型,大部分对工程堆积体土壤侵蚀的土壤粒径研究范围集中在 0.01~0.50 mm,而对更大粒径的土壤结构体研究相对较少^[9-10]。含有结构体的工程堆积体与工程堆积体径流侵蚀过程之间的异同尚不清楚,对含有结构体工程堆积体径流侵蚀的研究,阐述两者试验差异,使得工程堆积体径流侵蚀的研究内容更加符合实际,具有现实指导意义。李毅等^[11]研究了黄土坡面连续降雨的水分入渗分布特性,得到后续场次的降雨与入渗速率的差异不大;蒋芳市等^[12]研究了多场次降雨坡面沟蚀发育表明,极端连续降雨下侵蚀产沙差异较大;袁和第等^[13]运用连续较多场次降雨试验来研究褐土坡面侵蚀表明,平均流速与径流产沙量关系最为显著。径流侵蚀的发生不仅与雨强有关,连续降雨过程对径流侵蚀的影响更加重要^[13-15],对雨强和降雨场次的综合分析才能够明晰次降雨对工程堆积体径流侵蚀的影响。

为此,本试验采用室内人工模拟降雨的方法,利用锥状试验装置,以工程堆积体是否过筛及土块质量占比来研究含结构体工程堆积体和对照组(不含结构体工程堆积体)这 2 种试验材料土壤侵蚀过程及差异,揭示其径流特征和侵蚀规律,使对工程堆积体的研究更加接近实际,为生产建设项目的水土流失防治

以及工程堆积体土壤侵蚀量测算模型的完善提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2019 年 6—9 月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区进行。人工模拟降雨大厅降雨高度为 18 m,可模拟雨滴落地终点速度,降雨均匀度在 80% 以上^[16]。试验装置(图 1)为 1 个底面为正方形的 1/4 锥状槽(底边长 3.50 m,高 2.50 m),邻边为 2 个三角形挡板(长 3.50 m,高 2.50 m),两邻边设有凹槽集流,集流槽汇集之处连接出水口。试验所用土壤取自陕西杨陵,为粉砂质黏土质地,土壤机械组成为:<0.01 mm 占比 65.38%,0.01~0.05 mm 占比 21.38%,0.05~0.10 mm 占比 1.23%,0.10~0.25 mm 占比 9.78%,0.25~0.50 mm 占比 0.41%,>0.05 mm 占比 1.82%。堆积体所用土壤过 5 mm 筛,人工剔除过筛后粒径较大的土块及其他杂质,控制堆积体土壤中团粒和土块数量,测得粒径介于 5~20 mm 的细小土块质量占比小于 2%。结构体所用土壤不过筛,人工去除结构体中杂质,通过人工测量和网筛筛选测得粒径介于 0.5~20 mm 的结构体较多,含有较多粒状、块状结构和团粒结构,测得粒径介于 5~20 mm 的细小土块质量占比大于 10%^[7,17]。故含结构体工程堆积体为试验用土不过筛且具有较多团粒及粒状、块状结构,具有粒径 5 mm 以上的土块且质量占比不少于 10%,工程堆积体为试验用土过筛,具有少量或不具有土壤团粒结构,粒径大于 5 mm 土块质量占比小于 2%。

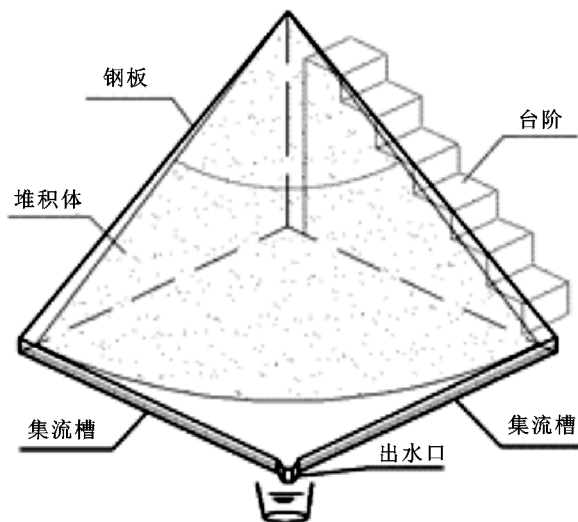


图 1 试验装置示意

1.2 试验方法

设计结构体坡面和堆积体坡面 2 种类型的下垫面,1.0、1.5、2.0 mm/min 3 种降雨强度,每个雨强下连续 3 场降雨,每场降雨 45 min,每场间隔 24 h,重

复试验2次,共计36场降雨。使用传送带将堆积体上传至装置上方落下,经自然堆积以及人工微调后形成半径3.50 m,高2.25 m,坡长4.20 m,坡度 $33^\circ \pm 2^\circ$ 的1/4圆锥松散堆积体坡面。堆积体坡面土壤容重为 $1.04 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$,结构体的堆积方法与堆积体相同,每次堆积完成后静置24 h,第1场试验前,通过阴干或洒水的方法保持土壤含水率在15%左右。

试验前先用塑料布盖好装置,多点率定雨强使其误差不超过5%。待雨强稳定后迅速揭开塑料布并开始计时,当坡面产生薄层状水流并流至集流槽时,产流开始,记录产流历时并重新计时,进行试验观测。产流后前4 min每隔1 min接1次径流样,之后每隔2 min接1次,取样数22个,试验时长40 min。降雨同时,在坡面邻边位置由上至下分设3个1 m长的观测坡段,在每次接样后用染色剂法测定3个坡段的流速,求其平均值,再乘以修正系数0.75作为断面平均流速^[18]。降雨结束后,读取径流样体积,用天平称取质量后,静置12 h后倒掉上层清液,用烘干称重法称取泥沙质量。用塑料布遮盖装置静置24 h后开始下1场降雨试验。

1.3 数据处理

文中试验数据处理采用Excel 2019,检验分析采用SPSS 25软件,绘图采用Origin 2021b软件。

(1)流速(V):采用染色剂法(KMnO_4),测距为1.5 m。

(2)径流率(Q):单位时间内径流体积,计算公式为

$$Q = \frac{6(M_1 - M_2)}{100\rho t} \quad (1)$$

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 为水的密度(1.0 g/cm^3); t 为径流样取样时间(s)。

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

(4)径流深(h):测量时间内平均径流深度(m),计算公式为

$$h = \frac{q}{Vbt} \quad (3)$$

式中: q 为 t (s)时间内测得的径流量(m^3); V 为坡面流速(m/s); b 为过水断面宽度(m),这里取锥形堆积体底面1/4周长的1/2(2.75 m)作为过水断面宽度。

