

降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响

徐相忠^{1,2}, 刘前进^{2,1}, 张含玉²

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358;

2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 为深入理解棕壤垄作坡耕地的土壤侵蚀机理, 利用 1.60 m×0.53 m 的试验土槽, 设计 2 个降雨类型, 即增强型(70~70~100~100 mm/h)和减弱型(100~100~70~70 mm/h), 以及 2 个坡度(9°和 18°)的人工模拟降雨试验。每个雨型分 2 个阶段(阶段 I、阶段 II), 每个阶段进行相同雨强的 2 个场次降雨, 每个场次降雨历时 20 min。结果表明:(1)雨强对径流量呈显著影响($P < 0.05$), 100 mm/h 雨强下的径流量 > 70 mm/h 时的径流量。在减弱型雨型下, 坡度对径流量影响显著($P < 0.05$), 而增强型雨型下在不同阶段坡度对径流量的影响不同。(2)雨强对产沙量的影响显著($P < 0.05$), 在阶段 I 降雨中, 100 mm/h 雨强下 9°和 18°坡面的平均每分钟产沙量分别为 70 mm/h 雨强下的 23.98, 9.07 倍。在 70 mm/h 雨强下, 坡度对产沙量的影响显著($P < 0.05$), 而 100 mm/h 雨强下不同阶段坡度对径流量的影响具有差异性。(3)100 mm/h 雨强在不同雨型中出现的时序对产沙量影响不显著($P > 0.05$); 在 70 mm/h 雨强下, 产沙量整体较小, 基本在 15 g/min 以下。同一雨强在不同雨型中的时序对径流量均存在显著影响($P < 0.05$)。 (4) 总径流量从大到小依次为: 9°减弱型 > 18°减弱型 > 9°增强型 > 18°增强型; 总产沙量从大到小依次为: 18°增强型 > 18°减弱型 > 9°减弱型 > 9°增强型。不同雨型下, 雨强发生改变后, 累计径流量和累计产沙量增加速率和雨强的改变具有一致性。

关键词: 棕壤垄沟; 降雨类型; 坡度; 侵蚀; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0056-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.009

Effects of Rainfall Type and Slope on Runoff and Sediment Yield in Brown Soil Furrow System

XU Xiangzhong^{1,2}, LIU Qianjin^{2,1}, ZHANG Hanyu²

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358; 2. Shandong Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resource and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005)

Abstract: In order to deeply understand the soil erosion mechanism of ridged farmland on brown soil, this paper used a 1.60 m × 0.53 m test soil trough and designed two rainfall types, namely, intensive-type (70~70~100~100 mm/h) and reduced-type (100~100~70~70 mm/h), and artificial simulated rainfall tests on 2 slopes (9° and 18°). Each rainfall type is divided into two phases (phase I, phase II), and two sessions of rainfall of the same raininess at each stage, and each session of rainfall lasts 20 minutes. The results show: (1) Raininess has a significant effect on runoff ($P < 0.05$). Runoff at 100 mm/h rain intensity is greater than 70 mm/h. Under the reduced rainfall type, the slope has a significant effect on runoff ($P < 0.05$), while under the intensive rainfall type, the slope at different stages has different effects on runoff. (2) Raininess has a significant effect on sediment yield ($P < 0.05$). During the rainfall of Phase I, the average sediment yield per minute at 9° and 18° slopes at 100 mm/h raininess was 23.98 times and 9.07 times of 70 mm/h raininess. Under 70 mm/h raininess, the slope has a significant effect on sediment yield ($P < 0.05$), while under 100 mm/h raininess, the slope at different stages has different effects on runoff. (3) The time sequences of 100 mm/h raininess in different rainfall types has no significant effect on sediment yield ($P > 0.05$); under 70 mm/h raininess, the overall sediment yield is smaller, basically below 15 g/min. The time

收稿日期: 2019-12-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571261, 41701311); 山东省高等学校青创人才引育计划项目(QC2019YY144); 山东省自然科学基金项目(ZR2017JL019, ZR2017PD003)

第一作者: 徐相忠(1992—), 男, 山东滕州人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: 865893524@qq.com

通信作者: 刘前进(1979—), 男, 山东安丘人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: Liuqianjin@lyu.edu.cn

sequences of the same raininess in different rainfall types had significant effects on runoff ($P < 0.05$). (4) The total runoff is as follows: 9° reduced-type $>$ 18° reduced-type $>$ 9° intensive-type $>$ 18° intensive-type; the total sediment production is in descending order: 18° intensive-type $>$ 18° reduced-type $>$ 9° reduced-type $>$ 9° intensive-type. Under different rainfall type, after the change of rain intensity, the cumulative runoff and cumulative sediment yield increase rate and the change of rain intensity are consistent.

