

天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程

张晶玲, 周丽丽, 马仁明, 米彩红, 许秀泉

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 试验以天然降雨为侵蚀动力, 采用标准径流小区法, 对比研究了连续型降雨与间歇型降雨条件下横垄与顺垄玉米径流形成和泥沙迁移规律。结果表明: 连续型降雨产流过程形态呈“W”或倒“V”形, 产沙形态呈“W”或“M”形; 顺垄产流与产沙时间长度一致, 产流总量和产沙总量分别是横垄的 1.66~5.80 倍和 5.02~5.52 倍; 顺垄与横垄产流产沙峰值差异显著, 仅横垄与雨强存在错峰现象, 延后 1 min。间歇型降雨产流形态为倒“V”形, 产沙形态呈倒“V”或“M”形; 顺垄产流和产沙总量分别是横垄的 1.83 倍和 2.32 倍; 首次产流量占总量的 70% 以上, 产沙量占总量的 94%~100%, 且横垄和顺垄与雨强均存在错峰现象, 顺垄产流和产沙量较雨强延后 1~4 min, 横垄延后 1 min; 除首次产流外, 其余产流产沙过程时间较短均无错峰现象。天然降雨条件下, 横垄与顺垄产流产沙过程较为复杂, 研究结果可为区域坡地水土流失防治及水土资源管理利用提供理论依据。

关键词: 天然降雨; 产流过程; 产沙过程; 连续型降雨; 间歇型降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0114-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.018

Runoff and Sediment Yield Process on Longitudinal and Cross Ridge Slopes Under Natural Rainfall

ZHANG Jingling, ZHOU Lili, MA Renming, MI Caihong, XU Xiuquan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866)

Abstract: In this experiment, the natural rainfall was taken as the erosion power and the standard runoff plot method was used to study the formation of runoff and sediment transport in the longitudinal and cross ridge slope tilled with maize. Results showed that under continuous rainfall conditions, the process of runoff appeared as a “W-type” or an “inverted V-type”, and the sediment formation as a “W-type” or “M-type”. The time length of runoff and sediment yield was the same on the longitudinal ridge, and the total runoff and sediment yield were 1.66~5.80 times and 5.02~5.52 times of those on cross ridge, respectively. There was a significant difference between the peaks of runoff and sediment yield on longitudinal and cross ridges, and the peak phenomenon was found only between cross ridge and rainfall intensity, and 1 min was delayed. The process of runoff appeared as an “inverted V-type” under intermittent rainfall, and the sediment formation were an “inverted V-type” or “M-type”. The runoff and sediment yield on longitudinal ridge were 1.83 times and 2.32 times higher than those on cross ridge, and the first runoff accounted for more than 70% of the total, the sediment yield accounted for 94%~100% of the total. Both cross and longitudinal ridges had the peak phenomenon with rainfall intensity, and the runoff and sediment yield were delayed by 1~4 min with rainfall intensity on longitudinal ridge, 1 min on cross ridge. However, there was no peak phenomenon in the rest of rains. Under natural rainfall, the process of runoff and sediment yield was complicated on the longitudinal and cross ridge slopes. These findings could provide a theoretical basis for the prevention and control of soil erosion and the management of water and soil resources in regional sloping fields.

Keywords: natural rainfall; runoff process; sediment yield process; continuous rainfall; intermittent rainfall

坡耕地是土壤侵蚀的主要策源地, 横垄和顺垄作为坡耕地最常见的耕作方式, 可明显改变坡面径流及产沙过程。绝大部分学者证实横垄减少水土流失的

效果明显优于顺垄^[1-2]。近年来, 关于人工降雨模拟条件下横垄和顺垄坡面产流产沙过程研究已经取得不少成果。边锋等^[3]发现坡面水流流速增加和细沟

收稿日期: 2017-04-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471225); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014054)

第一作者: 张晶玲(1993—), 女, 满族, 辽宁北镇人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀规律研究。E-mail: 2512863471@qq.com