(5)径流剪切力(τ):引起坡面土壤颗粒分离运移的主要动力,计算公式为

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

式中: τ 为径流剪切力(Pa或 N/m^2); γ_m 浑水密度(kg/m^3); g 为重力加速度(9.8 m/s^2); R 为水力半径(m),本试验条件下可近似用径流深 h 代替; J 为水力坡降,用坡度的正弦值替换(m/m)。

(6)径流功率(ω):水流作用于单位面积上的土体所消耗的功率,计算公式为

$$\omega = \tau \cdot V \quad (5)$$

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

2 结果与分析

2.1 坡面径流特征

2.1.1 初产历时 初产历时为开始降雨到坡面产生薄层水流流进集流槽的时间。降雨强度、降雨场次对堆积体和结构体初产历时的影响规律大致相同(图2)。同一雨强下堆积体和结构体的第1场试验的初产历时均大于后2场,且随着雨强和场次的增加初产历时逐渐减小,这是由于初产历时主要受坡度、地形地貌、土壤特性及地表覆盖等下垫面因素的影响。3种雨强下,堆积体后续2场试验初产历时分别比第1场缩短40.33%~50.62%,27.07%~46.99%,21.43%~38.78%,结构体后续2场试验初产历时分别比第1场缩短19.05%~40.63%,20.49%~49.27%,44.74%~53.68%。第1场试验过程中,初产历时为降雨完全入渗的时段且随着时间的推移,降雨入渗达到饱和形成超渗产流转化为坡面径流,后续2场降雨试验中,堆积体和结构体初始含水率较高,达到饱和入渗所需的时间较短,能够较第1场试验更快速进入产流过程。堆积体和结构体1.0 mm/min雨强下的初产历时均比1.5,2.0 mm/min的雨强延长,且3种雨强下,结构体的平均初产历时分别比堆积体延长1.49,1.57,1.63倍。2.0 mm/min对堆积体和结构体坡面的微地形和入渗率的影响程度较大,一方面大雨强能够缩短达到饱和和入渗的时间,加快超渗产流的形成;另一方面,雨滴滴溅促使堆积体和结构体小颗粒分离阻塞大孔隙及间隙,使得入渗速率减小。结构体较堆积体对坡面径流的产生有延迟作用,堆积体土壤介质较为均匀且连续,地表糙度和起伏度均比结构体小,降雨时能够较快形成径流,结构体存在的大孔隙、块状结构导致坡面凹凸不平,土壤介质不连续、坡面不平整等因素导致降雨初始时有较多的雨水入渗,而坡面许多细小坑洼能够汇集降雨,截留坡面径流,从而延长坡面出现径流的时间。

2.1.2 坡面流速 各雨强条件下,堆积体和结构体坡面流速随产流时间的变化过程见图3。流速的变化趋势为开始时迅速增长转变为缓慢增长直到趋于稳定。结构体1.0 mm/min雨强下,3场试验的流速

在 0~7 min 内迅速增长,在 7 min 后缓慢增长,流速介于 0.07~0.11 m/s,1.5 mm/min 雨强下,3 场试验的流速在 0~12 min 内迅速增长,在 12 min 后波动增长,流速介于 0.09~0.13 m/s,2.0 mm/min 雨强时,3 场试验的流速变化幅度不大,均呈现缓慢且波动增长,流速介于 0.10~0.13 m/s。3 种雨强下结构体流速的变异系数分别介于 0.05~0.13,0.04~0.08,0.04~0.06,随着雨强的增大,坡面流速的初始值和稳定后的流速逐渐增大,流速在场次间遵循随着雨强的增大,变异系数逐渐减小,流速的变化幅度减小。

相比于结构体,堆积体在 3 种雨强下流速的变化过程类似,堆积体初始及稳定时的流速差异不大,不同场次、雨强下的流速变化较为集中,变异系数依次减小。对堆积体和结构体流速达到稳定时的时间进行分析可知,堆积体流速在试验的过程中匀速增加,且在 30 min 后放缓,而结构体平均达到稳定流速的时间比结构体提前约 20 min。3 种雨强下,堆积体的平均流速分别是结构体的 1.22,1.12,1.14 倍(表 1),这是因为结构体存在大量的孔隙结构和表面突起,当坡面产生径流时,结构体对径流的阻力较大且具有较长的流动路径。

