

## 室内小流域降雨产流过程试验

屈丽琴<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>1,2\*</sup>, 赵军<sup>2</sup>, 余新晓<sup>3</sup>, 高佩玲<sup>4</sup>, 闫丽娟<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中科院、水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京100083; 4. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255049)

**摘要:** 该研究采用新型的小水流流量自动观测系统, 在室内小流域模型上进行了不变雨强和变雨强模拟降雨试验, 实时观测了模型流域各沟道的产流过程。试验进行了不同降雨强度(25、50、75、120 mm/h)和不同降雨历时(5、10、15 min)组合的12次降雨试验, 同时进行了30–70 mm/h和70–30–70 mm/h的变雨强降雨试验。在不变雨强的条件下, 仪器与人工测量所得稳定流量的最大平均相对误差仅为2.02%。测量得到的流量过程线呈现出起流、稳定和退水3个明显的阶段。其中, 起流和退水过程涨落的剧烈程度、稳定阶段的流量大小随雨强增大而增大, 稳定阶段的持续时间与降雨历时成正比。空间上, 主沟出口的产流过程明显滞后于支沟出口的产流过程, 且其两者之间具有一致的流量过程。在变雨强的情况下, 流量过程线没有稳定的阶段, 流量随雨强变化而变化。该研究对于深入理解流域产流过程具有重要意义, 可为相关的模型研究提供可靠的试验支持。

**关键词:** 产流, 过程, 小流域, 自动测量系统, 人工降雨

**中图分类号:** S271

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0025-06

屈丽琴, 雷廷武, 赵军, 等. 室内小流域降雨产流过程试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 25–30.

Qu Liqin, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 25–30. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

流域水文过程是一个复杂的动态过程, 对其进行模拟是水文与土壤侵蚀模拟研究的重要内容, 产流过程的定量描述是物理过程预报模型研究的基础<sup>[1]</sup>。此外, 黄土高原高含沙水流的特点决定了产流过程是影响产沙特性的主要因素<sup>[2-4]</sup>, 因此在可控条件下对流域产流进行基于实测的机制研究在水文过程和水沙模型研究领域具有重要意义。

国内外对于坡面产流过程和机理的研究相对比较成熟<sup>[5-10]</sup>。然而流域是水文过程和水土流失的基本单元, 其产流过程受降雨、土壤、地形地貌、植被等多种因子的制约, 远较坡面复杂。另一方面, 随着分布式水文模型成为水文模型研究的热点, 而流域侵蚀模型中各子模型间耦合关系的处理方法及其模型的数值模拟方法的正确性必须采用流域内不同时空点的有效测量数据来加以检验<sup>[11,12]</sup>。因此, 对流域产流的时空分布特点进行准确观测和描述显得尤为重要。目前, 由于受野外复杂条件和观测手段的局限, 已有流域产流的研究多是对野外实测资料进行年/月/周径流过程分析<sup>[13-16]</sup>。鉴于在坡面和侵蚀模型研究中, 很多具有重要价值的成果都基于一定假设和

尺度缩小的室内模拟研究<sup>[17-19]</sup>。因此, 在室内建立流域实体模型进行人工降雨条件下的系统观测是非常有意义的尝试。

高佩玲<sup>[20]</sup>在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅的实体小流域上采用三角量水堰配套电子水尺的方法进行过产流过程自动观测的探索试验。赵军等<sup>[21]</sup>研究的流量泥沙自动观测装置可以实现精度更高的自动观测, 为室内小流域模型的观测研究提供了可靠的技术支持。本研究的目的是: ①观测室内小流域人工降雨条件下的产流过程, 验证流量自动观测系统的精度和运行稳定性; ②分析不同降雨强度和降雨历时条件下, 小流域产流过程的响应特征; ③对比流域内部不同位置产流过程响应特征, 分析不同集水区域产流的特点; ④研究变雨强条件下流域降雨产流过程。