通信作者: 周丽丽(1979—), 女, 汉族, 黑龙江宾县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀和流域治理研究。E-mail: zhoulilia@163.com

侵蚀发生是导致顺坡垄作坡面土壤侵蚀增加的主要原因。罗键等^[4]发现雨型对横垄坡面产流量的影响高于对产沙量的影响,递增降雨易促进土壤侵蚀的发生。由于天然降雨具有随机性,因此与人工模拟降雨比较,坡面产流产沙过程存在差异,一般将天然降雨划分为连续型降雨和间歇型降雨。李毅等^[5]将间隔时间小于 1 h 的 2 次降雨定义为间歇降雨,而连续型和间歇型降雨条件下的试验一般采用人工模拟方法。傅斌等^[6]发现连续降雨过程中,雨强是影响地表产流的重要因素,径流含沙量变化过程较为复杂,总体上呈增长趋势,在部分时段可能减小。张亚丽等^[7]通过 2 场间隔 24 h 的室内模拟降雨试验,发现间歇式降雨黄土坡面第 2 场的径流量和泥沙量均大于第 1 场降雨。张辉等^[8]采用多场次降雨试验,对覆沙坡面的产流产沙特性进行研究,发现首次降雨,覆沙坡面产沙量较大,产沙过程较剧烈,首场降雨产沙量占总产沙量的 70% 以上。蒋芳市等^[9]研究多场次降雨条件(1.00,1.67,2.33 mm/min 分别降 3 次雨)对崩积体细沟侵蚀产沙过程影响,发现 1.00 mm/min 雨强下,3 次降雨的后期产沙过程趋于一致。上述主要针对模拟降雨条件横垄与顺垄产流产沙量、2~3 次降雨坡面产流产沙特征等方面进行研究,然而到目前为止,关于间歇型和连续型天然降雨条件下,横垄和顺

垄坡面侵蚀过程研究还较少。因此本试验以横垄和顺垄坡面为研究对象,观测天然降雨过程中坡面产流产沙过程,旨在为坡耕地水土流失防治及水土资源优化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在辽宁省沈阳市苏家屯区的前陡监测场完成,该地区属于土石质低山丘陵区,多年平均气温为 8℃ 左右,多年平均降水量为 735 mm。土壤为棕壤,平均厚度为 30~100 cm,有机质含量为 15.9 g/kg,速效钾含量为 91.0 mg/kg,速效磷含量为 11.0 mg/kg,速效氮含量为 109.2 mg/kg。径流小区垂直投影面积 100 m²(长 20 m、宽 5 m),坡度为 10°。径流场上部及两侧设置水泥板材质的围埂,下部设集水槽和引水槽,引水槽末端设径流泥沙收集设备。小区种植玉米,种植密度为 4~5 株/m²,5 月初种植,按照当地农耕经营方式管理。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨观测 采用自动气象站对降雨时间、降雨历时、降雨量、降雨强度等指标进行测定。试验观测 2016 年 7 月 20 日—8 月 30 日的逐次降雨,具体降雨情况见表 1。

表 1 降雨情况记录

日期(年-月-日)	降雨量/mm	平均雨强/(mm·min ⁻¹)	最大雨强/(mm·min ⁻¹)	降雨类型
2016-07-21	67.0	0.08	1.4	间歇型(3 次产流)
2016-07-22	28.0	0.04	1.2	连续型
2016-07-25	49.2	0.04	2.0	间歇型(2 次产流)
2016-07-26	25.2	0.03	0.4	断续型未产流
2016-08-01	5.2	0.02	0.2	断续型未产流
2016-08-02	0.2	0.10	0.2	断续型未产流
2016-08-07	16.4	0.05	0.6	断续型未产流
2016-08-13	24.6	0.06	1.0	连续型
2016-08-18	7.6	0.01	0.2	断续型未产流
2016-08-19	11.4	0.01	0.2	断续型未产流