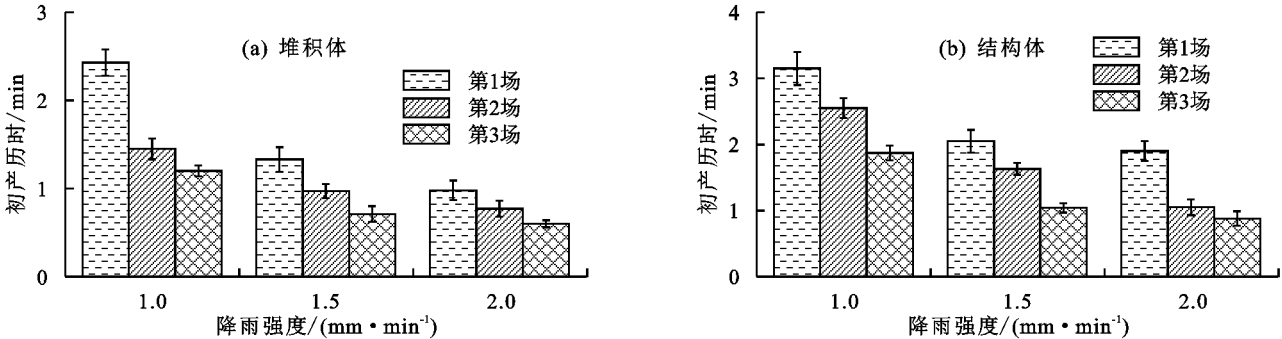


图 2 初产历时随雨强的变化

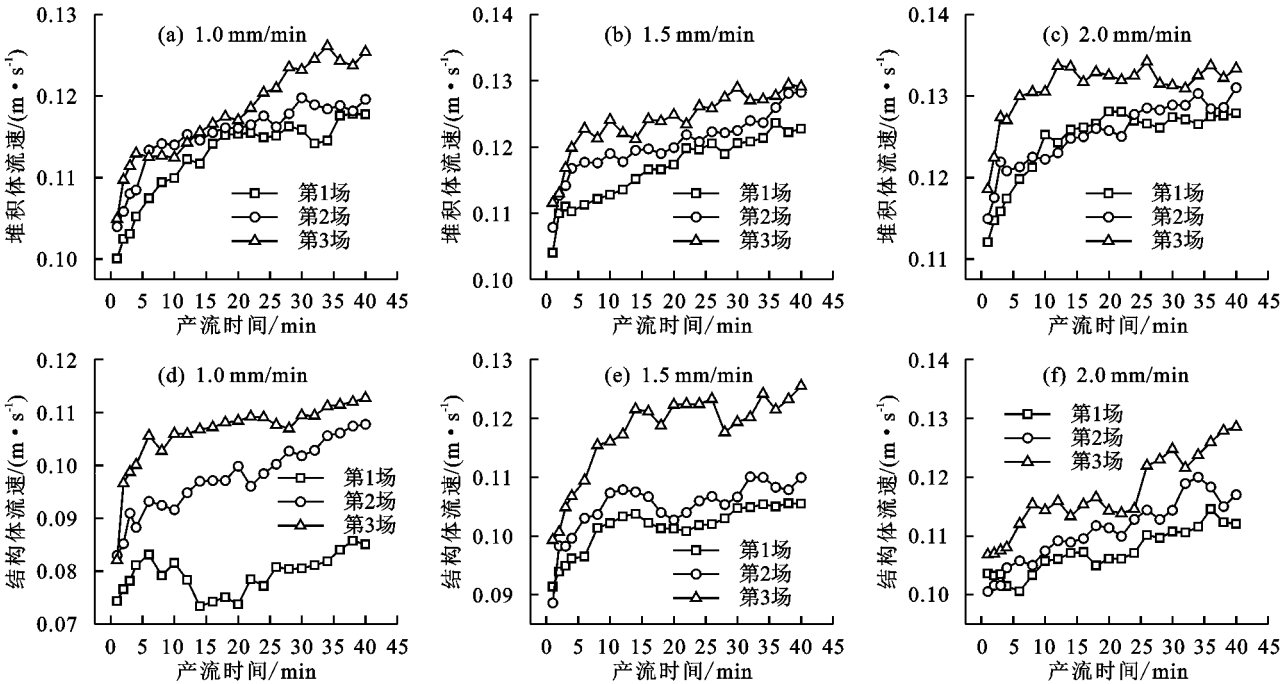


图 3 坡面流速随产流时间的变化

2.1.3 坡面径流率 各雨强条件下,堆积体和结构体坡面径流率随产流时间的变化遵循先迅速增长后缓慢增长最后趋于稳定的规律(图 4)。堆积体和结构体径流率的变化范围分别为 4.58~21.12,1.80~19.75 L/min,试验开始到结束时径流率的最小值及稳定时的最大值均随雨强和场次的增加而增大。结构体 1.0 mm/min 雨强时,径流率在产流后到试验结束,以 7 min 为时间节点,由匀速增长转变为缓慢增长,3 场试验的变异系数介于 0.16~0.27,第 2,3 场降

雨试验平均径流率的增幅分别是第 1 场的 40.71%,76.33%。1.5,2.0 mm/min 雨强时,径流率均在产流后的 0~7 min 内迅速增加,在 7 min 后,波动增加并趋于稳定,2 种雨强下,变异系数分别介于 0.07~0.11和 0.07~0.20,而后 2 场试验平均径流率的增幅分别是第 1 场的 28.66%,44.72%和 22.96%,26.45%。堆积体 1.0 mm/min 雨强时,径流率在产流后的 0~7 min 内迅速增加,在 7 min 后缓慢增加并逐渐稳定,第 2,3 场降雨试验平均径流率的增幅分别是第 1

场的22.87%和34.90%,1.5,2.0 mm/min雨强时,径流率在产流后的0~12 min内迅速增加,在12 min后波动增加并趋于稳定,第2,3场试验平均径流率的增幅分别是第1场的6.86%,17.98%和5.35%,13.99%。整个试验过程中,堆积体的径流率波动幅度及每场降雨径流率的增幅均小于结构体,这是因为堆积体坡面起伏程度较小,坡面土壤较为均匀,对降

雨的阻滞作用较小,结构体因为表面细小坑洼及蓄水的缘故,径流过程不稳定。

分析径流率由快速转为平稳的时间及表1中各雨强、场次平均径流率可知,结构体径流率迅速增长的时间比堆积体缩短32.26%,稳定的时间也较堆积体提前,3种雨强下结构体平均径流率分别是堆积体的0.73,0.85,0.90倍。

表1 各降雨条件下的平均流速(V)、平均径流率(Q)和平均侵蚀速率(E)

类型	场次	1.0 mm/min			1.5 mm/min			2.0 mm/min		
		V/ (mm·s ⁻¹)	Q/ (L·min ⁻¹)	E/ (g·m ⁻² ·s ⁻¹)	V/ (mm·s ⁻¹)	Q/ (L·min ⁻¹)	E/ (g·m ⁻² ·s ⁻¹)	V/ (mm·s ⁻¹)	Q/ (L·min ⁻¹)	E/ (g·m ⁻² ·s ⁻¹)
堆积体	1	0.11	7.57	0.07	0.12	12.36	0.17	0.12	17.61	0.36
	2	0.12	9.30	0.05	0.12	13.21	0.16	0.13	18.55	0.27
	3	0.12	10.21	0.03	0.12	14.59	0.13	0.13	20.08	0.23
结构体	1	0.08	4.73	0.08	0.10	9.09	0.60	0.11	14.48	0.82
	2	0.10	6.65	0.07	0.11	11.70	0.40	0.11	17.80	0.75
	3	0.11	8.33	0.05	0.12	13.16	0.30	0.12	18.31	0.61