### 1 试验材料及试验设计

#### 1.1 室内小流域模型处理和流量观测

试验在中国科学院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降雨大厅的实体小流域模型上进行。模型流域总面积约 65.9 m<sup>2</sup>, 南北方向最大宽度 12.1 m, 东西方向最大宽度 8.9 m。流域内有 1 条主沟(南北走向)、3 条支沟(东西走向)。主沟南、北走向, 沟长 10.51 m; 3 条支沟由南向北, 距离流域出口分别为 2.47、4.60、7.49 m, 沟长分别为 4.95、3.69、3.03 m。见图 1。

模型基础装土 20 cm 不过筛, 打碎填装并压实, 干容重为 1.59 g/cm<sup>3</sup>, 接近犁底层土壤容重, 传统耕作犁底层土壤容重一般为 1.42 g/cm<sup>3</sup> 以上<sup>[21]</sup>。试验在原有模型基础上重新填装表层土壤。即原有模型基础决定了流域

收稿日期: 2007-07-06 修订日期: 2008-10-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40635027)

作者简介: 屈丽琴(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀及水文过程方面的研究。北京市海淀区清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: lqqu@sohu.com

\*通讯作者: 雷廷武(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事水土保持、荒漠化防治、节水灌溉等方向的研究。北京市海淀区清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: ddragon@public3.bta.net.cn

的地貌特点,表层土壤根据试验要求重新填装。该试验设计中,降雨实施之前土壤必须进行充分饱和,因此,在忽略入渗的假设下,土壤类型对地表产流的影响处于次要地位,就近选择杨凌土即可满足试验要求。杨凌黏黄土颗粒组成见表1。高佩玲试验<sup>[20]</sup>新铺土的厚度为20 cm,本次试验填土厚度30 cm,过10 mm筛,并适当压实,经取样观测,表土平均干容重为 $1.32 \text{ g/cm}^3$ ,接近自然固结后的耕层土壤的容重。为避免小流域模型内部的人为扰动,装土同时在3个支沟出口和流域出口安装流量观测仪器。装土完毕后进行雨强20 mm/h的预降雨,至产流停止,用篷布覆盖,使其充分沉积和应力重组。

流量观测采用赵军等<sup>[22]</sup>研制开发的流量自动监测系统。流域实体模型的主沟和3个支沟出口分别安装了流量监测传感器(图1)。与该仪器系统配套的数据采集器和计算机管理软件可以实现流量过程的实时观测。试验中设定采样的平均间隔为7 s。作为对照,在流域出口对流量进行人工取样观测,平均采样间隔为20 s。

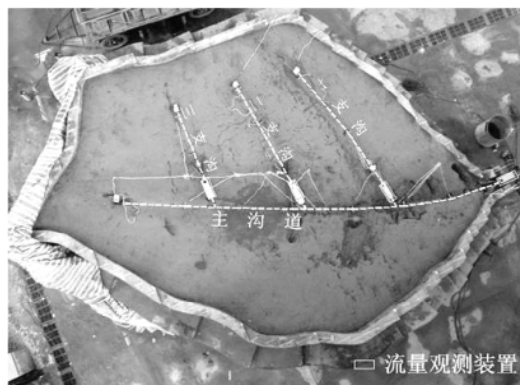


图1 实体流域模型及流量监测设备安装位置俯视图

Fig.1 Overview of watershed model and installation position of flow monitoring equipment

表1 试验用土壤的颗粒组成

Table 1 Particle size distribution of experimental soil

粒径/mm	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
含量/%	0.4	8.6	44	13	22	12