Keywords: brown soil ditch; rainfall type; slope; erosion; runoff and sediment yield

棕壤是一种地带性土壤,主要分布在辽东半岛、山东半岛及其中、南部等地区,是重要的森林土壤和农业土壤^[1]。垄作将土壤表面由平面型改为波浪型,扩大了地表面积^[2],有利于吸收太阳辐射,提高耕层土壤温度,提高单产^[3],是被广泛应用的重要耕作措施。垄作可影响降雨产流、汇流过程,从而可影响土壤侵蚀过程^[4-5]。棕壤在长期的耕作中形成了紧实的犁底层,由于其透水性较差,加剧了土壤侵蚀,导致水土流失现象严重^[6]。因此,开展棕壤垄沟系统的土壤侵蚀产流产沙规律研究,对棕壤区土壤侵蚀防治具有重要的科学参考意义。

降雨强度和坡度是影响坡面产流产沙的重要因素^[7-9],但在天然降雨过程中,雨强随降雨的历时存在变异性^[10]。因此,量化降雨过程中可变降雨强度的影响,可深入理解径流和土壤流失过程^[11]。郑粉莉等^[12]在东北黑土区顺坡垄作坡耕地研究发现,不同降雨类型对坡面侵蚀量影响差异显著,其中峰值型雨型的侵蚀量是增强型雨型侵蚀量的 1.80 倍;在黄土区侵蚀量最大的是突发型雨型,其次为峰值型和均匀型^[13]。同一雨强出现在降雨过程中的时序不同,对土壤侵蚀的贡献率具有差异性^[14]。安娟等^[15]研究不同雨型褐土横垄产流产沙表明,径流量的大小依次为增加型—减弱型、减弱型、减弱—增加型、增加型;侵蚀量大小依次为增加—减弱型、减弱—增加型、减弱型、增加型。紫色土坡面在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 坡度范围内,产沙量随着坡度的增大而增加;当坡度 $> 30^\circ$ 时,产沙量开始减小^[7]。不同降雨强度和坡度条件下的径流量、产沙量均随着降雨历时而增加^[16];随着雨强增大,坡面径流量和产沙量呈现增加趋势;而随着坡度增大,径流量呈先减小后增加再减小趋势,产沙量变化情况较为复杂^[17];坡度对坡面侵蚀影响的复杂性影响着坡面水土保持措施的有效实施^[18]。

综上,现有的关于降雨类型和坡度对土壤侵蚀的影响研究多集中在黄土、黑土和紫色土等地区,且不同坡面条件下,雨型和坡度对土壤产流产沙的影响具有差异性^[19]。因此,现有产流产沙规律能否反映棕壤地区垄沟系统的侵蚀状况,研究结论是否可用于指导棕壤垄作地区的水土保持工作,需要深入研究。为此,本文设计不同降雨类型和坡度的人工模拟降雨试

验,阐明棕壤垄沟系统的产流产沙过程,以期对棕壤垄作坡面的土壤侵蚀防治提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤为山东省蒙阴县垛庄镇农耕地表层 20 cm 的典型耕作棕壤,砾石含量 22.20%,砂粒含量 71.20%,粉粒含量 28.10%,黏粒含量 0.70%。试验前将土壤自然风干并过 10 mm 筛,以去除其中的杂草和石块。试验于 2018 年 7—8 月在山东省水土保持与环境保育重点实验室人工模拟降雨大厅进行。降雨设备采用下喷式模拟降雨器,均匀系数 > 0.89 。试验所用土槽为 Liu 等^[20]设计的长 1.60 m、宽 1.60 m 的可以调整坡度的可移动土槽,中间用钢板隔成 3 个宽为 0.53 m 的试验土槽,土槽下端设有集流装置以收集径流泥沙。降雨过程中,在土槽接水口上遮盖亚克力板,防止雨水进入接样桶中。

1.2 试验设计与步骤

根据野外土壤容重,确定在土槽下层以 1.60 g/cm^3 的容重进行分层填充,每 5 cm 为 1 层,共填土 4 层,总厚度为 20 cm。然后以 1.20 g/cm^3 的容重修建土垄,垄高为 12 cm。具体填充方法为:根据设定好的土壤填充量,称取土壤倒入土槽,摊平后进行夯实;为防止土层之间出现分层,在每层填装完成后用刮板将表层刮毛。

为研究棕壤垄作地区短历时暴雨条件下的水土流失灾害,根据试验地区多年降雨资料和侵蚀性降雨标准^[15],参考王志伟^[21]和马修京等^[22]雨强设计,设计 2 个雨型,包括 70,100 mm/h 2 种雨强,分别模拟中型和大型暴雨在不同雨型组合下的土壤侵蚀状况。试验设计 2 个处理:降雨类型和坡度。试验采用 2 个雨型:增强型雨型($70 \sim 70 \sim 100 \sim 100 \text{ mm/h}$)和减弱型雨型($100 \sim 100 \sim 70 \sim 70 \text{ mm/h}$),2 个坡度: 9° 和 18° 。每个处理重复 3 次,共计 12 场试验。每个雨型分 2 个阶段(阶段 I、阶段 II)实施,每个阶段进行雨强相同的 2 个场次的降雨,每个场次降雨历时 20 min(表 1),整个降雨过程历时 80 min。降雨试验开始之前,进行时长为 1 h,雨强为 20 mm/h 的预降雨,以使坡面土壤湿润均匀,接近野外农耕地中土壤较湿润时的状态。降雨产流后,开始采集径流样品,时间间隔