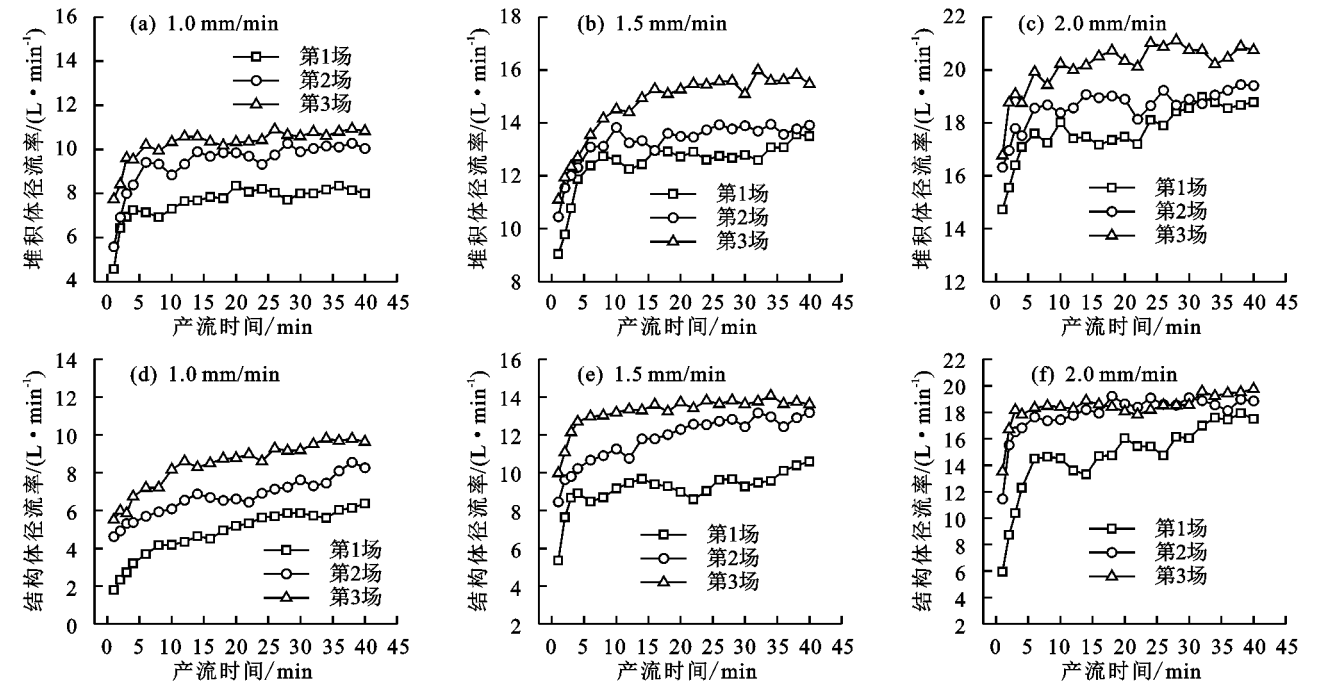


图4 坡面径流率随产流时间的变化

2.2 坡面侵蚀特征

各降雨条件下,堆积体和结构体坡面侵蚀速率随产流时间的变化过程见图5。堆积体的侵蚀速率随降雨时间、雨强的增长呈现缓慢且波动的增长趋势。同一雨强下,堆积体和结构体的侵蚀速率均随着场次的增加而减小。堆积体1.0 mm/min雨强时,连续3场降雨侵蚀速率介于0.03~0.09g/(m²·s),变异系数介于0.11~0.18,且第2,3场侵蚀速率分别是第1场的0.72,0.52倍,而当雨强增大到1.5 mm/min时,侵蚀速率增大到0.10~0.20 g/(m²·s),侵蚀速率的波动幅度也开始减小,变异系数介于0.09~0.04,且第2,3场侵蚀速率分别是第1场的0.93,0.76倍,当雨强为2.0 mm/min时,侵蚀速率最大为第1场的

0.42 g/(m²·s),最小为第3场的0.19 g/(m²·s),且第2,3场侵蚀速率分别是第1场的0.76,0.64倍。3种雨强下堆积体平均侵蚀速率分别是0.05,0.15,0.29 g/(m²·s)(表1),其中1.5,2.0 mm/min雨强的平均侵蚀速率分别是1.0 mm/min的3.16,5.83倍。结构体在1.0 mm/min时,平均侵蚀速率是堆积体的1.33倍,并且随着雨强的增大侵蚀速率也较堆积体增长更快,当雨强为1.5,2.0 mm/min时,平均侵蚀速率分别是堆积体的2.80,2.56倍。结构体不同雨强下平均侵蚀速率差异较大,其中1.5,2.0 mm/min雨强的平均侵蚀速率分别是小雨强的6.64,11.19倍。这是因为小雨强时,结构体与堆积体的侵蚀速率主要受径流率影响,点绘条件下对径流率和侵蚀速率进行相关

性分析后发现两者具有显著的线性相关($p<0.05$),堆积体的相关系数介于 0.65~0.81,结构体的相关系数介于 0.75~0.91。2.0 mm/min 时,结构体因含有块状结构、细小颗粒较大以及不平整的坡面,侵蚀速率受径流搬运能力影响程度较堆积体更加显著,而堆积体径流率稳定的时间较结构体提前,能够更快达到稳定的侵蚀速率。结构体侵蚀速率的波动程度较大,变异系数介于 0.26~0.37,尤其是 1.5 mm/min 时,侵蚀速率相差 0.85 g/(m²·s),且第 1 场降雨的平均侵蚀速率是第 3 场的 2.03 倍,这是由于第 1 场降雨径流搬运大量的泥沙颗粒,后续场次降雨的击溅破坏坡面孔隙结构,细小颗粒堵塞坡面孔隙,且在坡面结实,不利于泥沙的搬运。

