

# 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究

张军<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1,3</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 王飞超<sup>1</sup>, 汤珊珊<sup>1</sup>, 王丰<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 2. 西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637009; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 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; 4. 浙江大学水文与水资源所, 杭州 310058)

**摘要:** 通过对降雨移动方向上不同雨强和降雨历时的研究, 揭示移动降雨坡面产流产沙关系及其变化规律, 采用2个降雨移动方向(沿径流向上和向下移动)、2个雨强(1.35, 2.75 mm/min)和2个降雨历时(60, 120 min)在室内进行模拟移动降雨试验, 分析不同降雨移动方向、不同雨强和降雨历时坡面产流产沙特征。结果表明: (1) 向上移动降雨, 相同历时(相同雨强)条件下, 大雨强(长降雨历时)初始产流时间为140 s(240 s), 比小雨强(短降雨历时)提前165 s(65 s)。 (2) 向下移动降雨, 雨强越大, 降雨历时越短, 产流产沙曲线越陡峭; 产流量和产沙量达到峰值的时间一致。 (3) 与向上移动降雨相比, 向下移动降雨初始产流平均时间、产流和产沙达到峰值的平均时间分别滞后了2 210, 2 468, 2 948 s; 产流总量和产沙总量分别减少了13.08%~74.90%和42.95%~84.24%, 但产流和产沙峰值大小没有明显变化规律。 (4) 不同降雨移动方向, 坡面累计产沙量和累计产流量之间的函数表达式不同。

**关键词:** 移动降雨; 径流; 侵蚀产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0001-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.001

## Experimental Study on the Process of Runoff and Sediment Yield under Moving Rainfall

ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>1,3</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, WANG Feichao<sup>1</sup>, TANG Shanshan<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>4</sup>

(1. Northwest Key Laboratory of Water Resources and Environmental Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Institute of Water Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract:** The spatial and temporal distribution of rainfall was an important factor influenced runoff and sediment yield. Based on the study about rainfall intensities and rainfall duration under the different moving rainfall directions, the relationship between runoff and sediment yield and its variation regularity was expected to be revealed. In this study, the indoor simulated moving rainfall experiments of 2 moving directions (up and down movement), 2 rainfall intensities (1.35 mm/min, 2.75 mm/min) and 2 rainfall durations (60 min, 120 min) were carried out in order to analyze the runoff and sediment characteristics under different moving rainfall directions, intensities and durations. The results showed as follows: (1) For the moving upstream rainfall, with the same rainfall duration (rainfall intensity), initial runoff time of heavy rain (long rainfall duration) was 140 s (240 s), 165 s (65 s) earlier than that of light rain (short rainfall duration). (2) For the moving downstream rainfall, the stronger rainfall intensity was and the shorter rainfall duration was, the steeper runoff and sediment yield curve was. The time of runoff and sediment arrived peak value was identical. (3) Compared with the moving upstream rainfall, the average time of initial rainfall runoff, runoff and sediment reached the peak lagged 2 210 s, 2 468 s, 2 948 s, respectively, in the moving downstream rainfall. The total of runoff and sediment yield reduced by 13.08%—74.90% and 42.95%—84.24%, respectively, but the peak value of runoff and sediment were not obvious change rules. (4) The function expressions of cumulative runoff and sediment yield were different under different moving rainfall directions.

**Keywords:** moving rainfall; runoff; erosion and sediment yield

收稿日期: 2016-08-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(41330858, 41471226)

第一作者: 张军(1979—), 男, 四川南充人, 博士研究生, 主要从事水土保持及水文水资源研究。E-mail: zhang822@yeah.net

通信作者: 李占斌(1962—), 男, 河南南阳人, 工学博士, 研究员, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