为 2 min。称取径流样品重量,待沉淀后,倒掉上层清水,放入 105 °C 的烘箱内烘干,计算泥沙重量。

表 1 人工模拟降雨试验设计

降雨类型	设计坡度/(°)	降雨阶段	降雨场次	雨强/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/min	
增强型	9	阶段 I	第 1 场	70	20	
			第 2 场	70	20	
		阶段 II	第 1 场	100	20	
			第 2 场	100	20	
		18	阶段 I	第 1 场	70	20
				第 2 场	70	20
阶段 II	第 1 场		100	20		
	第 2 场		100	20		
减弱型	9	阶段 I	第 1 场	100	20	
			第 2 场	100	20	
		阶段 II	第 1 场	70	20	
			第 2 场	70	20	
		18	阶段 I	第 1 场	100	20
				第 2 场	100	20
阶段 II	第 1 场		70	20		
	第 2 场		70	20		

2 结果与分析

2.1 降雨类型与坡度对径流量的影响

不同降雨类型和坡度下径流量变化过程较为复杂(图 1)。在阶段 I 降雨中,径流量整体呈增加趋势,第 2 场降雨(20~40 min)开始后的第 2 个 2 min 基本达到或超过了前 1 场降雨的最大径流量,随后基本稳定。在 100 mm/h 雨强下,坡度对径流量的影响显著($P < 0.05$,表 2),第 1 场降雨(前 20 min)中,9°坡面下的径流量增加速度始终大于 18°坡面;在第 2 场降雨(20~40 min)中,径流量基本稳定,不同坡度下径流量差距减小,9°坡面的径流量略高于 18°坡面。在 70 mm/h 雨强下,第 1 场降雨(前 20 min)的径流量差异显著($P < 0.05$,表 2),9°坡面的径流量始终大于 18°坡面,但随着降雨的继续,差距逐渐减小,并在

第 18 min 时达到基本一致;在第 2 场降雨(20~40 min)中,第 24 min 即超过了之前的径流量,随后呈现小幅增加的趋势,但径流量基本稳定。

在阶段 II 降雨中,径流量变化趋势较为平稳(图 2)。在 70 mm/h 下,径流量差异显著($P < 0.05$,表 2),9°坡面的径流量稍大于 18°坡面。但在 100 mm/h 雨强条件下,第 1 场降雨中,不同坡度间的径流量无明显差异($P > 0.05$,表 2),表明坡度对径流量的影响较为复杂^[16]。坡面径流量在土壤前期含水量、地表覆盖和降雨等条件基本相同时,主要受承雨量和水流入渗等因素影响^[23-25]。在降雨前期,由于入渗量的不同,导致不同坡度下径流量存在差异。但随着降雨的持续进行,入渗量也趋于稳定,径流量差异减小。在减弱型雨型中,由于雨强减小,降雨对坡面的扰动能力减小,坡度越小,承雨量越大,因而径流量随之增加。但在增加型雨型中,雨强的增大使得径流对坡面侵蚀加剧,且坡度越大坡面流速越快,水流能够迅速汇集,因而不同坡度间径流量差异不显著^[26]。在整个降雨过程中,降雨强度对径流量的影响显著($P < 0.05$,表 2),坡面径流量随着降雨强度的增大而增大。在 2 个阶段的降雨中,100 mm/h 雨强下的径流量始终 > 70 mm/h 的径流量。这是因为随着雨强的增加,坡面承雨量随之增大,使得径流量增加。

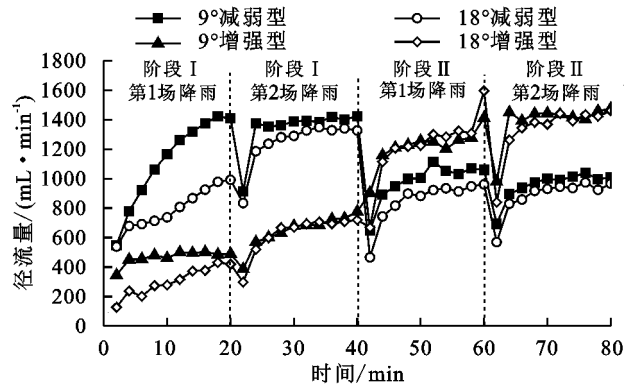


图 1 不同降雨类型和坡度下径流量随降雨历时的变化过程

表 2 降雨类型、坡度对径流量影响的显著性检验

配对样本	阶段 I 第 1 场次降雨		阶段 I 第 2 场次降雨		阶段 II 第 1 场次降雨		阶段 II 第 2 场次降雨	
	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)
9° 100 mm/h~18° 100 mm/h	333.71	0	91.82	0	-8.12	0.82	54.71	0.03
9° 100 mm/h~9° 70 mm/h	660.27	0	694.65	0	234.75	0	435.02	0
9° 100 mm/h~18° 70 mm/h	823.24	0	713.69	0	368.06	0	504.74	0
18° 100 mm/h~9° 70 mm/h	326.56	0	602.82	0	242.87	0	380.31	0
18° 100 mm/h~18° 70 mm/h	489.53	0	621.87	0	376.18	0	450.03	0
9° 70 mm/h~18° 70 mm/h	162.97	0	19.05	0.15	133.31	0	69.72	0

注:根据雨强的不同,每个雨型分 2 个阶段(阶段 I、阶段 II)实施,每个阶段进行雨强相同的 2 个场次的降雨,每个场次降雨历时 20 min;Sig.表示显著性差异水平。下同。