各个试验场次的总侵蚀量随雨强的变化见图 6。

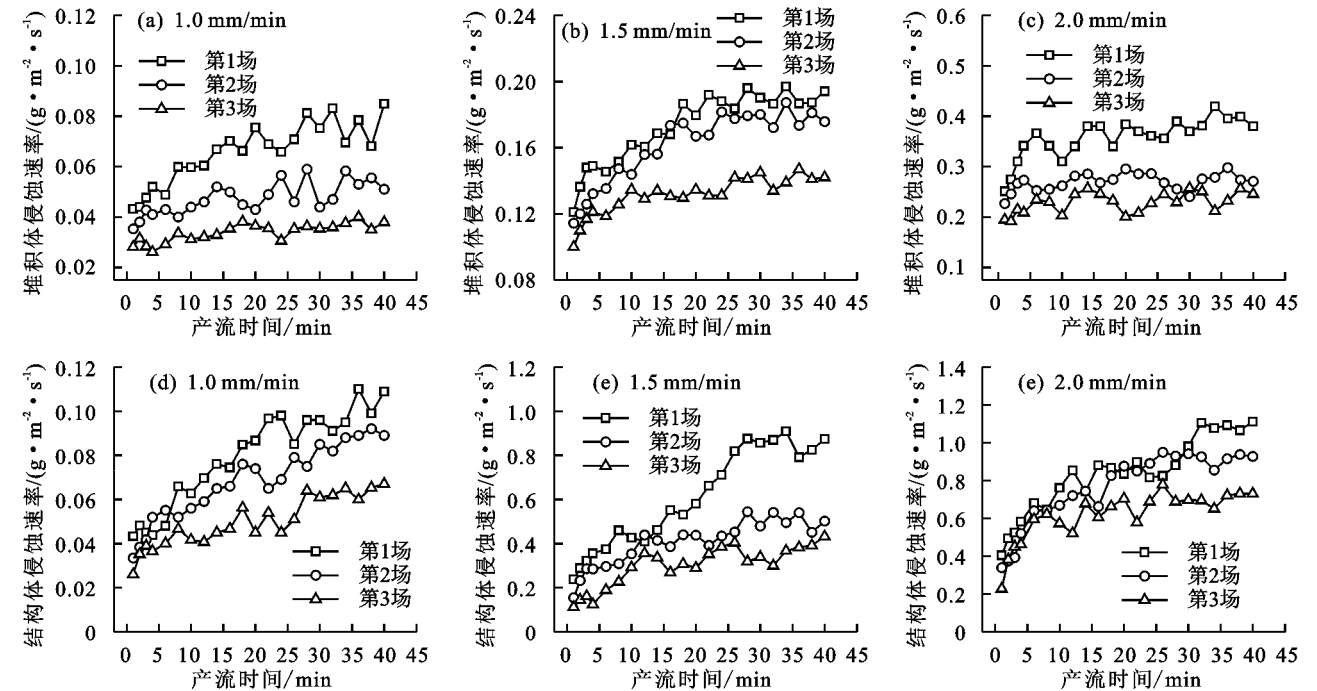


图 5 坡面侵蚀速率随产流时间的变化

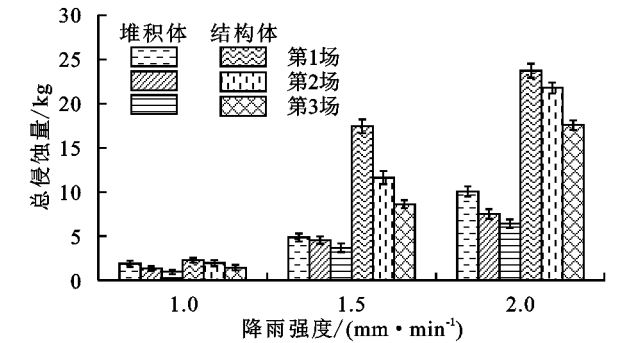


图 6 不同场次总侵蚀量随降雨强度的变化

为分析雨强、场次及其交互作用对流速、径流率及侵蚀速率影响程度,进行多因素方差分析得到表 2。可知雨强和场次对堆积体和结构体的流速、径流率及侵蚀速率具有极其显著影响($p<0.01$),且雨强的贡献率大于降雨场次,对 3 种指标的影响程度也是

总侵蚀量随场次的增加而减小,随雨强的增加而增大。拟合后发现总侵蚀量与雨强存在线性相关关系: $M_A=bI+c$, $b=5.45\sim8.18$, $c=-6.69\sim-4.50$, $R^2=0.95\sim0.99$; $M_B=bI+c$, $b=16.16\sim21.47$, $c=-17.98\sim-15.03$, $R^2=0.89\sim0.99$ 。式中: M_A 、 M_B 分别为堆积体、结构体总侵蚀量; I 为降雨强度; b 、 c 为常数。1.0 mm/min 时,堆积体与结构体 3 场降雨的总侵蚀量相差不大,而当雨强增大时,结构体的侵蚀总量显著大于堆积体,是堆积体的 2.89~3.93 倍,而对于同一雨强的 3 场降雨来说,总侵蚀量随着雨强的增加在场次间递减的幅度越来越大。

结构体 1.5 mm/min 雨强 3 场降雨的总侵蚀量递减幅度最为明显,后 2 场的侵蚀量分别比第 1 场减小 33.40%,50.67%。

雨强大于降雨场次,说明雨强对 3 种指标的影响起决定性作用。堆积体雨强和场次对流速的解释程度为 0.58,而对径流率和侵蚀速率的解释程度分别为 0.94 和 0.96,其中雨强对径流率和侵蚀速率的贡献率均高于 85%,而雨强和场次的交互作用只对侵蚀速率有显著影响,两者交互作用对侵蚀速率的贡献率为 3.1%,对侵蚀速率的影响为大效应($\eta>0.14$)。结构体中雨强和场次对流速的影响程度为雨强略大于场次,两者的交互作用较为明显,对流速的贡献率为 6.7%,而雨强和场次对径流率和侵蚀速率的影响则与堆积体相似,雨强的贡献率远大于降雨场次,而雨强和场次的交互作用对侵蚀速率的影响为中效应($0.06<\eta<0.14$)。

2.3 坡面水动力学特征

径流剪切力和径流功率能够很好地解释堆积体和结构体的坡面侵蚀过程,对径流剪切力、径流功率

和侵蚀速率进行点绘拟合,径流剪切力与侵蚀速率具有较好的幂函数关系: $E=a\tau^b$, $a=0.05\sim117.77$, $b=0.75\sim6.80$, $R^2=0.22\sim0.90$, $p<0.01$ 。式中: E 为侵蚀速率; τ 为径流剪切力; a 、 b 为常数)(图 7),而径流功率与侵蚀速率具有显著的线性关系: $E=bw+a$, $a=-886.56\sim11.51$, $b=98.38\sim4547.36$, $R^2=0.34\sim0.92$, $p<0.01$, w 为径流功率, a 、 b 为常数)(图 8)。整体来看,结构体径流剪切力、径流功率与侵蚀速率的相关性较堆积体高,其中结构体与堆积体均 $r(w)>r(\tau)$,说明径流功率是描述两者坡面侵蚀的更优参数。3 种雨强下堆积体发生侵蚀的临界径流剪切力依次增大,而同一雨强不同场次间临界径流剪切力只在 1.0 mm/min 时依次增大,1.5 mm/min 时,第 2 场试验的临界径流剪切力大于第 1、3 场,而当 2.0 mm/min 时,后续降雨的径流剪切力与侵蚀速率的关系不显著。结构体发生侵蚀的临界径流剪切力均随雨强和场次的增加而增大,但临界径流剪切与对应的堆积体相比均较小,说明相同条件下,结构体比堆积体需要更小的临界径流剪切力影响侵蚀过程的发生。同一雨强下堆积体土壤可蚀性参数随着降雨