降雨—径流引起土壤侵蚀并导致土地退化,已成为全球性的生态环境问题<sup>[1]</sup>。大量研究从不同降雨特征<sup>[2-4]</sup>,如降雨强度、降雨历时,以及不同下垫面,如地形地貌<sup>[5-6]</sup>、土地利用<sup>[7]</sup>、植被格局<sup>[8]</sup>、土壤类型<sup>[9]</sup>等入手,研究降雨—径流—侵蚀产沙之间的关系和变化规律。这些研究大都基于一个假设,即降雨瞬时到达承雨区,且保持稳定。然而,研究者对自然降雨的观测发现,雨强在时间和空间上是不断变化的<sup>[10-11]</sup>。此外,风的作用也会使降雨在空间上发生移动<sup>[12]</sup>。因此,忽略降雨的移动特性,可能会过高或过低的估计产流产沙峰值<sup>[13-14]</sup>。Singh 和 Delima 等<sup>[15-16]</sup>对移动降雨引起的坡面水文过程进行了理论和试验研究;冉启华等<sup>[14,17]</sup>基于分布式水文模型 InHM(Integrated Hydrology Model)研究了降雨时空分布对坡面产流的影响。但目前,国内关于移动降雨产流产沙过程模拟试验研究的报道还很少。因此,本文通过室内模拟移动降雨试验,探讨在不同降雨移动方向上,不同雨强和降雨历时与坡面产流产沙之间的关系及其变化规律。通过研究移动降雨径流产沙过程,进一步丰富侵蚀产沙理论,为侵蚀产沙预报模型的完善和水土流失防治提供参考。

## 1 材料与装置

### 1.1 试验装置

模拟移动降雨采用移动式针孔降雨装置,主要由供水管、稳压供水箱、针孔式降雨器、控制阀和移动装置组成。其中,针孔式降雨器的针头直径约 0.58 mm,降雨面积 1 m×1 m,降雨装置安装在移动轨道上,用于水平移动。降雨高度 10 m,满足所有雨滴达到终点速度。试验用钢制土槽规格为 4 m(长)×1 m(宽)×0.6 m(深),土槽末端设有径流收集装置,并在其上方安装挡雨板,避免降雨移出时影响径流泥沙采集。试验装置见图 1。

### 1.2 试验方法

室内模拟移动降雨试验于 2014 年 6—7 月在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪侵蚀大厅内进行。试验土壤取自西安市周边黄土,其黏粒(<0.002 mm)含量 12.93%,粉粒(0.002~0.02 mm)含量 82.55%,砂粒(0.02~2 mm)含量 4.52%。试验设计坡度为 15°;由于降雨器面积较小,为了更好地观测坡面产流产沙过程,设计雨强为 1.35, 2.75 mm/min;降雨历时为 60, 120 min,反映不同的降雨移动速度;降雨移动方向为沿径流方向向上和向下移动。降雨开始后计时,降雨器移出土槽后停止降雨。降雨场次编号及其意义:向上移动降雨场次编号为 MUNS(1.35 mm/min, 60 min), MUNL(1.35 mm/min, 120 min), MUES

(2.75 mm/min, 60 min);向下移动降雨场次编号为 MDNS(1.35 mm/min, 60 min), MDNL(1.35 mm/min, 120 min), MDES(2.75 mm/min, 60 min)

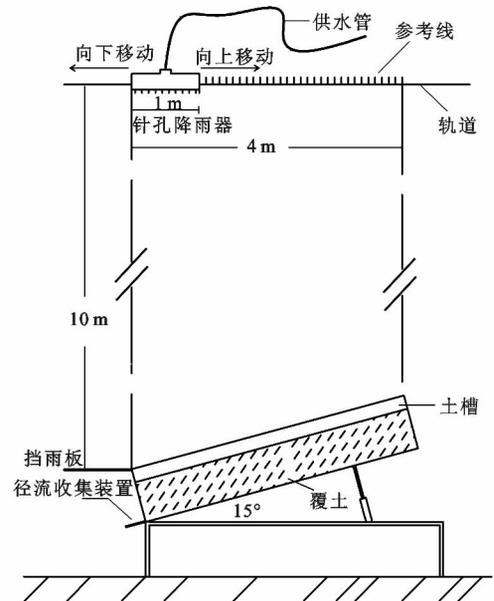


图 1 试验装置示意

填土之前先在土槽中铺设 5 cm 厚的细沙,并在沙层上覆盖一层纱布,确保试验土层的透水性。将过 10 mm 孔筛的黄土按 5 cm 一层分层填装,装土高度为 25 cm。装填过程中,边填充、边压实以保证试验土层容重均匀;每层的表土打毛,以消除土层之间的垂直层理。试验土壤平均容重控制在 1.25 g/cm<sup>3</sup> 左右,初始含水量控制在(10.0±1.0)%左右。为了保证试验的准确性,每次正式降雨前,对坡面进行前期降雨,并用塑料布覆盖静置 24 h,使土壤水分接近于自然分布状态,同时又能保证各场降雨的初始土壤含水率基本一致。每场试验前对雨强进行率定,降雨均匀系数>85%。由于实际操作中不能对降雨进行匀速移动,采用等间隔时间水平移动相同距离来近似模拟匀速移动。降雨装置在导轨上每次移动间距为 0.2 m,为确保每次移动的准确性,在移动装置导轨旁悬挂铅锤作为参照。坡面产流后,用容器每 1 min 接取浑水径流样(MUNL 在降雨 30 min 后,每隔 1 min 接取水样)。泥沙量采用烘干称重测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 移动降雨坡面初始产流时间