1.2.2 径流与泥沙观测 降雨期间,从引水槽末端有径流开始用秒表计时。坡面径流泥沙样在产流初期 1 min 接取 1 次,之后取样间隔延长至 2~6 min,径流时间较长时延长至 10 min 以上,直至径流结束,记录时间。降雨结束后,用置换法测定样品的泥沙量作为该时段的产沙量。

1.2.3 数据处理方法 采用 Microsoft Excel 2003 软件对试验数据进行常规统计分析,并采用 SPSS 18.0 统计软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 径流泥沙总量分析

由表 2 可知,连续型降雨共产流 2 场,均产沙。第 1 场降雨,顺垄产流时间长度与横垄基本一致,产沙时间长度、径流总量、泥沙总量远远高于横垄,分别

是横垄的 2.59,1.66,5.02 倍。第 2 场降雨,顺垄产流和产沙时间长度均长于横垄 9 min,顺垄产流总量和产沙总量分别为横垄的 5.80 倍和 5.52 倍。2 场降雨顺垄产流与产沙时间长度一致。

间歇型降雨共产流 2 场。第 1 场降雨,横垄未产流,顺垄产流 3 次,产沙 2 次;顺垄第 1 次产流时间长度为 12 min,第 2 次减小至 2 min,第 3 次也仅为 5 min;第 1 次产流量和产沙量分别占该场总量的 70% 和 94%。第 2 场降雨与第 1 场降雨存在明显差异,第 2 场降雨横垄和顺垄均产流 2 次,但第 2 次均未产沙;第 1 次产流,横垄和顺垄产流时间长度分别为 14 min 和 15 min,基本一致;第 2 次产流,横垄产流时间长度为 6 min,顺垄为 9 min,时间相差 3 min;横垄和顺垄第 1 次产流总量占总量比例为 99% 和 97%;顺垄产流和产沙总量分别是横垄的 1.83 倍和 2.32 倍。

表 2 产流产沙总量

雨型	时间 (年-月-日)	场次	产流 时长/min	产沙 时长/min	产流 总量/L	产沙 总量/g	各次产流量占 总量比例/%	各次产沙量占 总量比例/%
连续型降雨	2016-07-22	C ₁	43	17	1.93	5.65		
	第 1 场	L ₁	44	44	3.20	28.39		
	2016-08-13	C ₂	22	22	0.29	3.45		
	第 2 场	L ₂	31	31	1.68	19.04		
间歇型降雨	2016-07-21	L ₁₁	12	5	0.41	2.50	70	94
		L ₁₂	2	2	0.05	0.17	10	6
		L ₁₃	5	0	0.16	0.00	20	0
		L ₁ 总	19	7	0.62	2.67	100	100
		C ₂₁	14	14	4.32	31.6	99	100
	2016-07-25	C ₂₂	6	0	0.03	0.00	1	0
		C ₂ 总	20	14	4.35	31.60	100	100
		第 2 场	15	15	7.77	73.30	97	100
		L ₂₂	9	0	0.21	0.00	3	0
		L ₂ 总	24	15	7.98	73.30	100	100

注:L为顺垄;C为横垄;L_{xy}和C_{xy}中,x为降雨场数,y为降雨次数。

2.2 横垄和顺垄产流过程分析

2.2.1 连续型降雨产流过程分析 由图 1 可知,连续型降雨第 1 场产流呈“W”形,横垄和顺垄谷值基本一致,峰值存在显著差异,顺垄峰值远远大于横垄,峰值分别为 0.29,0.12 L,是横垄的 2.4 倍;雨强与顺垄产流量在 11 min 时达到峰值,1 min 之后横垄达到

