

侵蚀性风化花岗岩坡地降雨产流及水文过程研究

邓龙洲, 张丽萍, 邬燕虹, 范晓娟, 孙天宇, 费凯

(浙江大学土水资源与环境研究所, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 为研究坡地的降雨产流分配及水文动态过程, 以侵蚀性风化花岗岩坡地为研究对象, 采用室内人工模拟降雨的方法研究不同降雨强度(30, 60, 90, 120, 150 mm/h)和不同坡度(5°, 8°, 15°, 25°)条件下坡面径流和壤中流的分配特征与水文过程。结果表明: 坡面径流的初始产流时刻均随降雨强度和坡度的增大而提前, 壤中流的初始产流时刻明显滞后于坡面径流。壤中流径流量在不同坡度下随降雨时间的延长呈先递增后趋于平稳的现象, 雨强越大达到峰值的时间越早, 在降雨停止一段时间后径流量开始下降。多数情况下, 壤中流所占总径流量的比重均大于坡面径流, 坡面径流量比重随雨强的增大而增大, 随坡度的变化幅度较小。坡面径流的径流系数与雨强的相关性较强, 而壤中流径流系数与坡度之间的拟合效果较好。不同坡度下坡面径流、壤中流和混合流(坡面径流与壤中流同时发生)的径流模数与雨强呈正相关关系, 不同类型径流的径流模数大小依次为混合流>壤中流>坡面径流。

关键词: 坡面径流; 壤中流; 雨强; 坡度; 径流系数; 径流模数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0067-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.010

Characteristics of Rainfall Runoff and Hydrological Dynamics on the Erosive Weathered Granite Slope

DENG Longzhou, ZHANG Liping, WU Yanhong, FAN Xiaojuan, SUN Tianyu, FEI Kai

(Institute of Soil and Water Resources and Environment, Zhejiang Key Laboratory of Agricultural

Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: To study the characteristics and hydrological dynamics of rainfall runoff on sloping land, the overland flow and subsurface flow on the weathering granite sloping land at different rainfall intensities (30, 60, 90, 120, 150 mm/h) and slope gradients (5°, 8°, 15°, 25°) were comparatively studied with the method of artificial simulated rainfall. The results showed that the initial starting time of both the overland flow and subsurface flow advanced with the increase of rainfall intensity and slope gradient. The initial starting time of subsurface flow obviously lagged behind that of overland flow. With extension of rainfall time, the subsurface flow rate at different slope gradients turned to be stable after an increasing trend. The greater the rainfall intensity was, the earlier the subsurface flow rate reached the peak. And subsurface flow rate began to run down after the rainfall stopped for some time. In most cases, the proportion of subsurface flow was larger than that of the overland flow. The proportion of overland flow increased with the growth of rainfall intensity. Slope gradient, however, had little influence on the proportion of overland flow. The runoff correlation between the overland flow and rainfall intensity was relatively large, and the runoff coefficient of subsurface flow was mainly affected by slope gradient. The runoff modulus of overland flow, subsurface flow and mixed flow (overland flow and subsurface flow occurred simultaneously) showed a strong positive correlation with rainfall intensity and displayed the following order: mixed flow>subsurface flow>overland flow.

Keywords: overland flow; subsurface flow; rainfall intensity; slope gradient; runoff coefficient; runoff modulus