## 1.2 人工降雨设计

人工降雨试验采用中科院水土保持研究所降雨大厅的下喷式降雨器,雨强范围为20~200 mm/h,喷头距离地面的有效高程高度为14.6 m。具体见文献[23]。

周佩华<sup>[24]</sup>等提出,在黄土高原,严重的土壤侵蚀主要由少数几次暴雨或大暴雨所引起,大多数降雨不产生径流。王万忠<sup>[25]</sup>统计产流降雨得出,黄土高原引起土壤侵蚀的可蚀性降雨在坡耕地(20°)为8.1 mm,可蚀降雨的临界雨量是10 mm,瞬时雨强需达到0.5 mm/min即30 mm/h。唐克丽等<sup>[26]</sup>统计黄土高原代表性特大暴雨(点雨量),结果显示:黄土高原大部分特大暴雨雨强分布于100~150 mm/h之间。根据以上研究结果,考虑可蚀性降雨临界值与黄土高原统计暴雨的雨强范围,本次试验选择25、50、75、120 mm/h 4个雨强,3个历时(5、10、

15 min)研究降雨产流响应的基本特征。

此外,由于天然降雨的降雨强度分布具有随机渐变的特点,为观测在降雨变化情况下流域产流过程的响应规律,设计30~70 mm/h和70~30~70 mm/h变雨强的降雨试验。而人工降雨不能实现雨强的连续变化,为达到雨强线性增加的目的,将雨强在30~70 mm/h间分若干阶段,即在30 mm/h时快速将雨强升至40 mm/h后保持稳定若干时间,再快速增至50 mm/h后保持若干时间,以此类推至70 mm/h。为保证一致的线性增长关系,相邻雨强间的转换时间和稳定雨强的持续时间基本保持一致。

降雨试验在流域模型填土和降雨沉降后2周进行,期间每天对流域模型人工喷水两次,以减少表面裂缝并保证充分沉降。试验中为保证流域表土层在试验前维持近似饱和和从而满足可以忽略土壤入渗过程的条件,每次降雨试验前对流域进行小雨强(20 mm/h)降雨饱和,历时控制以地表开始产流为停止信号,一般持续3~5 min。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 观测结果的可靠性分析

为了应用自动观测设备研究流域产流过程,对仪器观测结果做进一步可靠性验证是非常必要的。本研究采用双累积曲线对比定雨强75 mm/h(历时为10 min)和变雨强30~70 mm/h的产流过程的人工和仪器观测结果。

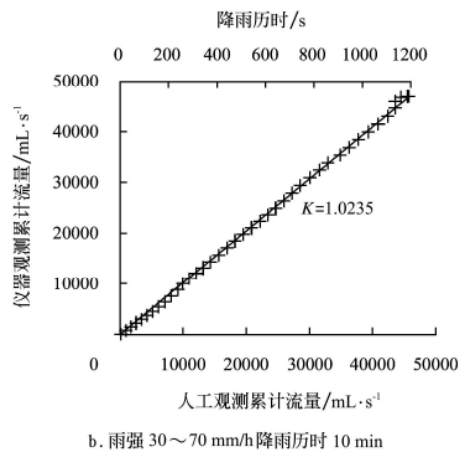
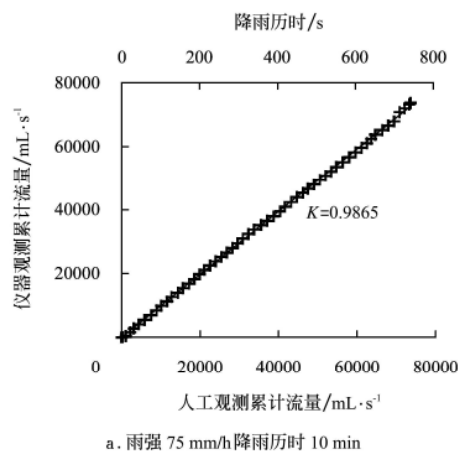


图2 人工与仪器观测流量对比双累计曲线

Fig.2 Double-mass curves of manual and instrumental methods for flow

根据双累积曲线的分析结果（图 2），人工观测与仪器观测结果具有很好的一致性，在两次试验观测中，双累积曲线回归系数分别为 0.9865 和 1.0235，确定系数分别为 0.9999 和 0.9997，这个结果表明仪器观测和人工观测结果在一致性上没有显著差别。此外，从表 2 可以看出，在不同的降雨强度下，人工与仪器观测结果在流量达到稳定以后，最大相对误差仅为 2.02%。因此，采用该方法观测得到的流量过程结果是可靠的，可以进行降雨产流过程的进一步分析。