2.2 降雨类型与坡度对侵蚀产沙过程的影响

产沙量是侵蚀产沙过程的重要特征之一^[7]。图

2 为不同降雨类型和坡度下产沙量随时间变化的过程。在阶段 I 降雨中,雨强对产沙量有显著影响($P <$

0.05,表3),70 mm/h雨强下,由于细沟尚未发育,侵蚀量主要来源于坡面表层的松散颗粒物^[27]和雨滴溅蚀产生的泥沙^[7],产沙量总体较小且较为平稳,坡度在18°坡面的产沙量略高于坡度为9°坡面时的产沙量。然而在100 mm/h雨强下,9°和18°坡面平均每分钟产沙量分别为70 mm/h雨强下的23.98,9.07倍,说明降雨强度对产沙量影响显著,雨强越大,产沙量越大^[26,28]。其原因是随着降雨强度的增加,雨滴的溅蚀能力大幅增加,细沟发育明显,导致产沙量迅速增加。不同坡度对产沙量的影响具有差异性,表现在100 mm/h雨强下,坡度对产沙量影响不显著($P > 0.05$,表3),在70 mm/h雨强下,坡度对产沙量影响显著($P < 0.05$,表3)。在第1场降雨(前20 min)中,9°坡面的产沙量高于18°坡面;9°坡面在100,70 mm/h雨强下平均每分钟产沙量分别是18°坡面的1.32,2.49倍。在第2场降雨(20~40 min)中,100 mm/h下18°坡面产沙量波动较大,出现2个波峰。具体表现在降雨开始的第2 min,产沙量达到最大且超过第1场降雨的最大产沙量,为120.48 g/min。这是因为坡面入渗量减小,径流增加,坡度对产沙能力的影响显著。在第24 min后,产沙量开始降低,原因可能是入渗逐渐稳定,结构性结皮形成与细沟发育趋于稳定^[12]。在第32 min时产沙量增加到97.72 g/min,随后逐渐降低,直到降雨结束。这一阶段,结合降雨过程观察发现,这是由于随着细沟侵蚀引起的沟壁坍塌,造成短时间内产沙量迅速增加。9°坡面下的产沙量则比较稳定,此阶段由于细沟发育逐渐平稳,产沙量也随之稳定。

在阶段II降雨中,雨强对产沙量具有显著影响($P < 0.05$,表3)。在70 mm/h雨强下,坡度对产沙量的影响显著($P < 0.05$,表3),但在100 mm/h雨强下,第2场降雨中,坡度对产沙量的影响不显著($P >$

0.05,表3)。由图2可以看出,在100 mm/h雨强下,第1场降雨(40~60 min)中,18°坡面产沙量呈现迅速增加,且每分钟平均产沙量为9°坡面的1.95倍,坡度对产沙量的作用明显。在第46 min时达到最大,为108.57 g/min,随后出现波动下降和上升,在第56 min之后达到稳定状态。原因是随着雨强的增大,对土壤侵蚀能力增加,细沟快速发育,泥沙量迅速增加。在第56 min后细沟发育基本稳定,产沙量趋于平稳。9°坡面呈现出整体增加的趋势,在第50 min时,产沙量达到最大,为62.41 g/min,随后产沙量趋于稳定。在第2场降雨(60~80 min)中,9°和18°坡面产沙量趋势一致,且较为平稳。原因是在此阶段下,由于细沟发育逐渐平稳,产沙量也随之稳定,表明坡度对坡面侵蚀的作用不明显。在70 mm/h雨强下的2场降雨中,产沙量整体较小,且较为平稳,略有减少的趋势。原因是由于前一阶段降雨中,在100 mm/h的大雨强下,雨滴的打击使得土壤表层趋于紧实,密度增加;同时土壤细颗粒逐渐堵塞土壤表层的孔隙,符合结构性结皮出现的条件,从而推断形成了结构性结皮,当雨强变小时,由于雨滴动能和径流剥蚀能力减弱,结皮难以破坏,对坡面的侵蚀能力减弱,坡面产沙量较小^[29-30]。

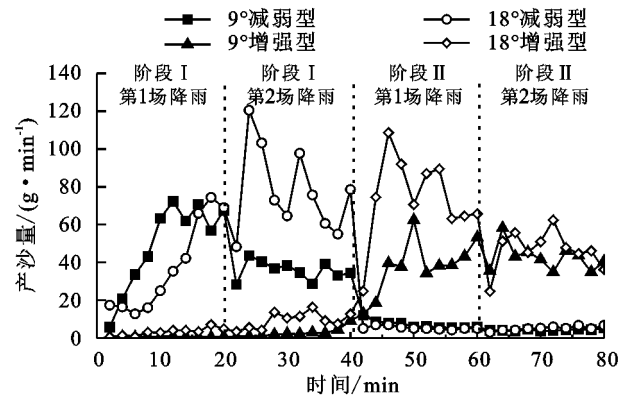


图2 不同降雨类型和坡度条件下产沙量随降雨历时的变化过程

表3 降雨类型、坡度对产沙量影响的显著性检验

配对样本	阶段I第1场次降雨		阶段I第2场次降雨		阶段II第1场次降雨		阶段II第2场次降雨	
	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)	均值	Sig.(双侧)
9° 100 mm/h~18° 100 mm/h	12.11	0.08	-41.96	0	-36.13	0	-4.11	0.28
9° 100 mm/h~9° 70 mm/h	48.88	0	32.91	0	30.78	0	38.15	0
9° 100 mm/h~18° 70 mm/h	46.38	0	26.26	0	32.52	0	37.28	0
18° 100 mm/h~9° 70 mm/h	36.77	0	74.87	0	66.91	0	42.25	0
18° 100 mm/h~18° 70 mm/h	34.27	0	68.22	0	68.65	0	41.39	0
9° 70 mm/h~18° 70 mm/h	-2.50	0	-6.65	0	1.74	0.02	-0.87	0.02