坡面地表径流和壤中流是流域径流的重要组成部分,直接影响流域的水文过程^[1],也会影响坡面土壤水分及养分的流失^[2-3],两者在水土流失和污染物质输移过程中有着同等重要的作用^[4]。国内外已经对坡面地表径流壤中流特征及其相互关系进行了一系列研究,研究流域径流与降雨之间的关系对解释降雨—径流产生机制^[5]、土壤水分再分布^[6-7]、非点源污染物迁移^[8-9]以及水文和溶质运动过程的准确模拟^[10-11]都有着非常重要的作用。已有研究资料表明,约 60% 的降雨径流和 90% 的土壤流失均发生在降雨集中期^[12]。水是养分流失的重要载体,也是土壤侵蚀的主要动力因子^[13]。在土壤性质相同的条件下,雨强和坡度是影响坡面径流过程的主要因素。地表径流和壤中流的比例随雨强和坡度的不同而发生变化^[14]。坡度是影响坡面径流侵蚀能力的动力因子,坡度的陡缓决定了坡面径流动力比降的大小^[15]。大量的研究表明,在一定范围内,坡度越大时产生地表径流和土壤流失量越高^[16-21]。也有研究^[22]表明,当坡度达到某些值时,坡度和土壤侵蚀之间的关系出现反转。张会茹等^[23]研究了不同降雨条件下坡度对红壤坡面产流和侵蚀过程的影响,得出的结论为坡面径流和坡面土壤侵蚀量都随雨强的增大而增大,但是随坡度的变化较为复杂,在不同的雨强下呈现不同的趋势。土壤水分的变化很大程度上受降雨的影响,其对降雨的响应过程是土壤水文循环的核心组成部分之一^[24],同时土壤水分又是降雨径流响应的主要控制因素^[25]。为了研究湿润地区降雨—土壤水的水文过程,刘宏伟等^[26]在太湖西侧通过野外坡面试验来研究地表和地下剖面上土壤水分对降雨过程的响应模式;付智勇等^[27]通过对紫色土区原位人工模拟降雨试验研究指出降雨强度和表土结皮程度是影响土壤水分过程和壤中流过程的主要因素;谢颂华等^[28-29]采用野外大型土壤入渗装置开展了自然降雨条件下降雨—产流过程的观测试验,结果表明雨型、降雨量、前期土壤含水量影响壤中流产流量及其过程,并指出红壤坡地地下径流占总径流的 80% 以上;郑海金等^[30]利用室内模拟试验研究了红壤坡地壤中流、地表径流产流特征,指出壤中流产流量占总径流量 52.26%~67.19%,是红壤坡耕地重要的径流形式;徐勤学等^[31]利用野外模拟降雨试验研究认为壤中流的发育受到土地利用类型的影响,荒坡地壤中流径流强度远大于坡耕地,并且坡耕地壤中流径流系数随降雨强度的增加而显著减少。

综上所述,目前关于降雨产流及径流分配特征的研究主要集中于紫色土和典型性红壤,侵蚀性风化花岗岩坡地降雨径流及水文过程的研究报道甚少。我

国南方风化花岗岩坡地分布面积很广,是南方红壤山地丘陵坡地水土流失最为严重的典型代表,形成大面积严重退化的生态系统。因此,研究侵蚀性风化花岗岩坡地降雨产流特征和水文动态过程,对于该地区坡地水土流失预防和汇流沟道洪峰过程的调节具有重要的意义。鉴于此,本研究采用室内人工模拟降雨方法,模拟研究了侵蚀性风化花岗岩坡地的降雨产流及水文动态过程,分析了壤中流和坡面径流的产流分配特征,比较了不同降雨强度和不同坡度条件下降雨产流的径流系数和径流模数,以期深入了解侵蚀性风化花岗岩坡地降雨径流的水动力学特征、土壤养分渗漏和污染物运移的研究提供方法和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2017 年 3—8 月在浙江大学农业科学试验站(中国长兴)的人工模拟降雨实验大厅进行,该降雨设备采用西安清远测控技术有限公司研发的 QYJY-502 型便携式自动人工模拟降雨系统,主要由降雨喷头、供水管路、压力表、回水阀、供水水泵、不锈钢支架、开关阀等部分组成,降雨高度为 6 m,降雨均匀系数在 80% 以上,雨强连续变化范围为 15~200 mm/h。土槽根据人工降雨装置有效降雨面积自行设计,由钢板焊接组成,长宽高分别为 200 cm×100 cm×60 cm,坡度在 0~30°内可以灵活调节。槽底部的前侧和左右两侧设置延伸槽,高度 3 cm,内铺小孔径的金属细网,用于方便收集壤中流。表面径流通过土槽上部的前集流槽收集。

1.2 供试土壤

土壤采自浙江省安吉县,该地气候宜人,属亚热带海洋性季风气候,总特征为光照充足、气候温和、雨量充沛、四季分明,适宜农作物的生长。全县年平均降水量 1 414 mm,降雨日数 171 d,年日照时间 1 792 h,年平均气温 15.60℃。土壤发育于侵蚀性风化花岗岩母质,地带划分属于红壤,呈弱酸性,平均容重为 1.55 g/cm³,自然状态下初始水分含量为 6.40%,有机质含量 2.70 g/kg,速效磷含量 10.93 mg/kg,粒径组成为黏粒(<0.002 mm)占 8.24%,粉粒(0.002~0.02 mm)占 12.25%,砂砾(0.02~2 mm)占 79.51%。采集 0—60 cm 土壤,为了控制填土过程土壤密度保持一致,采取分 12 层填土,边填边压实,每层 5 cm。土块移入土槽后,在自然状态放置 4 周使土体恢复自然特征后进行降雨试验。每次降雨试验结束后更换最上层 5 cm 土壤,进行下一次试验前监测土壤含水率,保证每次试验的土壤初始含水量相同。