2.2 不同强度降雨的产流过程分析

在定雨强的情况下，相同降雨历时、不同降雨强度，产流过程表现出不同的特征。如图 3 所示，产流过程明显分为汇水、产流稳定和退水三个阶段。流域产流初期，由于流域集水面积很小，流量增长较为迅速。流量增加至一定数值后，流域产流进入相对稳定的阶段，这一时间段内流量的测量结果有一定的振荡，一方面原因在于侵蚀过程中形成了跌水现象，流量的变化会有一定的起伏，另一方面可能来自于降雨设备系统误差。降雨结束后，流域产流量迅速减少，至退水结束。

雨强 25、50、75 和 120 mm/h，历时 10 min 的降雨试验中，对应的初损时间（从降雨开始到产流开始这一段时间叫积水时间也叫初损时间）分别为 62、48、83、27 s，产流后流量快速增大至稳定流量，随着降雨在产流后 10 min 停止，产流过程转入退水过程，流量迅速减小，至 13 min 左右，退水基本结束。从（图 3）可以看出，从开始降雨到开始产流的时间有所不同，基本趋势是随着降雨强度的增加而缩短。75 mm/h 的降雨初损时间相对较长，这是因为流域刚刚进行了修补，即使在预降雨处理的情况下，饱和条件也有细微差别，特别是补填新土的地方，入渗能力相对较强，所以开始产流的时间相对

滞后。降雨历时是以流域开始产流为起点控制的，降雨结束时间的差别导致退水时间不是完全一致。

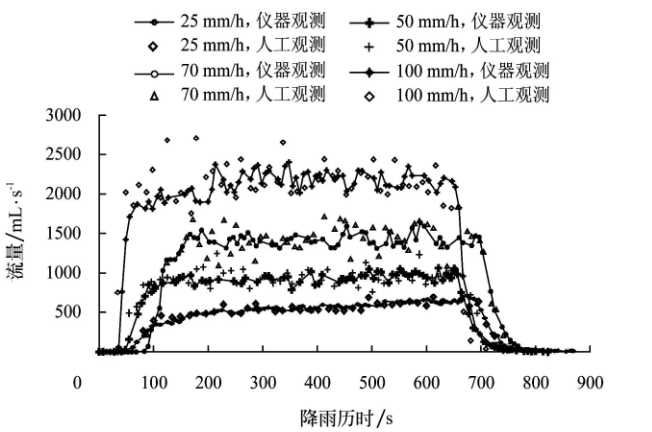


图 3 不同降雨强度雨强 10 min 降雨历时的产流过程对比  
Fig.3 Comparison of runoff process under different kinds of rainfall intensity for rainfall duration of 10 minutes

不同降雨强度对应的稳定阶段产流量不同，稳定流量随雨强增大而增大。该降雨模拟试验中，通过预降雨使流域饱和，产流过程属于蓄满产流，稳定产流量主要受降雨条件的控制。试验中，25、50、75 和 120 m/h 降雨强度对应的人工 ( $Q_1$ ) 和仪器测量稳定产流量 ( $Q_2$ ) 的平均值见表 2。人工测量和仪器测量之间的相对误差均小于 3%。

根据水量平衡，在忽略入渗的条件下，计算得到产流量稳定值 ( $Q_3$ )，见表 2。在 25 mm/h 的降雨条件下，产流计算值和人工观测及仪器观测值均有较大的相对误差，但人工和仪器观测值之间的相对误差较小，因此初步断定其误差是由降雨控制设备的系统误差产生的。

表 2 不同降雨强度产流过程特征计算表  
Table 2 Characteristics of runoff process under different kinds of rainfall intensity