向上移动降雨条件下,初始产流时间分别为 140 s(MUES), 240 s(MUNL) 和 305 s(MUNS);向下移动降雨条件下,初始产流时间的大小顺序为:MDES(1 883 s)<MDNS(2 529 s)<MDNL(2 903 s);向上移动降雨初始产流时间比向下移动降雨提前了 90% 以上。短历时条件下,初始产流时间均随降雨强度的增加而提前;相同雨强条件下,向上移动降雨,长历时的初始产流时间早于短历时,而向下移动降雨正好相

反。向上移动降雨起始阶段距离土槽出口很近;其次降雨开始后,雨滴的击溅作用使土壤颗粒被打散,并逐渐形成结皮,入渗率减小,当降雨强度等于或大于入渗率时开始产流,而结皮过程在大雨强下更显著。向上移动降雨历时越短,移动速度越快,径流路径越长,初始产流时间增加;向下移动降雨,降雨移动速度越快,径流路径越短,初始产流时间提前。

## 2.2 移动降雨坡面产流产沙过程

2.2.1 向上移动降雨坡面产流产沙过程 由图 2 可知,向上移动降雨径流量的大小顺序为: MUES > MUNL > MUNS。径流量随产流历时总体上表现为 0~5 min 内径流迅速增加,然后增速放缓,15~27 min 左右径流量达到峰值之后出现轻微减少趋势。MUES 径流量在产流后 1 620 s 开始趋于轻微减少,径流量在 0.28~2.58 L/min 之间变动;MUNS 径流量在产流后 900 s 趋于轻微减少,径流量在 0.22~0.94 L/min 之间变动;MUNL 径流量在产流后 1 205 s 趋于轻微减少,径流量在 0.10~1.29 L/min 之间变动。这是因为地表开始产流后径流迅速升高,而降雨向上移动增加了径流路径和入渗率,延迟了径流达到

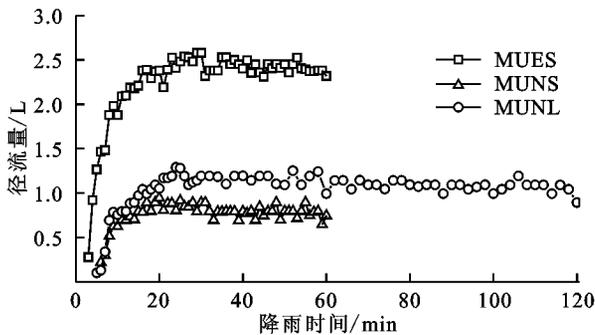


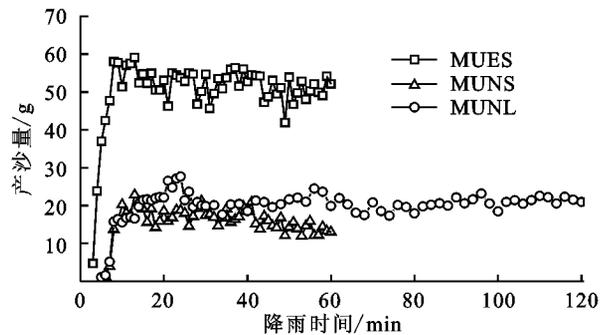
图 2 向上移动降雨坡面产流产沙过程

2.2.2 向下移动降雨坡面产流产沙过程 由图 3 可知,向下移动降雨径流量的大小顺序为: MDES > MDNL > MDNS。径流量随产流历时呈先上升,后下降的变化趋势;其中,短历时降雨的地表径流过程曲线呈“瘦高型”,长历时降雨呈“矮胖型”。短历时条件下, MDES 和 MDNS 径流量分别在产流后 1 500, 600 s 开始减少,径流量变动范围分别在 0.32~2.99, 0.29~0.95 L/min 之间;长历时条件下, MDNL 径流量在产流后 2 400 s 开始减少,径流量变动范围在 0.20~1.14 L/min 之间。这主要是因为,地表产流后径流量增加,同时降雨向下移动减少了径流路径,2 个作用叠加增强了径流量上升趋势。长历时条件下,降雨移动速度较慢,二者叠加效果没有前者明显。此外,大雨强条件下地表结皮快于小雨强,导致入渗率降低,增加了径流量。因此, MDES 直到降雨开始移出土槽后,径流才迅速减少。