2.3 雨强发生时序对产流量的影响

同一雨强在不同雨型中出现的时序不同对径流量均存在显著影响($P < 0.05$,表4)。说明雨强在不同雨型中发生的时序不同,其坡面产流也不一致^[12]。从图3可以看出,在100 mm/h雨强下的第1场降雨

(前20 min)中,在降雨的前12 min,9°坡面增强型雨型的径流量大于减弱型雨型的径流量,在12 min以后减弱型雨型的径流量略大于增强型雨型。18°坡面增强型雨型的平均径流量为减弱型雨型平均径流量的1.53倍。在第2场降雨(后20 min)中,增

强型雨型的径流量略大于减弱型雨型。在 70 mm/h 的雨强下, 9°坡面和 18°坡面增强型雨型的平均径流

量为 9°坡面和 18°坡面减弱型雨型平均径流量的 1.74, 1.86 倍。

表 4 雨强发生时序对产流量影响的显著性检验

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	配对样本	成对差分			<i>t</i>	<i>df</i>	Sig.(双侧)
		均值	标准差	均值的标准误			
100	9°减弱型~9°增强型	-69.01	140.01	31.31	-2.20	19	0.04
	18°减弱型~18°增强型	-258.48	200.66	44.87	-5.76	19	0
70	9°减弱型~9°增强型	-411.58	125.10	27.97	-14.71	19	0
	18°减弱型~18°增强型	-401.08	159.73	35.72	-11.23	19	0

注: *t* 表示 *t* 检验值; *df* 表示自由度; Sig. 表示显著性差异。

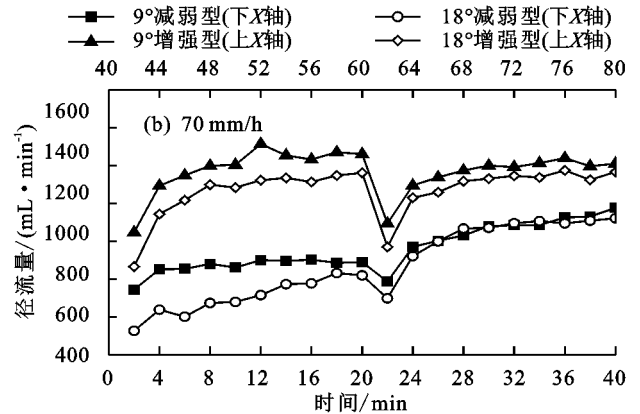
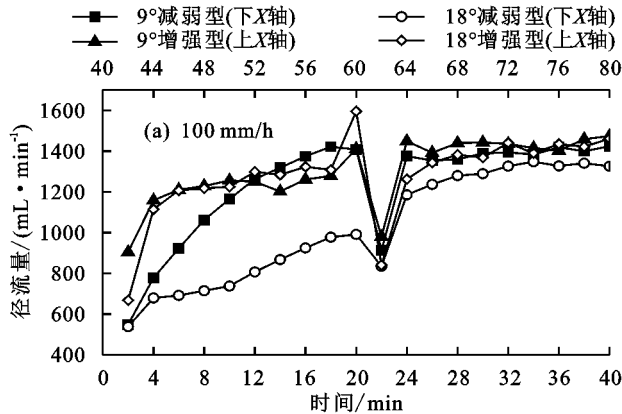


图 3 不同雨强发生时序条件下径流量随降雨历时的变化过程

2.4 雨强发生时序对产沙量的影响

同一雨强在不同雨型中出现的时序不同, 产沙量也会存在一定差异^[30]。通过分析 100 mm/h 雨强在不同雨强发生时序的降雨过程发现, 同一雨强在不同雨型中出现的时序不同对产沙量影响不显著 ($P > 0.05$, 表 5)。这是由于该降雨强度下雨滴侵蚀能力和径流搬运能力大, 因此不论发生在什么阶段, 都能分散搬离土壤, 增大侵蚀量^[12]。由图 4 可知, 在第 1 场降雨的前 10 min, 在 9°坡面条件下, 产沙量趋势基本一致, 随后减弱型降雨的产沙量基本达到稳定, 而增强型降雨的产沙量开始下降, 在 12 min 后趋于稳定状态, 说明在 100 mm/h 雨强条件下, 雨强时序对 9°坡面的坡面侵蚀产沙影响较小。在 18°坡面下, 增强型降雨的产沙量大于减弱型降雨, 在 16 min 时不同雨型的产沙量基本达到一致。在第 2 场降雨(后 20 min)中, 在 9°坡面下, 坡面产沙量基本一致。而在 18°坡面下, 减弱型降雨的产沙量要超过增强型降雨, 在第 18 min 时不同雨型的产沙量基本一致。这是由