雨强 /mm·h <sup>-1</sup>	时间/s				稳定产流量/mL·s <sup>-1</sup>			相对误差/%	
	初损时间 t <sub>1</sub>	汇水历时Δt <sub>1</sub>	开始退水 t <sub>2</sub>	退水历时Δt <sub>2</sub>	人工观测 Q <sub>1</sub>	仪器观测 Q <sub>2</sub>	水量平衡 Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub> -Q <sub>1</sub>  /Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub> -Q <sub>2</sub>  /Q <sub>3</sub>
25	62	156	700	169	572.39	581.44	457.64	1.58	21.29
50	48	64	658	156	955.14	952.22	915.28	0.11	4.04
75	83	41	703	100	1427.38	1409.51	1372.92	1.73	2.38
120	27	28	657	91	2171.88	2128.06	2196.67	2.02	3.12

对应不同降雨强度，汇水过程和退水过程也表现出不同的响应特征，具体为：①对应 25、50、75 和 120 m/h 降雨强度，汇水阶段（从开始产流到达到稳定流量）的时间分别为 156、64、41 和 28 s。汇水过程随着雨强的增加而缩短，表现为流量过程线随雨强增大而变得陡峭。②退水过程随着雨强增大，变化的过程加剧，即表现为流量在很短的时间内变化到很小的值。

降雨结束后，流域开始退水，影响退水阶段径流的主要因素是流域最大积水深度，而影响最大积水深度的是雨强，具体可总结为雨强越大，退水过程线越陡，退水强度越大；雨强越小，退水过程越缓，退水强度越小。

杨晓俊<sup>[27]</sup>用人工降雨揭示降雨产流特征和降雨入渗规律的研究中得到退水过程随雨强的变化呈下凹簇线分布，这与该研究中观测到的退水过程线是一致的。

从图 3 中还可以看出，稳定阶段的流量波动幅度随雨强增大而增大。主要是水流形态的变化引起的，随着流量的增大，水流能量增加，挟沙能力增强，含沙特性增加了水流的紊动。

2.3 不同历时的降雨产流过程分析

在不变雨强的情况下，相同降雨强度不同降雨历时，产流过程特征基本相同（图 4）。120 mm/h 降雨强度 5、10 和 15 min 降雨历时条件下，产流过程的差别主要体现

在稳定阶段的持续时间上, 汇水过程和退水过程都表现出非常好的一致性, 从而可以得到: 在流域比较小且不考虑入渗的情况下, 汇水和退水过程线形状主要受降雨强度的影响, 与降雨历时并无明显关系。

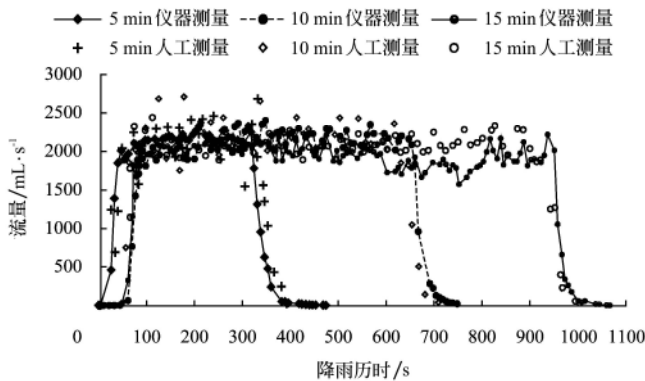


图 4 120 mm/h 雨强不同历时降雨产流过程对比

Fig.4 Comparison of runoff process for different kinds of duration under rainfall intensity of 120 mm/h

#### 2.4 流域出口与各支沟的产流过程对比分析

本试验还对流域内各个支沟的产流过程进行了观测, 将其与流域出口的产流过程进行对比, 结果见图 5。从图中可以看出, 对下垫面特定的同一流域而言, 各支沟产流过程基本同步并且超前于主沟产流的时间, 退水过程表现出对应的趋势。