场次逐渐减小($E-w$ 的线性拟合图中,斜率逐渐减小),而发生临界侵蚀所需要的径流功率依次增大。以 1.5 mm/min 结构体径流功率与侵蚀速率关系为例,随着场次增加,土壤可蚀性参数依次减小,分别为 4.54,2.40,1.96 s²/m²,临界径流功率依次增大,分别为 0.14,0.17,0.26 N/(m·s),而 1.5 mm/min 堆积体 3 场降雨的土壤可蚀性参数分别为 0.43,0.61,0.28 s²/m²,临界径流功率分别为 0.08,0.24,0.05 N/(m·s),可以得到 1.5 mm/min 雨强下,结构体的平均土壤可蚀性参数和平均临界径流功率均分别比堆积体的大 6.74,1.56 倍。不同雨强间堆积体与结构体的平均土壤可蚀性参数随着雨强的增大而增大,其中堆积体土壤可蚀性参数的变化幅度介于 0.10~0.70 s²/m²,而结构体在 0.22~4.54 s²/m²。对比所有发生侵蚀的临界径流功率可知,临界径流功率基本遵循随雨强和场次的增加而增大的规律,这说明降雨场次会提高引起侵蚀过程发生的临界径流功率的阈值,减小发生侵蚀时的土壤可蚀性参数,而结构体引起侵蚀过程发生的临界径流功率均比堆积体小,说明结构体更容易受到径流的影响而发生侵蚀。

表 2 雨强、场次对流速、径流率及侵蚀速率影响的显著性

类型	指标	变量	平方和	均方和	<i>F</i>	<i>p</i>	η	贡献率	<i>R</i> ²
堆积体	流速	雨强	0.01	0	97.10	0	0.51	0.436	0.58
		场次	0.01	0	29.68	0	0.24	0.133	
		交互	0	0	0.72	0.58	0.02	0.007	
		误差	0	0				0.424	
	径流率	雨强	3128.88	1564.44	1496.64	0	0.94	0.887	0.94
		场次	197.05	98.52	94.25	0	0.50	0.056	
		交互	5.59	1.40	1.34	0.26	0.03	0.001	
		误差	197.56	1.05				0.056	
	侵蚀速率	雨强	1.84	0.92	2209.75	0	0.96	0.861	0.96
		场次	0.15	0.07	178.63	0	0.65	0.074	
		交互	0.07	0.02	41.92	0	0.47	0.031	
		误差	0.08	0				0.380	
	流速	雨强	0.01	0.01	164.88	0	0.64	0.374	0.78
		场次	0.01	0.01	148.17	0	0.61	0.336	
		交互	0	0	16.62	0	0.26	0.067	
		误差	0.01	0				0.223	
结构体	径流率	雨强	3503.39	1751.70	728.24	0	0.89	0.782	0.90
		场次	506.73	253.37	105.33	0	0.53	0.113	
		交互	13.73	3.43	1.43	0.23	0.03	0.003	
		误差	454.62	2.41				0.102	
	侵蚀速率	雨强	14.59	7.30	383.95	0	0.80	0.738	0.81
		场次	1.10	0.55	28.82	0	0.23	0.055	
		交互	0.48	0.12	6.32	0	0.12	0.018	
		误差	3.59	0.02				0.189	
	流速	雨强	0.01	0.01	164.88	0	0.64	0.374	0.78
		场次	0.01	0.01	148.17	0	0.61	0.336	
		交互	0	0	16.62	0	0.26	0.067	
		误差	0.01	0				0.223	