1.3 试验过程

本试验通过坡度和雨强来设置各处理组,共设计

30,60,90,120,150 mm/h 5 个降雨强度处理,搭配 5°,8°,15°和 25°4 个坡度,为保证试验精度,每个处理均进行 2 个重复试验,取平均值分析。坡面径流收集的总时间为产流开始后的 90 min,壤中流收集的总时间为壤中流产流开始后的 180 min,总降雨历时为开始降雨到坡面径流收集结束为止。每 3 min 取 1 次径流泥沙样,径流样品测量体积后取适量样品用于后续分析,静置烘干测量产沙量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 软件进行数据统计及制表,通过 Origin 软件进行数据分析、建立回归方程及绘图。

2 结果与分析

2.1 坡面径流与壤中流的产流过程

坡度和雨强对侵蚀性风化花岗岩坡地径流的初始产流时间有一定的影响,试验条件下坡面径流的初始产生时间(T_s)和壤中流的初始产生时间(T_i)都存在非常明显的规律。由表 1 可知,坡度相同的条件下, T_s 均随雨强的增大而提前,时间从大到小依次为 30>60>90>120>150 mm/h。以 5°坡度为例, T_s 随雨强增大依次减小了 13.08,7.33,2.17,0.62 min,其他坡度条件下也呈现相同的递变规律,但是减小的程度随着坡度的增大而逐渐变弱。在降雨强度一致的情况下, T_s 整体随着坡度的增大而提前,时间从大到小依次为 5°>8°>15°>25°, T_s 减小的程度随着降雨强度的增大而逐渐变弱。坡度相同的情况下, T_i 与 T_s 的变化规律基本相同;不同坡度下,30,60,90,120 mm/h 的 T_i 变化比较规律,150 mm/h 的最大值出现在 25°坡度,而最小值出现在 15°坡度。简而言之, T_s 和 T_i 均随着降雨强度与坡度的增大而逐渐减小,最大值出现在最小坡度最小降雨强度条件下,最小值出现在最大降雨强度的大坡度条件下。经计算可知, T_s 和 T_i 的差值即壤中流滞后于坡面径流的发生时间也存在着随雨强增大递减的规律,随坡度变化的规律不明显。

在不考虑试验过程中降雨挥发量和其他系统误差的情况下,有效降雨量转化为坡面径流和壤中流,对不同坡度和雨强条件下坡面径流与壤中流的产流过程分析见图 1。在 30,60 mm/h 小雨强下的坡面径流量非常少,在雨强相同的情况下几乎不随产流时间和坡度的变化而改变。在坡度相同时,90,120,150 mm/h 雨强的坡面径流量随着降雨时间的延长而逐渐增大,降雨初期的增幅最大,随后趋于平缓,增大的程度从小到大依次为 90<120<150 mm/h。在不同

坡度的相同降雨时间内,90,120,150 mm/h 雨强的坡面径流量在整体上随着坡度的增加而逐渐减少。在降雨一定时间后产生壤中流,雨强越大,产生壤中流的时间越早,达到峰值的时间也越快。由于壤中流峰值是在降雨停止后开始下降的,因此理论上雨强越大峰值越高,下降的幅度也就越大。5°和 8°的情况下,壤中流最大峰值出现在 90 mm/h 雨强条件下,而且 120 mm/h 的峰值也高于 150 mm/h 的峰值。降雨强度相同的情况下,壤中流径流量基本上随坡度的增加呈现递减的趋势,这与坡面径流的变化规律恰好相反。