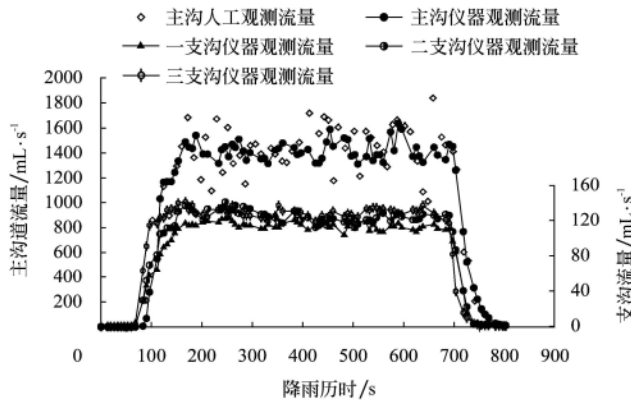


图 5 75 mm/h 雨强 10 min 历时流域出口与各支沟出口产流过程对比

Fig.5 Comparison of runoff process between outlet of main channel and sub-channels under rainfall intensity of 75 mm/h and duration of 10 minutes

主沟的汇流过程和退水过程, 流量变化比支沟剧烈。由于支沟的汇水面积较小, 从而流量相应也小, 因此汇水和退水过程因汇水面积不同而不同。这与前面的随雨强不同而不同的规律是流域特定地貌和下垫面条件对流量响应特征的两种不同表现。比较主沟流量与支沟流量发现: 产流稳定阶段, 3 个支沟沟道平均稳定产流量分别为 113.09、124.51 和 126.69 mL/s, 总和 364.30 mL/s, 低于流域出口处平均稳定产流 1430.33 mL/s, 所占的比例为 24.21%, 这个结果和支沟汇水面积占总汇水面积的比例基本相符。

#### 2.5 变雨强产流过程观测

30—70 mm/h 和 70—30—70 mm/h 变雨强的降雨产流过程分别见图 6a、b。变雨强的实现是通过 30—40—50—60—70 mm/h 和 70—60—50—40—30—40—50—60—70 mm/h 的离散近似实现的, 产流过程的观测结果可以精细地反映出该离散过程, 这证明流量观测仪器具有很高的灵敏度, 可以观测出产流对降雨变化的精确响应。仪器与人工观测结果的对比进一步验证了所采用的流量观测系统具有很高的可靠性, 该仪器作为降雨试验产流过程观测仪器是可行的, 并且可以实现精细观测, 可以为降雨产流响应过程的进一步研究提供新的有效手段。