于减弱型降雨开始时对坡面的侵蚀能力较弱, 但随着细沟迅速发育, 侵蚀能力增强, 产沙量也迅速增加; 而增强型降雨由于雨强的增大, 对坡面的扰动能力增强, 产沙能力增强^[31], 但在降雨后期, 由于结构性结皮等出现, 坡面产沙趋于稳定。

在 70 mm/h 雨强下, 产沙量整体波动不大, 基本在 15 g/min 以下。分析发现, 在 9°坡面下减弱型降雨的产沙量始终高于增强型降雨, 降雨时序对坡面产沙的影响显著 ($P < 0.05$, 表 5)。在 18°坡面下, 雨强发生时序对产沙量影响不显著 ($P > 0.05$, 表 5), 在第 1 场降雨(前 20 min)中, 减弱型降雨的产沙量大于增强型降雨, 在 12 min 时基本达到平衡。在第 2 场降雨(后 20 min)中, 增强型降雨的产沙量高于减弱型降雨。这是由于在第 1 场降雨中, 增强型降雨的起始阶段, 对坡面的侵蚀能力较弱。但在第 2 场降雨中, 随着降雨的持续, 侵蚀能力增强, 产沙量增加。但减弱型降雨由于雨强的减小, 对坡面的扰动能力减弱, 坡面产沙趋于稳定。

表 5 雨强发生时序对产沙量影响的显著性检验

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	配对样本	成对差分			<i>t</i>	<i>df</i>	Sig.(双侧)
		均值	标准差	均值的标准误			
100	9°减弱型~9°增强型	2.51	14.75	3.30	0.76	19	0.46
	18°减弱型~18°增强型	-3.79	43.81	9.80	-0.39	19	0.70
70	9°减弱型~9°增强型	3.92	3.27	0.73	5.36	19	0
	18°减弱型~18°增强型	-1.09	4.57	1.02	-1.07	19	0.30

注: *t* 表示 *t* 检验值; *df* 表示自由度; Sig. 表示显著性差异。

2.5 降雨类型与坡度对累计产流产沙量的影响

随着降雨时间的增加,减弱型雨型的累计径流量和累计产沙量增速呈现出先快后慢的趋势,而增强型雨型则相反(图 5)。总径流量从大到小依次为:9°减弱型>18°减弱型>9°增强型>18°增强型(图 5a);总产沙量从大到小依次为:18°增强型>18°减弱型>9°减弱型>9°增强型(图 5b)。

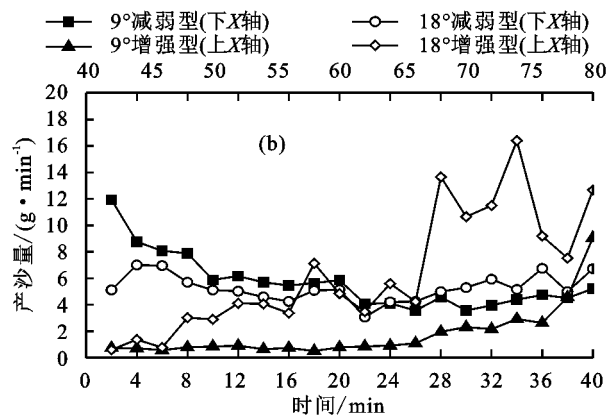
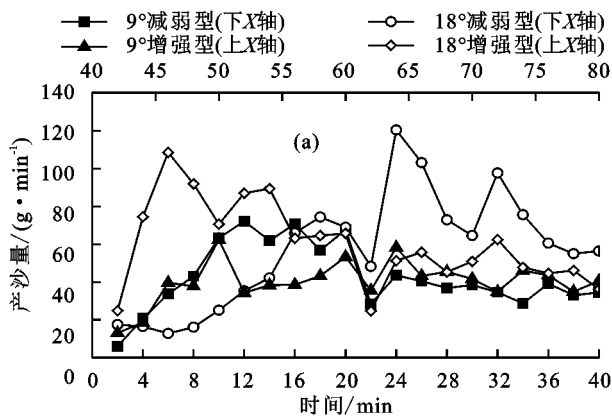


图 4 不同雨强发生时序条件下产沙量随降雨历时的变化过程

通过分析累计径流量变化可以看出,在相同雨型条件下,坡度越小,累计径流量越大,但径流量差距较小。9°坡面在减弱型雨型和增强型雨型下的累计径流量分别是 18°坡面的 1.17, 1.07 倍。在相同坡度下,减弱型雨强的累计径流量在 9°, 18°坡面下分别是增强型雨强的 1.18, 1.08 倍。

由图 5b 可知,在 9°坡面下,减弱型雨强的产沙量大于增强型雨强,是其产沙量的 1.15 倍。在 18°坡面下,增强型产沙量是减弱型的 1.06 倍,不同雨型下累计产沙量差异较小,原因可能本试验设计的 2 种雨型在总降雨过程中雨量相同,与前人^[12,14-15]设计的雨量不同的试验有差异。坡度对累积产沙量的影响较为显著,18°坡面中 2 种雨型下的总产沙量均超过 9°坡面。在减弱型雨型下,18°坡面产沙量在第 24 min 时已经超过了 9°坡面,其总产沙量是 9°坡面 1.30 倍。在增强型雨型下,