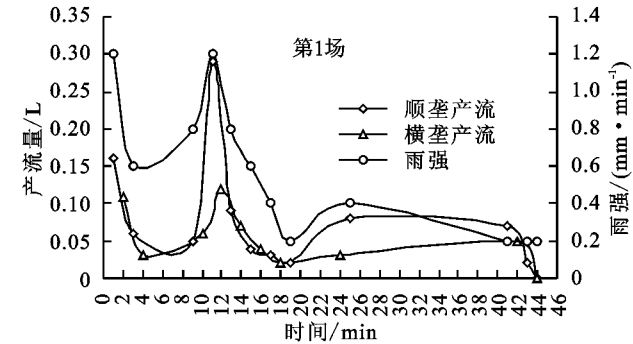


图 1 连续型降雨第 1 场和第 2 场产流过程

为了分析连续型降雨横垄产流过程与雨强的错峰现象,将 2 场降雨产流量与雨强作相关性分析。由表 3 可知,2 场降雨,顺垄产流量与雨强相关系数分别为 0.811 和 0.719,在 0.01 水平上呈显著正相关,无错峰现象。横垄与顺垄存在差异,将雨强延后 1 min,雨强与横垄产流量相关系数分别提高至 0.719* 和 0.708**,在 0.05 和 0.01 水平上呈显著正相关,可见雨强与横垄产流量存在明显错峰现象。

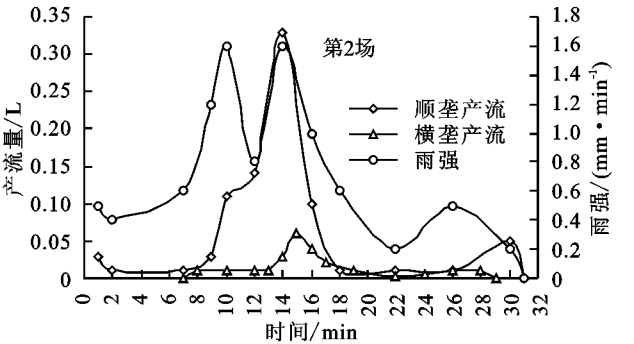
表 3 连续型降雨雨强与产流量相关性

降雨时期		雨强与顺 垄产流量	N	雨强与横 垄产流量	N
第 1 场	降雨初始值	0.811**	12	0.646*	10
	雨强延后 1 min	—	12	0.719*	10
第 2 场	降雨初始值	0.719**	13	0.575*	14
	雨强延后 1 min	—	13	0.708**	14

注:*表示在 0.05 水平上显著相关;**表示在 0.01 水平上显著相关;N 表示样本量。下同。

峰值。

第 2 场产流与第 1 场不同,产流过程呈倒“V”形,横垄和顺垄谷值均较小,峰值差异显著,顺垄与横垄峰值分别为 0.33,0.06 L,顺垄峰值是横垄的 5.5 倍;雨强和顺垄产流量达到峰值的时间一致为 14 min,横垄延后 1 min。



2.2.2 间歇型降雨产流过程分析 为了便于分析间歇型降雨产流过程,将各次产流绘制在同一幅图上,各次产流图中间距为 2 min,而第 1 场降雨 3 次产流实际间隔为 4 h 26 min 和 3 h 2 min,第 2 场降雨 2 次产流顺垄和横垄的实际间隔为 10 h 26 min 和 10 h 30 min。由图 2 可知,间歇型降雨过程中第 1 场降雨,横垄未产流,顺垄产流 3 次,3 次产流形态均呈倒“V”形;第 1 次产流,雨强和顺垄产流量峰值差异明显,顺垄产流峰值延后 4 min;第 2 次和第 3 次产流量与雨强峰值基本一致。第 2 场降雨与第 1 场降雨存在明显差异,横垄和顺垄均产流 2 次;第 1 次产流过程呈不明显的倒“V”形,横垄与顺垄峰值差异明显,雨强在第 4 min 时达到峰值,5 min 时顺垄达到峰值,1 min 之后横垄达到峰值;雨强在 6 min 和 8 min 再次达到谷值和峰值,横垄相应延后 2 min 也达到谷值和峰值;第 2 次产流较小,横垄和顺垄产流无明显的峰值过程。