同时可以看出,短历时条件下, MDES 和 MDNS 的

峰值的时间,当移动到一定距离后,径流出现减少趋势。相同雨强条件下, MUNL 的径流总量和径流峰值分别是 MUNS 的 1.73 倍和 1.37 倍;相同降雨历时条件下, MUES 的径流总量和径流峰值分别是 MUNS 的 3.11 倍和 2.74 倍。表明径流量越大,径流峰值出现的时间越滞后,因为径流越大所需削减径流峰值的路径越长。

同时可以看出,侵蚀产沙量呈先迅速增加,后减少的变化趋势。相同降雨历时,雨强越大,产沙量越大;相同雨强,降雨历时越短,产沙量越小。MUES, MUNS 和 MUNL 产沙量达到峰值的时间分别是产流后 660, 480, 1 205 s, 最大产沙量分别是 59.16, 22.8, 27.67 g。比较产流量和产沙量变化发现,短历时条件下,产沙量达到峰值的时间比产流量达到峰值的时间提前了 46.67%~59.26%;而长历时条件下,二者达到峰值的时间一致。首先,产流初期降雨溅蚀和径流挟沙能力较强,产沙量随径流量迅速增加而增加。其次,随降雨向上移动,径流增速放缓,挟沙能力减弱,同时径流路径增加,使部分泥沙在下游沉积。而长历时条件下,径流路径增加较慢,延迟了上述过程的发展。



产沙量达到峰值的时间分别是产流后 1 560, 600 s, 最大产沙量分别是 120.14, 12.35 g;长历时条件下, MDNL 的产沙量达到峰值的时间是产流后 2 400 s, 最大产沙量为 23.12 g。通过产沙量的变化过程可以看出,产沙量呈先增加后减少的变化趋势,产沙量与径流量达到峰值的时间一致。降雨击溅分散土壤颗粒,并随径流向下游输移,在输移过程中部分泥沙沉积,降雨向下移动过程中这种“溅蚀—输移—沉积”交替出现,且越向下移动径流输移能力越强,沉积作用越弱。这种现象在短历时大雨强条件下最为明显。MDES 可以看出,产沙过程曲线呈阶梯状增加。

比较不同降雨移动方向产流产沙峰值发现:(1)向上移动降雨径流和产沙达到峰值的时间分别比向下移动降雨提前 47.98%~72.75%和 72.75%~76.77%;(2)不同降雨移动方向径流和产沙峰值大小不存在差异性规律,这与 Nunes 等<sup>[18]</sup>的研究不同。它们的大小可能是降雨强度、移动速度、坡度等多因素影响的结果。