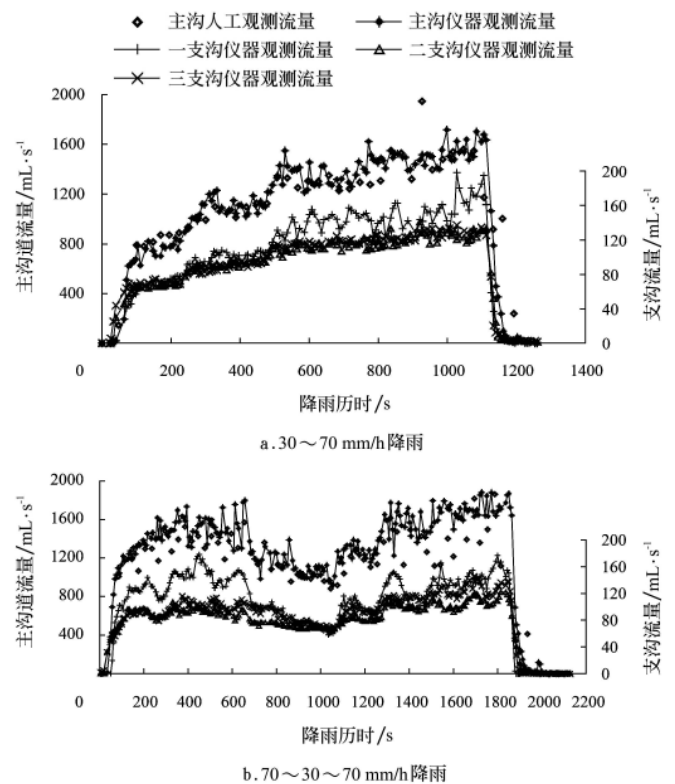


图 6 变降雨产流过程

Fig.6 Runoff process under variable rainfall intensity

从图 6 中可以看出人工观测结果和仪器观测结果具有很好的一致性。因为汇水时间一般比较短(1 min 左右), 而人工取样不可能在短时间内得到足够的样本(30—70 mm/h 降雨只观测到 1 个样点), 所以人工观测的产流过程很难真实具体地反映产流的汇水阶段。此外汇水阶段流量的变化幅度比较大, 人工观测方法得到的只是在取样时间内的一个平均值, 误差相对比较大。在人工取样过程中, 样点的时间记录的是开始采样的时间, 因此误差在图中反映为汇水阶段的人工观测过程比仪器观测超前, 而退水过程相对滞后。

从流量过程线可以看出, 在变雨强降雨的情况, 产流过程依然具有非常明显的汇水和退水过程(图 6b)。汇水和退水过程的曲线比较陡峭, 这是流域汇水面积与积水面积变化的结果, 随着流域尺度的增大这个过程会越来越缓慢。在该模拟实验室中, 流域面积相对很小, 降

雨开始后,汇水面积很快达到流域最大面积的,径流过程主要受降雨强度的影响,流量随雨强的变化而逐步增大或减小。总之,在变雨强的降雨条件下,如果流域比较小,或降雨历时足够长,产流过程可以分为,汇水、稳定和退水三个阶段,汇水与退水过程主要受降雨起始雨强和结束雨强的影响;稳定阶段的产流过程受雨强变化影响,支沟道和主沟道具有一致的流量过程,只是整个过程前者在时间上有一定的超前,数量上呈一定比例缩小。

### 3 结 论

本研究将小流域产流过程测量系统应用于室内流域模型,得到了不同降雨强度和历时组合的产流时空分布。

1) 仪器与人工观测的比较,表明仪器观测结果和人工观测结果在一致性上没有显著差别。仪器观测较人工观测精度和灵敏度更高,可以用于产流过程和降雨产流响应的定量研究。

2) 在定雨强的条件下,流量过程线表现出汇水、稳定和退水三个明显的阶段。其中汇水阶段和退水阶段变化较快,流量涨落的剧烈程度随雨强增大而增大,稳定阶段的持续时间和降雨历时成正比变化。空间特点上,主沟出口的汇水过程明显滞后于支沟出口的汇水过程,退水过程则具有相反的关系。