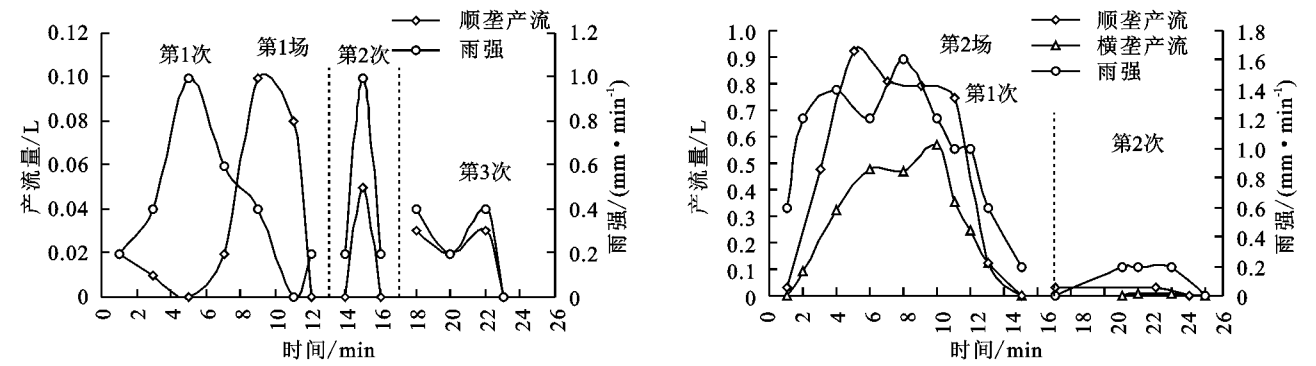


图 2 间歇型降雨第 1 场和第 2 场产流过程

间歇型降雨产流过程中存在错峰现象,将产流量与雨强作相关性分析。由表 4 可知,第 1 场降雨,第 1 次产流顺垄与雨强的相关系数为 -0.319 ,当雨强延后 4 min,相关系数增加至 0.873^* ,错峰现象显著,第 2 次和第 3 次相关系数为 0.890^* ,在 0.01 水平上显著正相关,无错峰现象。第 2 场降雨,第 1 次产流雨强延后 1 min,雨强与横垄产流量相关系数提高至 0.926^{**} ;雨强延后 2 min,顺垄与雨强相关系数提高至 0.793^* ,表明横垄和顺垄产流量与雨强均存在错峰现象;第 2 次产流时间长度偏短,产流量较小,峰值过程和错峰现象均不明显。

表 4 间歇型降雨雨强与产流量相关性

	降雨时期	雨强与顺垄产流量	N	降雨时期	雨强与横垄产流量	N
第 1 场	第 1 次降雨初始值	−0.319	7			
	雨强延后 4 min	0.873 *	7			
	第 2、3 次降雨初始值	0.890 * *	7			
第 2 场	第 1 次降雨初始值	0.572	8	第 1 次降雨初始值	0.753 *	10
	雨强延后 2 min	0.793 *	8	雨强延后 1 min	0.926 * *	10
	第 2 次降雨初始值	0.500	3	第 2 次降雨初始值	0.577	4

2.3 横垄和顺垄产沙过程分析

2.3.1 连续型降雨产沙过程分析 由图 3 可知,连续型降雨第 1 场产沙过程呈“W”形,顺垄与横垄谷值基本一致,峰值存在差异,顺垄产沙峰值分别为 4.5 g,横垄产沙峰值约为 0.36 g,顺垄产沙峰值约是横垄的 12.5 倍;雨强、横垄、顺垄在 11 min 时达到峰值。第 2 场产沙与

第 1 场存在显著不同,顺垄产沙过程呈“M”形,但横垄产沙呈不规则“M”形,峰值和谷值差异明显,顺垄与横垄产沙谷值分别为 1.98 g 和 0.00 g,产沙峰值分别为 3.72 g 和 0.67 g,顺垄产沙峰值是横垄的 5.55 倍;雨强、横垄、顺垄在 12 min 时达到谷值,雨强与顺垄 14 min 时再次达到峰值,1 min 后横垄达到峰值。