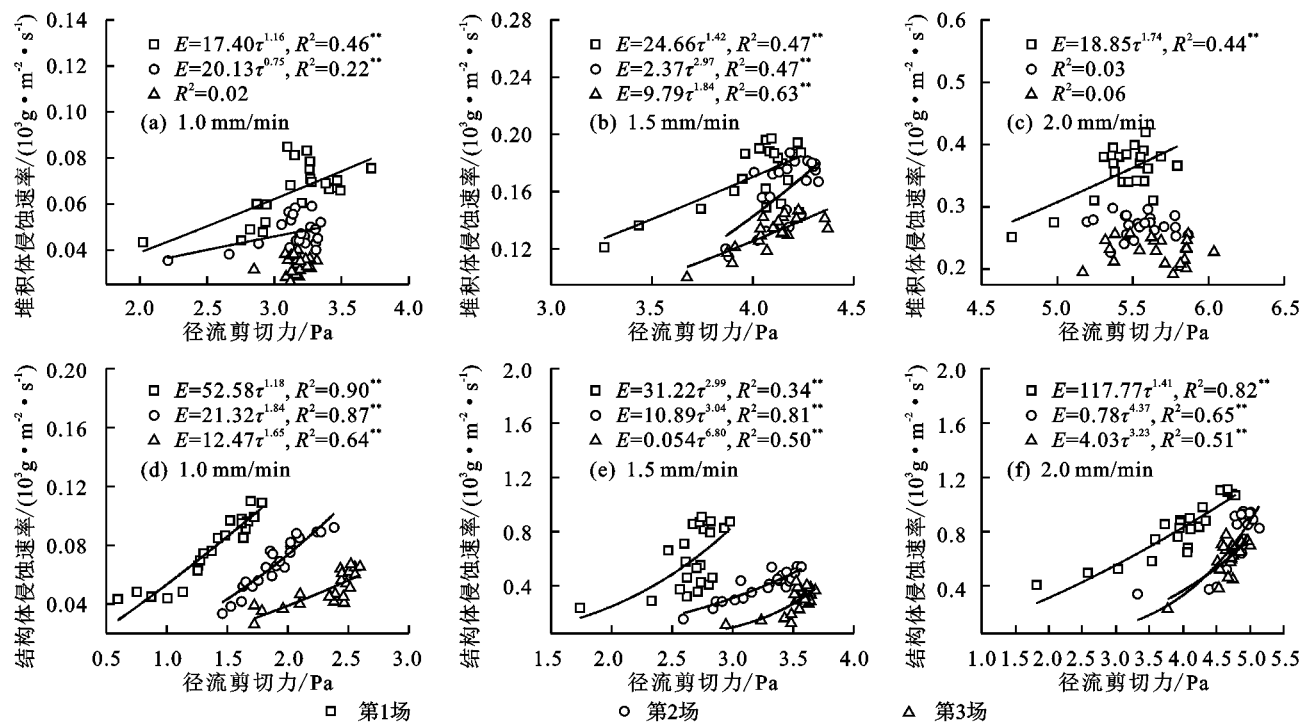


图 7 侵蚀速率与径流剪切力的关系

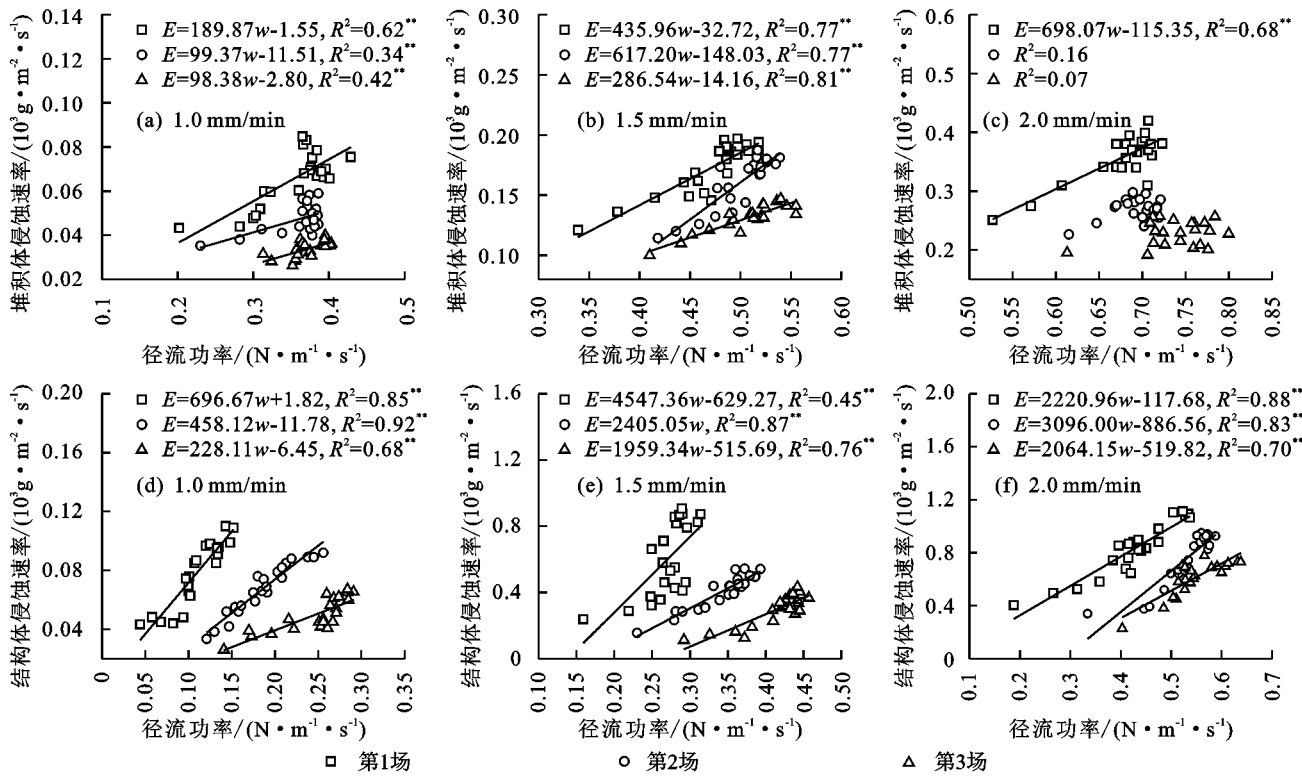


图 8 侵蚀速率与径流功率的关系

3 讨论

初产历时作为降雨试验中一个容易观测的指标,能够直观反映坡面对径流的延迟时间并以此分析坡面对径流的延缓作用,这一结论与方荣杰等^[19]和袁建平^[20]试验结论一致。不同雨强和场次下,堆积体和结构体具有不同的初始土壤含水率和入渗速率,造成这一差异的原因是结构体的土壤特性和下垫面特征各异,结构体表面粗糙程度较大,内部具有更多

的孔隙结构,小雨强时雨水更容易入渗到内部孔隙^[21],土壤含水率在结构体内部差异比堆积体小,而大雨强时两者均容易发生超渗产流,大雨强径流延缓主要原因为初始含水率不同^[14]。场次对初产历时的影响体现在连续场次间的时间间隔内,堆积体和结构体初始含水率下降的速率,在每次试验前较低的初始含水率能够更好地延缓径流的产生。流速、径流率变化规律一致,都遵循随产流时间先快速增长后趋于稳

定的变化规律(图3、图4)。这一变化过程与吕俊容等^[14]试验结论相似,原因为降雨的击溅过程引起土壤表层结皮发育,促进产流形成,与此同时堆积体和结构体的入渗速率开始减小直到坡面径流稳定时,入渗速率达到最小,此时的径流率和流速达到最大值,而袁和第等^[13]认为,平均流速随降雨场次的增加而减小,较少连续场次降雨平均流速随场次增大,而多场次平均流速逐渐减小。结构体径流率和流速均比堆积体小,这是由于结构体比堆积体具有更加复杂的坡面结构,结构体块状结构及凹凸不平的表面增加径流的弯曲程度,增强径流入渗,较大的坡面粗糙度分散径流的动能^[9]。侵蚀速率与降雨的侵蚀力有关,随时间的变化出现多峰多谷的特征,且随雨强的增大而增大,随场次的增加而减小(图5),这一结论与蒋芳市等^[12]在1.0 mm/min雨强试验的结果一致。与其极端雨强的试验结果不同,分析认为这与沟头溯源侵蚀引发的产沙量剧增有关,而本试验过程均未观测到溯源侵蚀。对同一场试验的不同时段分析可知,产流初期,引起坡面发生侵蚀的径流率和流速较小,坡面土壤不容易被径流搬运,而中期随着径流率上升,土壤的黏结力经历了由弱到强的过程,但径流率上升的速率大于土壤黏结力增强的速率,从而该阶段的侵蚀速率表现为波动且上升的过程。产流后期,径流率逐渐稳定,而坡面被径流搬运的细小颗粒较少,坡面结皮和大粒径土壤堆积导致坡面土壤的抗蚀能力增强,从而导致该阶段的侵蚀速率略微下降。对同一雨强的连续3场降雨来说,连续场次的降雨并不能增加侵蚀速率,反而降低侵蚀过程发生的阈值,后续场次的降雨比第1场降雨侵蚀发生的时间提前,但平均侵蚀速率表现为第1场>第2场>第3场。对堆积体和结构体的侵蚀速率和总侵蚀量比较后发现,结构体的侵蚀速率和总侵蚀量均大于堆积体。对雨强、场次和流速、径流率、侵蚀速率进行方差分析,雨强与各指标的相关性均较好(表2),而雨强和场次的交互作用并不能很好解释与径流率的变化关系,这说明径流率受雨强和坡面形态影响较多。

通过对径流剪切力和径流功率与侵蚀速率的关系对比后发现,径流功率是反映和揭示侵蚀发生的最优参数^[21]。径流剪切力与侵蚀速率有较好的幂函数相关关系,径流功率与侵蚀速率具有较好的线性相关关系(图7、图8),这与相关的研究^[17,22]结论一致。在对结构体和堆积体的可蚀性参数进行描述时发现,结构体的可蚀性参数均大于堆积体。堆积体可蚀性参数随雨强的增大而增大,结构体1.5 mm/min的可蚀性参数最大,而同一雨强下,两者的可蚀性参数均随场次增大而减小。相比于堆积体,结构体更容易受到径流剪切力和径流功率的影响而发生侵蚀,这一结论与王林华等^[23]和陈卓鑫等^[24]砾石条件下得出的