3) 在变雨强的情况下,流量过程线没有稳定的阶段,流量随降雨强度变化而变化,且支沟道和主沟道的流量过程具有相似性,汇水和退水的滞后与超前关系与定雨强一致。

该研究的试验方法和观测结果对于水文模型和土壤侵蚀模型的建立,以及不同动态模拟方法的正确性检验提供了可靠的依据。

### [参 考 文 献]

- [1] 沈冰,王文焰,沈晋.短历时降雨强度对黄土坡地径流形成影响的实验研究[J].水利学报,1995,(3):21-27.
- [2] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.
- [3] 许炯心.黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J].水土保持学报,1999,5(1):28-34.
- [4] 钱宁,万兆惠,钱意颖.黄河高含沙水流问题[J].清华大学学报,1979,19(2):27-34.
- [5] 王百田,王斌瑞.黄土坡面地表处理与产流过程研究[J].水土保持学报,1994,8(2):19-24.
- [6] 胡世雄,勒长兴,坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J].地理研究,1998,17(3):326-335.
- [7] 王万忠,焦菊英.黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J].水土保持通报,1996,16(5):21-28.
- [8] 吴发启,赵晓光,等.缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析[J].水土保持研究,2007,(1):12-17.
- [9] 王占礼,黄新会,张振国,等.黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J].水土保持通报,2005,25(4):1-4.
- [10] Stone J J, Lane L J, Shirley E D. Infiltration and runoff simulation on a plane[J]. Trans ASAE, 1992, 35(1): 161-170.
- [11] Uhlenbrook S, Leibundgut C. Development and validation of a process oriented catchment model based on dominating runoff generation processes[J]. Phys Chem Earth (B), 2000, 25(7-8): 653-657.
- [12] Uhlenbrook S. An empirical approach for delineating spatial units with the same dominating runoff generation processes [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(7): 297-303.
- [13] 吴钦孝,李秧秧.黄龙山区不同类型小流域的产流过程及其特征[J].中国水土保持科学,2005,3(3):10-15.
- [14] 王小平,牛四平.晋西王家沟小流域产流产沙分析[J].中国水土保持,2000,22(9):12-14.
- [15] Carey S K, Woo M K. Slope runoff process and flow generation in a subarctic subalpine catchment[J]. Journal of hydrology, 2001, 253: 110-129.
- [16] Aizen V, Aizen E, Glazirin G, et al. Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2000, 238: 15-34.
- [17] Navas A, Alberto F, Machrn J, et al. Design and operation of a rainfall simulator for field studies on runoff and soil erosion [J]. Soil Technology, 1990, 3(4): 385-397.
- [18] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills[J]. Trans ASAE, 2002, 45(6): 1897-1903.
- [19] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion [J]. Trans ASAE, 2002, 44(6): 1537-1542.
- [20] 高佩玲,雷廷武,邵明安,等.小流域土壤侵蚀及径流过程自动测量系统的实验应用[J].农业工程学报,2005,21(10):164-166.
- [21] 王育红,姚宇卿,吕军杰,等.豫西旱坡地高留茬深松对冬小麦生态效应的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):146-148.
- [22] 赵军,屈丽琴,赵晓芬,等.称重式坡面径流小区(含沙)水流流量自动测量系统[J].农业工程学报,2007,23(3):36-40.
- [23] 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.
- [24] 周佩华,窦保障,孙清芳.降雨能量的试验研究初报[J].水土保持通报,1981,1(1):51-61.
- [25] 王万忠.中国降雨侵蚀力R值的计算与分布[J].土壤侵蚀与水土保持学报.1996,2(1):29-39.
- [26] 唐克丽,等.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [27] 杨晓俊.用人工降雨揭示降雨产流特征和降雨入渗规律[J].地下水,2007,27(2):17-20.

## Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall

Qu Liqin<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>1,2\*</sup>, Zhao Jun<sup>2</sup>, Yu Xinxiao<sup>3</sup>, Gao Peiling<sup>4</sup>, Yan Lijuan<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Science and Ministry of Water Recourses, Yangling 712100, China;

3. Ministry of Education Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

4. College of Resource and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** A new automatic measurement system of flow was applied. Simulated rainfall experiments were conducted under constant and variable rainfall intensity in small watershed in the laboratory. Runoff processes of the watershed branches were monitored realtimely. Under the constant rainfall intensity, 12 rainfall experiments were conducted involving a complete combination of four kinds of rainfall intensity (25, 50, 75, 120 mm/h) and three kinds of rainfall duration (5, 10, 15 min). The experiments of variable rainfall intensity were conducted at 30-70 mm/h and 70-30-70 mm/h rainfall events. Under the constant rainfall intensity, the maximum averaged relative error of the measured values of stable flow between the automatic system measurement and the manual measurement is only 2.02%. The runoff diagrams had three obvious stages of initial runoff, stable flow and recession flow. The severe degrees of fluctuation in the processes of initial runoff and recession flow and the flow of stable flow were increased with the increasing of rainfall intensity while the duration of the stable crest segment was directly proportion to rainfall duration. The runoff processes at the watershed outlets delayed to those at the branches, but the processes no matter at the outlets or branches of the watershed were identical in shape. Under the variable rainfall intensity, the runoff processes had no stable segment and the flow changed with the rainfall intensity. The results are significantly meaningful for understanding the runoff process. The results also can provide reliable experimental support for related model research.

**Key words:** runoff, process, small watershed, automatic measurement, simulated rainfall