18°坡面的产沙量始终大于 9°坡面,总产沙量是 9°坡面 1.59 倍,并在第 62 min 时,18°增强型的累计产沙量已经超过了 9°减弱型,说明在此降雨时间下,不论何种雨型,坡度越大,产沙量越大^[32]。

通过对不同雨型和坡度下的累计产沙量和累计径流量进行函数拟合发现,累计产沙量和累计径流量呈现出幂函数关系,表达式为 $Y = Ax^B$ 。式中:Y 为累计产沙量;x 为累计径流量^[17,27];A 为产沙基数系数,A 值越大,则产沙量越大,增强型雨型在 9°, 18°坡面下产沙量分别是减弱型雨型的 1 130, 65 倍;B 为产沙速率系数,系数 B 的大小取决于入渗率,入渗率越小则 B 值越小,产沙量越大^[27],增强型雨型在 9°, 18°坡面下产沙速率分别是减弱型雨型的 1.78, 1.33 倍。所有拟合的函数相关系数均在 0.92 以上(表 6),说明二者具有很好的相关性。

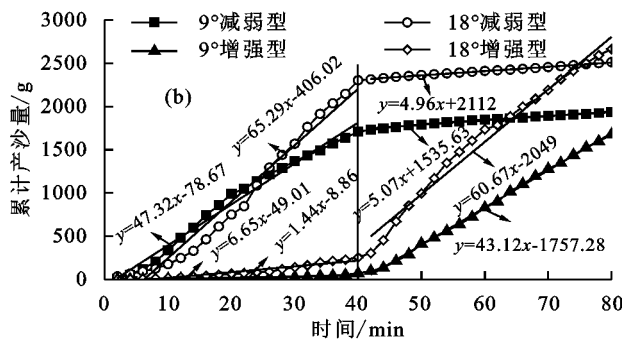
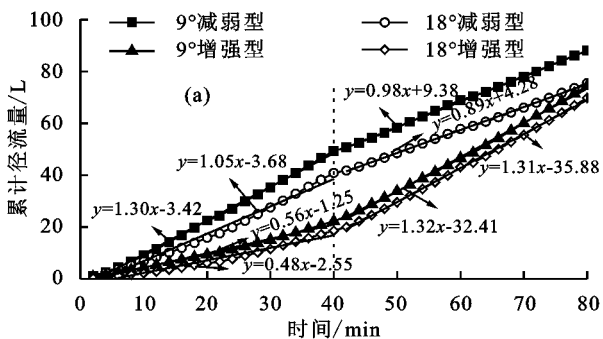


图 5 不同降雨类型和坡度条件下随降雨历时的累计产流产沙量

3 结论

(1)不同雨型和坡度条件下径流量随降雨历时的变化过程不同。在整个降雨过程中,降雨强度对径流

量的影响显著($P < 0.05$), 100 mm/h 雨强下的径流量始终大于 70 mm/h 时的径流量。在减弱型雨型下,坡度对径流量影响极显著($P < 0.01$),而增强型

雨型在不同阶段对径流量的影响不同。

(2)不同雨型和坡度条件下产沙量随降雨历时的变化过程存在显著差异。不同坡度下,雨强对产沙量的影响显著($P < 0.05$)。在阶段 I 降雨中,100 mm/h 雨强下 $9^\circ, 18^\circ$ 坡面的平均每分钟产沙量分别为 70 mm/h 雨强下的 23.98, 9.07 倍。在 70 mm/h 雨强下,坡度对产沙量的影响显著($P < 0.05$),而 100 mm/h 雨强中不同阶段坡度对径流量的影响有差异。

表 6 不同雨型和坡度下累计产沙量(Y)和
累计径流量(x)的关系

雨型	坡度/ $^\circ$	幂函数拟合方程	R^2
减弱型	9	$Y = 0.0226x^{1.03}$	0.93
	18	$Y = 0.0130x^{1.12}$	0.96
增强型	9	$Y = 2E - 06x^{1.83}$	0.92
	18	$Y = 0.0002x^{1.49}$	0.99

(3)同一雨强在降雨过程中出现的时序不同,对产流产沙量的影响不同。在 100 mm/h 雨强下,雨强发生时序对产沙量影响不显著($P > 0.05$),在 70 mm/h 雨强下,产沙量整体较小,基本在 15 g/min 以下。在 9° 坡面下雨强发生时序对坡面产沙的影响显著($P < 0.05$),但在 18° 坡面下,雨强发生时序对产沙量影响不显著($P > 0.05$)。同一雨强在不同雨型中出现的时序不同对径流量均存在显著影响($P < 0.05$)。

(4)总径流量从大到小依次为: 9° 减弱型 $>18^\circ$ 减弱型 $>9^\circ$ 增强型 $>18^\circ$ 增强型;总产沙量从大到小依次为: 18° 增强型 $>18^\circ$ 减弱型 $>9^\circ$ 减弱型 $>9^\circ$ 增强型。在减弱型雨型下,雨强减弱后, $9^\circ, 18^\circ$ 坡面累计径流量增加速率分别减少 24.62% 和 15.24%,累计产沙量增加速率分别减少 89.29% 和 92.40%;在增加型雨型下,雨强增大后, $9^\circ, 18^\circ$ 坡面累计径流量增加速率分别增加 135.71% 和 172.92%,累计产沙量增加速率分别增加 2894.44% 和 812.33%。

参考文献:

[1] 张颖,赵庚星,王卓然,等.山东棕壤耕地地力评价及其特征分析[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):359-366.