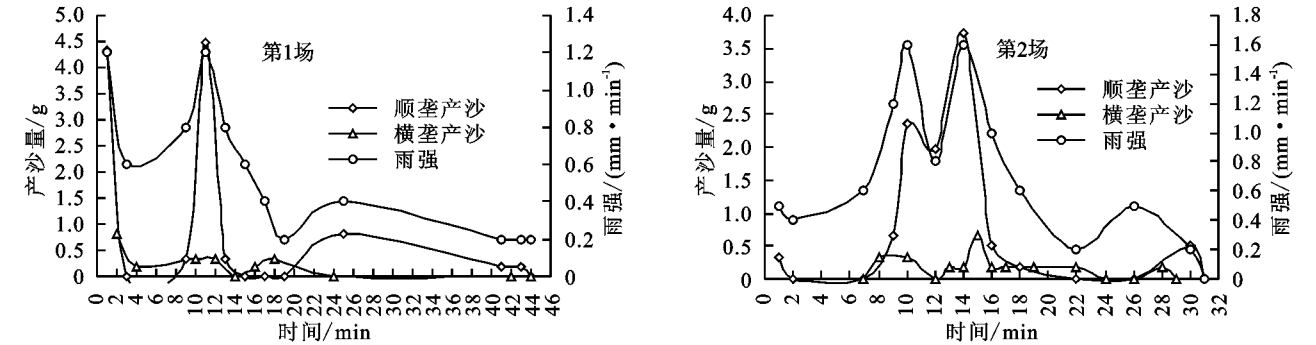


图 3 连续型降雨第 1 场和第 2 场产沙过程

由表 5 可知,连续型降雨 2 场降雨,顺垄产沙量与雨强相关系数分别为 0.809^{**} 和 0.800^* ,无错峰现象。第 1 场降雨,横垄产沙量与雨强的相关系数为 0.830^* ,无错峰现象。第 2 场降雨,横垄产沙量与雨强相关性较好为 0.527 ,但产沙峰值较雨强峰值延后 1 min,然而将雨强延后 1 min,其相关系数却降低为 0.478 。

第 2 次的 5.9 倍;第 1 次顺垄产沙较雨强延后 4 min,第 2 次不存在错峰现象。第 2 场降雨较第 1 场降雨产沙变化复杂,横垄与顺垄仅在第 1 场降雨时产沙,产沙形态皆呈“M”形,峰值和谷值差异显著,存在错峰现象。

表 5 连续型降雨雨强与产沙量相关性

降雨时期		雨强与顺垄产沙量	N	雨强与横垄产沙量	N
第 1 场	降雨初始值	0.809^{**}	12	0.830^*	8
第 2 场	降雨初始值	0.800^*	13	0.527	14
	雨强延后 1 min			0.478	14