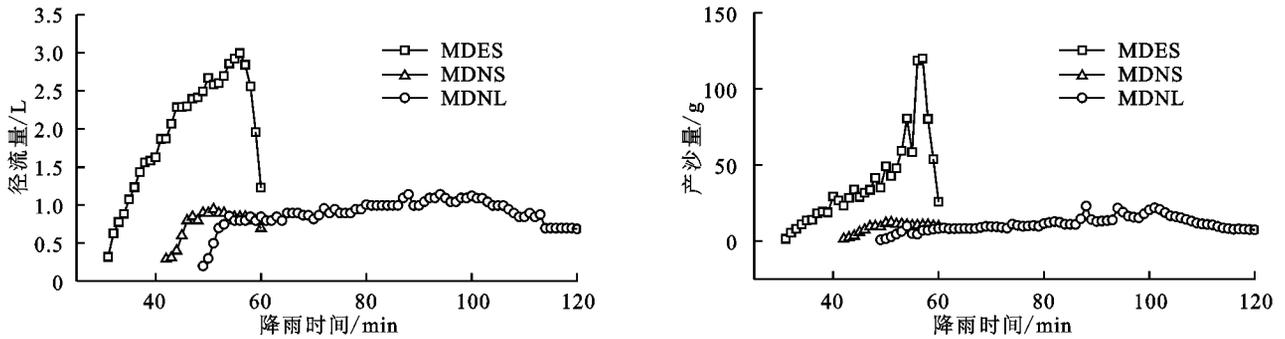


图 3 向下移动降雨坡面产流产沙过程

### 2.3 移动降雨坡面产流产沙总量变化

向上移动降雨条件下,雨强 1.35 mm/min 时,降雨历时 60 min 的产流和产沙总量分别是 42.11 L, 878.86 g, 而降雨历时为 120 min 的产流和产沙总量分别是它的 1.75, 1.6 倍;降雨历时 60 min 时,雨强为 2.75 mm/min 的产流和产沙总量分别是 1.35 mm/min 的 3.11, 3.33 倍。向下移动降雨条件下,雨强为 1.35 mm/min, 降雨历时为 60 min 的产流和产沙总量分别是 10.95 L, 138.47 g。以此为基准值,雨强 1.35 mm/min, 降雨历时 120 min 的产流和产沙总量分别是 60 min 的 5.87, 5.82 倍;雨强 2.75 mm/min, 降雨历时 60 min 的产流和产沙总量分别是 60 min 的 3.00, 5.88 倍。由此可见,小雨强,短历时降雨的产流产沙总量均偏少,这种情况在向下移动降雨时更明显。与向下移动降雨相比,对应的向上移动降雨(MUES, MUNS, MUNL)产流总量分别是它的 3.98, 3.85, 1.15 倍;产沙总量分别是它的

3.60, 6.37, 1.75 倍。这是因为向下移动降雨的产流产沙时间要远小于向上移动降雨。

坡面累计产沙量与累计产流量的关系(表 1)可以看出,向上移动降雨条件下,坡面累计产沙量与累计产流量之间呈线性递增关系( $y = ax + b, a > 0$ )。雨强为 1.35 mm/min 时,线性方程的斜率( $a$ )随降雨历时的延长而减小;降雨历时为 60 min 时,线性方程的斜率( $a$ )随雨强的增大而增大。向下移动降雨条件下,坡面累计产沙量与累计产流量之间呈显著的幂函数递增关系( $y = ax^b$ ),雨强为 1.35 mm/min 时, $a$  随降雨历时的延长而减小;降雨历时为 60 min 时, $a$  随雨强的增大而增大。而研究表明,参数  $a$  通常反映了产沙基数<sup>[19]</sup>, 它的变化受雨强、降雨历时和下垫面特征的影响。由此可见,降雨移动方向决定了坡面累计产沙量与累计产流量之间的函数表达式,而函数表达式的参数变化则与降雨强度和降雨历时等因素有关。

表 1 移动降雨坡面累计产沙量与累计产流量的关系

雨强/ (mm · min <sup>-1</sup> )	降雨历时/ min	向上移动降雨		向下移动降雨	
		拟合公式	R <sup>2</sup>	拟合公式	R <sup>2</sup>
1.35	60	$y = 20.971x + 18.647$	0.998	$y = 6.911x^{1.222}$	0.999
	120	$y = 18.734x + 18.035$	0.999	$y = 5.609x^{1.188}$	0.999
2.75	60	$y = 21.905x + 91.799$	0.999	$y = 7.366x^{1.209}$	0.997

注:  $y$  为累计产沙量(g);  $x$  为累计产流量(L)。

## 3 结论

(1) 向上移动降雨条件下, MUES 初始产流时间为 140 s, 比 MUNS 提前了 54.13%; 而 MUNS 初始产流时间是 MUNL 的 1.27 倍。各降雨条件下, 产流量达到峰值的时间滞后于产沙量。向下移动降雨条件下, 雨强越大, 降雨历时越短, 产流、产沙曲线越陡峭; 雨强越小、降雨历时越长, 曲线越平缓。MDES 初始产流时间为 1 883 s, 比 MDNS 提前了 25.55%, 而 MDNS 初始产流时间为 MDNL 的 87.12%。各降雨条件下, 产流和产沙量达到峰值的时间一致。

(2) 比较不同降雨移动方向坡面水文响应。向下移动降雨初始产流平均时间、产流和产沙达到峰值的平均时间分别比向上移动降雨延迟了 2 210, 2 468, 2 948 s; 产流和产沙总量分别减少了 13.08%~74.90% 和

42.95%~84.24%, 但峰值大小没有明显的变化规律。

(3) 向上移动降雨累计产沙量和累计产流量之间呈线性递增关系, 而向下移动降雨呈幂函数关系。说明降雨移动方向决定了坡面累计产沙量与累计产流量之间的函数关系, 而降雨强度和降雨历时等影响了函数的变化。

### 参考文献:

- [1] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 24-28.
- [2] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 162-170.
- [3] 沈奕彤, 郭成久, 李海强, 等. 降雨历时对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 97-101.