[2] 薛亮,马志明,吕晓东,等.垄作沟灌栽培技术的研究进展[J].甘肃农业科技,2019(3):78-82.

[3] 倪东宁,史海滨,李瑞平,等.春玉米覆膜垄作沟灌条件下土壤水热效应及对产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(2):89-94.

[4] Gupta G N. Rain-water management for tree planting in the Indian Desert [J]. Journal of Arid Environments, 1995,31:219-235.

[5] 孙玉泉,田媛,苏德荣.地面不同垄沟形式对径流调控机制的研究[J].中国沙漠,2005(6):118-123.

[6] 阎鹏,徐世良.山东土壤[M].北京:中国农业出版社,1994.

[7] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.

[8] Wu L, Peng M, Qiao S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25 (4):3480-3487.

[9] Qian F, Cheng D, Ding W, et al. Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016,64(3):237-245.

[10] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on run off and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012,99:1-8.

[11] Frauenfeld B, Truman C. Variable rainfall intensity effects on runoff and interrill erosion from two coastal plain ultisols in Georgia[J]. Soil Science, 2004,169(2):143-154.

[12] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.

[13] 郑粉莉,唐克丽,白红英,等.子午岭林区不同地形部位开垦裸露地降雨侵蚀力的研究[J].水土保持学报,1994(1):26-32.

[14] 郭铃莉,王云琦,王晨洋,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.

[15] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横垄坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.

[16] 郭星星,吕春娟,陈丹,等.降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):23-29.

[17] 李洪丽,韩兴,张志丹,等.东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J].水土保持学报,2013,27(4):49-52,57.

[18] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.

[19] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.

[20] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. Soil and Tillage Research, 2014,136:1-8.

[21] 王志伟.沂蒙山区坡耕地土壤侵蚀过程模拟[D].山东泰安:山东农业大学,2014.

[22] 马修京,吕英,韩存宝.沂蒙山区棕壤土侵蚀产流产沙过程及特征[J].山东水利,2014(8):36-37.

- [12] 唐敏,许文来,郭宗会.施肥过程中尿素的迁移与转化研究[J].绿色科技,2017(6):59-61.
- [13] 李京玲,陈攀,孙西欢,等.蓄水坑灌肥液入渗下土壤水氮运移特性试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(10):56-61.
- [14] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.
- [15] 聂卫波,马孝义,聂坤堃,等.沟灌土壤湿润体空间矩特征参数估算模型[J].水科学进展,2017,28(6):829-838.
- [16] 鲁程鹏,束龙仓,刘丽红,等.基于灵敏度分析的地下水数值模拟精度适应性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):26-30.
- [17] 范严伟,赵文举,毕贵权.Van Genuchten 模型参数变化对土壤入渗特性的影响分析[J].中国农村水利水电,2016(3):52-56.
- [18] Lu X H, Jin M G, van Genuchten M T, et al. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China[J].Ground Water,2011,49(2):286-294.
- [19] 王志涛,缴锡云,韩红亮,等.土壤垂直一维入渗对 VG 模型参数的敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):80-84.
- [20] 刘昭,杨文元,查元源,等.基于田块尺度含水率观测的土壤水力参数多模型反演[J].农业工程学报,2015,31(6):135-144.
- [21] 仵峰,张凯,宰松梅,等.小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):101-105.
- [22] 董晓华,郭梁锋,马海波,等.尿素浓度对土壤水分特征曲线及持水性的影响研究[J].节水灌溉,2018(1):45-47,51.
- [23] 霍思远,靳孟贵, Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J].地球科学,2017,42(3):447-452,470.
- [24] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].土壤,2019,51(2):381-389.
- [25] 高志鹏,屈吉鸿,陈南祥,等.一维水流及溶质运移对 VG 模型参数的敏感性分析[J].节水灌溉,2017(11):65-71,76.
- [26] 张海阔,姜翠玲,李亮,等.基于 HYDRUS-1D 模拟的变水头入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):32-40.
- [27] 聂坤堃,聂卫波,白清俊.沟灌肥液入渗硝态氮运移特性数值模拟及影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(17):128-139.
- [28] 董晓华,郭梁锋,马海波,等.尿素浓度对土壤水分特征曲线及持水性的影响研究[J].节水灌溉,2018(1):45-47,51.
- [29] 冯场.不同水肥热条件下土壤水分运动参数与氮素转化参数研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [30] 何振嘉,傅渝亮,王博,等.涌泉根灌不同浓度肥液入渗特性及土壤湿润体模型研究[J].农业工程学报,2018,34(24):90-99.
- [31] 何振嘉,傅渝亮.涌泉根灌湿润体水氮运移特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):73-79.
- [32] 刘小刚,朱益飞,余小弟,等.不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性[J].农业机械学报,2017,48(7):189-197.
- (上接第 62 页)
- [23] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):18-22,72.
- [24] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [25] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [26] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.
- [27] 汤珊珊,李占斌,李聪,等.模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):139-146.
- [28] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.
- [29] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.
- [30] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J].水利学报,2012,43(9):1084-1091.
- [31] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.
- [32] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.