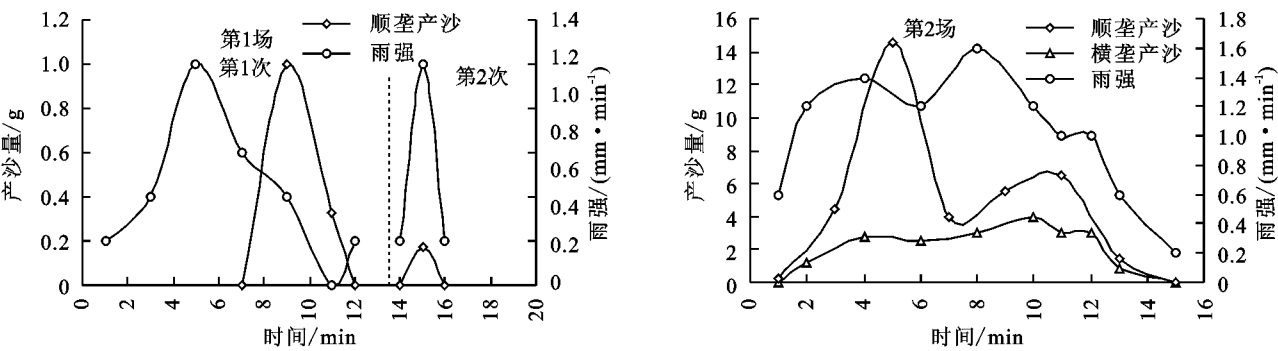


图 4 间歇型降雨第 1 场和第 2 场产沙过程

间歇型降雨雨强与产沙过程存在错峰现象,对 2 场降雨的产沙量与雨强作相关分析。由表 6 可知,间歇型降雨第 1 场降雨第 1 次产沙,雨强与顺垄相关系数较低为 0.002,雨强延后 4 min,雨强与顺垄产沙量相关系数提高至 0.912,存在错峰现象。第 2 次产沙过程极短,与雨强无错峰现象。第 2 场降雨,雨强延后 1 min,横垄产沙量与雨强相关系数提高至 0.834^{*},当雨强延后 4 min,顺垄与雨强产沙量提高至 0.550,存在错峰现象。

表 6 间歇型降雨雨强与产沙量相关性

降雨时期			雨强与顺垄产沙量	N	降雨时期			雨强与横垄产沙量	N
第 1 场	第 1 次降雨初始值		0.002	4	第 2 场	降雨初始值		0.772 [*]	10
	雨强延后 4 min		0.912	4		雨强延后 1 min		0.834 [*]	10
第 2 场	降雨初始值		0.339	8	第 2 场	雨强延后 2 min		0.550	8
	雨强延后 2 min		0.550	8		雨强延后 4 min		0.912	4

3 讨论

3.1 连续型降雨

横垄产流量和产沙量与雨强均存在错峰现象,且横垄产流产沙峰值远低于顺垄。这是因为横垄与径流方向垂直,可以有效拦截地表径流^[10],增加入渗,从而减小坡面产流量和产沙量,并整体表现为径流和泥沙延后 1 min。而顺垄与径流方向平行,为径流提供流路,其产流产沙主要受雨强影响^[11],降雨强度增大,产流量增大,径流携沙能力也增强,因此顺垄产流即产沙,不存在错峰现象。

顺垄产流产沙过程与雨强相关系数均较高,由此可见雨强是影响顺垄径流泥沙过程的主要因素。而横垄产沙过程与雨强相关系数则相对较低,原因是降雨过程中,雨强波动剧烈,横垄垄台侵蚀发生变化,侵蚀沟随机出现^[12]、细沟联通、两侧边壁坍塌、拦挡与冲开反复交替发生;地表微地形、土壤表面结构也会随侵蚀过程变化^[13-14],这些因素均会影响横垄坡面产沙过程。

前期降雨是影响坡面产流时间长度的主要原因之一。第 1 场存在前期降雨,土壤含水量较高,横垄和顺垄产流时间长度基本一致;第 2 场无前期降雨,土壤含水量较低,且顺垄垄沟利于坡面径流汇集和侵蚀,因此顺垄产流时间长度均长于横垄。无论是否具有前期降雨,顺垄产沙时间长度均长于横垄,表明横垄延缓产沙时间长度作用显著,这也体现在径流总量和泥沙总量方面。

3.2 间歇型降雨

顺垄首次产流产沙量与雨强存在错峰现象,这与连续型降雨结果不同。顺垄错峰现象主要受前期降雨与雨强影响,2 场降雨均无前期降雨,土壤含水量较低,而且降雨过程中,雨强较小或变化过程缓慢,致使雨水大部分用于入渗,因此产流产沙过程较雨强延后会产生错峰现象。其余次产流产沙无错峰现象,原因是产流产沙时间长度和产流产沙量均较小,接流时间和次数偏少,错峰现象不明显。第 1 场降雨,顺垄首次产流过程与雨强相关系数为负值,而连续型降雨产流过程与雨强相关系数均为正值。原因是前期降雨主要用于入渗,雨强峰值与顺垄产流量峰值时间间隔较长,产流过程与雨强过程呈现相反的变化趋势,致使雨强与顺垄产流相关系数为负值。将雨强延后,雨强与产流变化过程相似,相关系数由负相关转变为正相关。