结论具有一致性,这是因为结构体与工程堆积体的砾石作用具有相似性^[25]。对于某雨强下径流剪切力、径流功率与侵蚀速率的关系而言,拟合直线或曲线并不能反映此刻的侵蚀真实发生的情况,而是给出参数与侵蚀速率之间的趋势关系,更加关注平均径流功率和平均径流剪切力^[26],图7、图8中2.0 mm/min第2、3场试验中径流剪切力和径流功率均与侵蚀速率相关性较差,这说明引起堆积体侵蚀的临界径流剪切力和临界径流功率均不容易量化,而此时的平均径流剪切力和平均径流功率能够更好地说明侵蚀发生时侵蚀速率集中值。引入土壤结构体这一概念对工程堆积体土壤侵蚀进行研究,并与传统的室内模拟降雨试验互补性对照,一方面揭示结构体与对照(堆积体)的侵蚀差异;另一方面,以符合野外实际情况的含结构体工程堆积体进行试验,得出结论更能指导生产建设项目工程堆积体的水土流失防治。

4 结论

(1)结构体与堆积体的初产历时受土壤特性和下垫面的影响程度较大,均随雨强和场次的增加而减小,与堆积体相比,结构体对径流的产生具有更好的延缓作用。

(2)流速和径流率均随雨强和场次的增加而增大,并随着时间趋于平稳,结构体的平均流速和平均径流率均小于堆积体,结构体流速和径流率快速增加和趋于稳定的时间均较堆积体提前,且用时更短。

(3)雨强和场次均对堆积体和结构体的侵蚀速率、流速和径流率有显著影响,且雨强对侵蚀速率、流速和径流率的贡献率较大;侵蚀速率与雨强呈正相关,与降雨场次呈负相关,不同场次间和不同雨强下结构体的侵蚀速率均大于堆积体,总侵蚀量与雨强和降雨场次的关系和侵蚀速率相似,且总侵蚀量与雨强有较好的线性相关关系。

(4)侵蚀速率分别与径流剪切力、径流功率存在幂函数相关、线性相关关系,结构体的拟合优度大于堆积体,径流功率是描述堆积体和结构体侵蚀动力过程的合理参数,结构体发生侵蚀的临界径流剪切力和径流功率均小于堆积体。

参考文献:

- [1] 王朋冲,孙婕,刘然,等.浅析生产建设项目水土保持监督检查工作方法[J].水土保持应用技术,2022(1):46-49.
- [2] 纪丽静,王文龙,康宏亮,等.黄土区土质与土石质壤土堆积体水力侵蚀过程差异[J].应用生态学报,2020,31(5):1587-1598.
- [3] 王萍,王燕.民勤荒漠—绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2012,28(11):138-145.
- [4] 张文博.土壤结构体对工程堆积体坡面侵蚀产沙及微地形的影响[D].陕西 杨陵:西北农林科技大学,2020.
- [5] 赵暄.生产建设项目弃土堆置体下垫面概化与水土流失

- 特征研究[D].陕西 杨陵:西北农林科技大学,2013.
- [6] 赵喧,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.
- [7] 杨凯.黄土丘陵区生物结皮对土壤结构体稳定性的影响[D].陕西 杨陵:西北农林科技大学,2013.
- [8] 张桃林,潘剑君,赵其国.土壤质量研究进展与方向[J].土壤,1999(1):2-8.
- [9] 周建明,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013:15-25.
- [10] 董盛盛,霍连飞,丁启朔,等.机械耕作土壤结构体的数字图像分析[J].土壤通报,2016,47(5):1102-1106.
- [11] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [12] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(6):1-7.
- [13] 袁和第,信忠保,蒋秋玲,等.连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J].水土保持学报,2020,34(4):14-20,30.
- [14] 吕佼容,张文博,胡锦涛,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.
- [15] Lv J R, Xie Y S, Luo H. Erosion process and temporal variations in the soil surface roughness of spoil heaps under multi-day rainfall simulation[J]. Remote Sensing,2020,12(14):e2192.
- [16] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [17] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报,2018,32(2):134-141.
- [18] 杨帅,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J].农业工程学报,2017,33(15):147-154.
- [19] 方荣杰,朱晓锋,江斌伟,等.模拟降雨条件下岩溶坡耕地产流产沙特征[J].水土保持研究,2018,25(3):11-16.
- [20] 袁建平,蒋定生,甘淑.影响坡地降雨产流历时的因子分析[J].山地学报,1999,17(3):259-264.
- [21] 张文博,吕佼容,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.
- [22] Ban Y Y, Lei T W, Gao Y, et al. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope: Non-frozen soil[J]. Journal of Hydrology,2017,549:525-533.
- [23] 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.
- [24] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J].生态学报,2019,39(17):6545-6556.
- [25] Peng X D, Shi D M, Jiang D et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena,2014,23(123):215-224.
- [26] 王雪松,谢永生.模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J].农业工程学报,2015,31(1):117-124.
- (上接第 52 页)
- [17] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344,397.
- [18] 张思琪,翁应芳.基于 GIS 与 RUSLE 模型的毕节市土壤侵蚀动态变化[J].绿色科技,2018,18:7-10,24.
- [19] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.
- [20] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [21] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator[J]. Technical Bulletin United States Department of Agriculture,1990,4:206-207.
- [22] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluation irregular slopes for soil loss prediction[J]. Transactions of the ASAE,1974,17(2):305-309.
- [23] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers,1987,30(5):13387-13396.
- [24] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.
- [25] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2084-2097.
- [26] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [27] 中华人民共和国水利部.2015 年中国水土保持公报[R/OL].(2017-01-30)[2021-12-01]. <http://www.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/zgstbcgb/2015/mobile/index.html#p=1>.
- [28] 水利部水土保持监测中心.区域水土流失动态监测技术规范(试行)[R/OL].(2018-09-06)[2021-11-10]. https://www.sohu.com/a/252397899_651611.
- [29] 郭乾坤,刘宝元,朱少波,等.中国主要水土保持耕作措施因子[J].中国水土保持,2013(10):22-26.
- [30] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [31] 湖北省水利厅.2020 湖北省水土保持公报[EB/OL].(2021-10-20)[2021-12-01]. <https://slt.hubei.gov.cn/bfw/cxfw/stbcgb/>.
- [32] 陈正发,龚爱民,宁东卫,张刘东,王建雄,相彪.基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.