除首次产流产沙外,存在雨强较小而产流和产流不产沙的现象,雨强较小而产流受前次降雨影响^[15],坡面土壤含水量较高,因此坡面会产流。产流不产沙原因是雨强较小或者细沟坡面发展稳定。

顺垄和横垄首次产流占总量的 70% 以上,产沙占总量的 94%~100%,这是由降雨雨强决定的,在观测期内,首次降雨雨强最大,其余场次雨强均较小。

4 结论

连续型降雨顺垄产流总量和产沙总量远远大于横垄,顺垄分别是横垄的 1.66~5.80 倍和 5.02~5.52 倍;产流形态呈“W”形或倒“V”形,产沙形态呈“W”形或“M”形。

形;顺垄产流峰值是横垄的 2.4~5.5 倍,产沙峰值是横垄的 5.5~12.5 倍;顺垄产流产沙量与雨强错峰现象不明显,而横垄产流量与雨强存在明显错峰现象,即延后 1 min。此外,还发现前期降雨是影响坡面产流时间长度的主要原因之一,横垄对延缓产沙时间长度和减少径流总量和泥沙总量方面作用显著。

间歇型降雨顺垄产流和产沙总量分别是横垄的 1.83 倍和 2.32 倍,首次产流占总量的 70% 以上,产沙占总量的 94%~100%;产流形态为倒“V”形,产沙形态呈倒“V”形或“M”形;顺垄产流产沙量与雨强存在明显错峰现象,较雨强延后 1~4 min,主要受前期降雨与雨强影响;横垄产流和产沙量较雨强延后 1 min;除首次产流产沙外,其余次产流产沙过程无错峰现象,同时存在产流不产沙和雨强较小而产沙的情况。

参考文献:

- [1] 雷孝章,彭清娥,曹叔尤,等.顺坡垄作改横坡垄作的水土保持神经网络模型[J].水土保持学报,2002,16(5):50-53.
- [2] 沈昌蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].水土保持通报,2005,25(4):48-49,80.
- [3] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [4] 罗键,郑子成,李廷轩,等.横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):66-72.

(上接第 113 页)

参考文献:

- [1] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.
- [2] 彭旭东.生产建设项目工程堆积体边坡土壤侵蚀过程[D].重庆:西南大学,2015.
- [3] 李建明.生产建设项目工程堆积体水土流失规律及测算模型研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [4] 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.
- [5] 李宏伟,牛俊文,宋立旺,等.工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J].水土保持学报,2013,27(5):63-67.
- [6] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- [7] 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.
- [8] 吴冰,邵明安,毛天旭,等.模拟降雨下坡度对含砾石土壤径流和产沙过程的影响[J].水土保持研究,2010,17

- [5] 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.
- [6] 傅斌,王玉宽,王道杰.变雨强连续降雨坡地侵蚀特征[J].水土保持学报,2009,23(2):25-27,56.
- [7] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J].中国农业科学,2009,42(4):1299-1305.
- [8] 张辉,李鹏,汤珊珊,等.多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J].泥沙研究,2016(6):59-65.
- [9] 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.
- [10] 宋玥,张忠学.不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2011,18(2):14-16,25.
- [11] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.
- [12] 霍贵中.野外模拟降雨下扰动坡面径流产沙规律研究[J].山西水土保持科技,2013(3):15-18.
- [13] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 748-756.
- [14] 李朝霞,王天巍,史志华,等.降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J].水土保持学报,2005,19(1):1-4,9.
- [15] 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.
- [5] 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.
- [10] 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.
- [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[J].水土保持学报,2014,28(5):21-25.
- [12] 朱元骏,邵明安.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J].中国科学(D 辑:地球科学),2008,38(3):375-383.
- [13] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [14] 梁建英.参数区间估计时置信区间的优选法[J].高等数学研究,2006,9(4):118,124.
- [15] 方积乾,徐勇勇.卫生统计学[M].第 7 版.北京:人民卫生出版社,2012.
- [16] 张志蓉.桂西北石质土壤中砾石的分布规律及其对水分性质的影响[D].武汉:华中农业大学,2008.