表 1 不同坡度与降雨强度下初始产流时间

		单位:min				
径流类型	坡度/ (°)	降雨强度/(mm·h ⁻¹)				
		30	60	90	120	150
T_s	5	24.33	11.25	3.92	1.75	1.13
	8	16.00	2.42	1.11	0.92	0.55
	15	16.00	3.60	0.83	1.17	0.55
	25	3.42	2.58	2.25	0.50	0.33
T_i	5	85.33	60.25	43.96	19.83	18.00
	8	84.50	62.00	34.25	19.13	18.05
	15	68.65	36.55	36.48	27.00	13.79
	25	67.92	35.33	28.33	19.00	18.17
T_s-T_i	5	61.00	49.00	40.04	18.08	16.87
	8	68.50	59.58	33.14	18.21	17.50
	15	52.65	32.95	35.64	25.83	13.24
	25	64.50	32.75	26.08	18.50	17.83

在土壤初始含水率相同的前提下,降雨径流发生的时间主要与坡度和降雨强度有关,而坡面的入渗情况和土槽的承雨面积也会对径流的发生产生影响^[4]。侵蚀性风化花岗岩母质发育的土壤质地粗糙,砂砾和粉粒的含量达到了 90%以上,对水分的保持能力较差,使得土壤的含水率非常低。降雨初期,雨水用于湿润土壤和填充土层的孔隙,致使坡面产流后于降雨^[32]。雨强较小时,土壤入渗能力大于供水能力,水分的入渗主要以供水速率为主,坡度越大则在垂直方向所受的重力作用越大,坡面径流和壤中流运动得更快,因此坡度越大径流发生所需的时间越短。在坡度相同时,雨强越大单位时间内进入土槽内的降雨量就越大,土壤能更快地达到饱和,促进坡面径流和壤中流发生。坡面径流的运动路径相对较短,在 25°大坡度和 120,150 mm/h 大雨强时的发生时间都很短。壤中流的运动路径较长,水分运动情况复杂,在改变坡度的情况下径流产生的时间变化不大,改变雨强时的变化比较明显。

2.2 坡面径流与壤中流的径流系数

考虑到试验初期降雨量作用于土壤使之达到最大持水量和试验采集时间结束后还存在少量的壤中

流等因素,在计算径流系数(径流总量/降雨总量)时将坡面径流和壤中流进行区分,分别求出坡面径流的径流系数 a_s 和壤中流的径流系数 a_i 。由图 2 可知, a_s 在同一坡度下随着雨强的增大而增大,规律性比

较明显,可以进行多项式拟合,函数关系式为:

$$a_s = a \times I^2 + b \times I + c \quad (1)$$

式中: a_s 为坡面径流的径流系数; I 为雨强(mm/h); a 、 b 、 c 为相关系数,相关性拟合的结果见表 2。

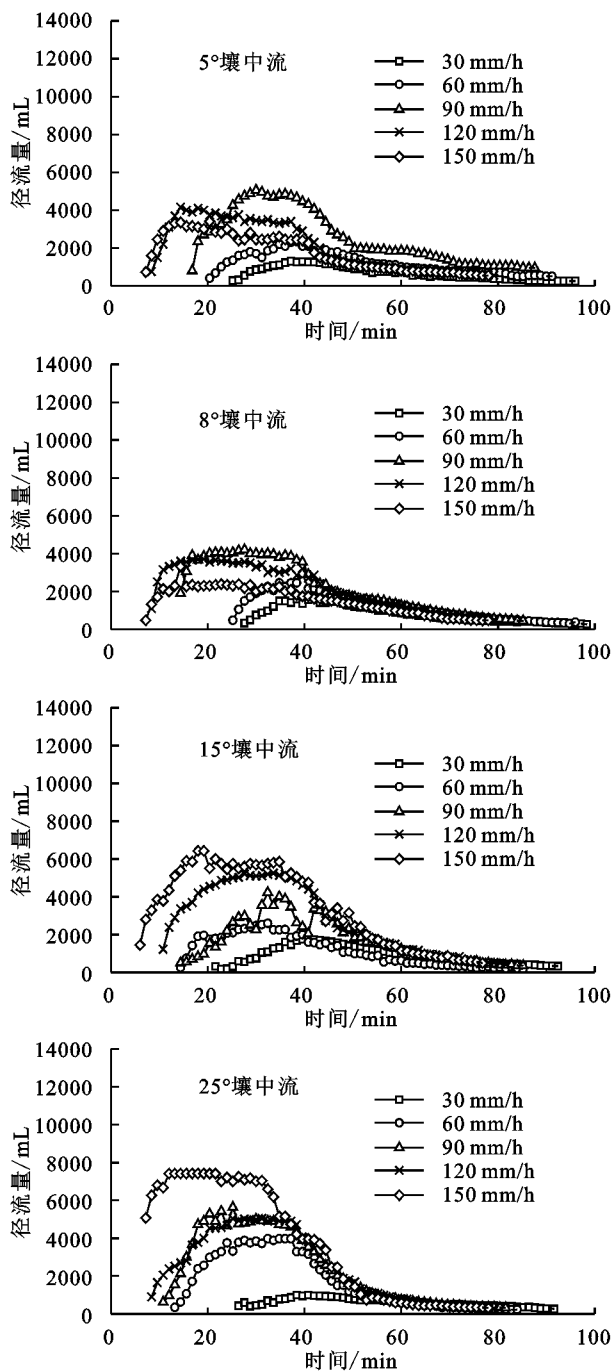
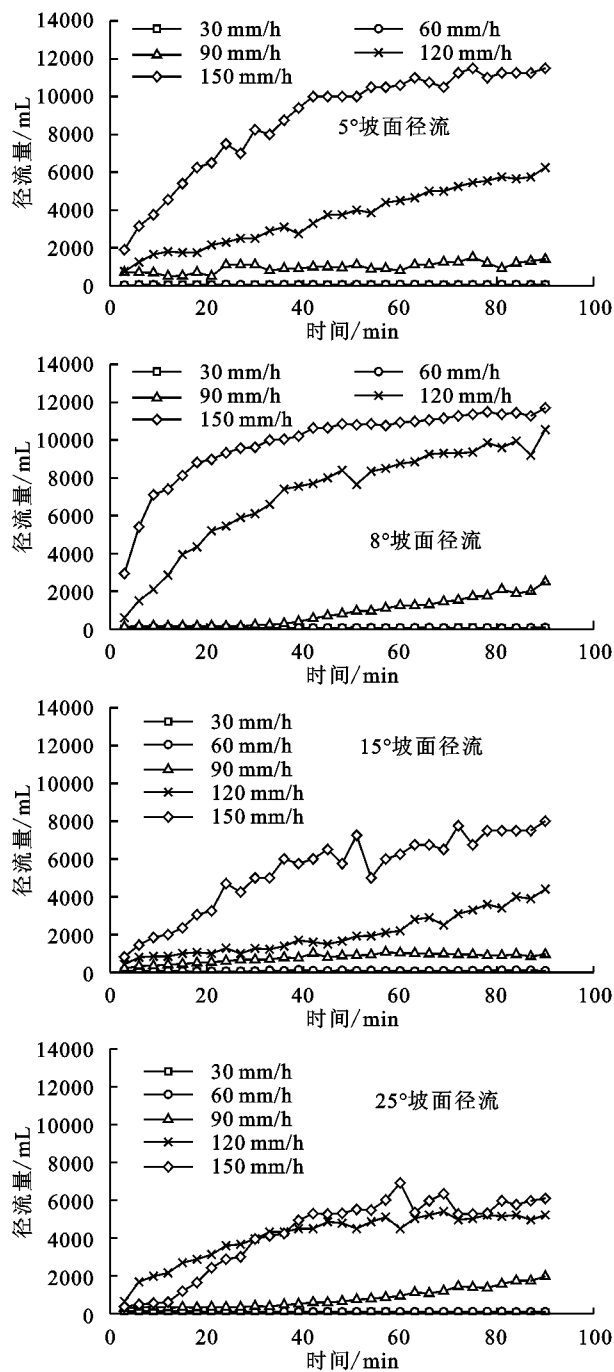


图 1 不同坡度和雨强下坡面径流与壤中流的产流过程

在相同雨强条件下 a_s 随坡度变化的大小次序为 $25^\circ > 8^\circ > 5^\circ > 15^\circ$ 。 a_i 在 5° 、 8° 时随着雨强的增大减小,大坡度时则变化复杂;在相同雨强条件下,随坡度的变化可以进行多项式拟合,函数关系式为:

$$a_i = A \times S^2 + B \times S + C \quad (2)$$

式中: a_i 为坡面径流的径流系数; S 为坡度($^\circ$); A 、 B 、 C 为相关系数,相关性拟合的结果见表 2。

由表 2 可知, a_s 与雨强 I 之间的拟合效果在不同

坡度下从高到低依次为 $5^\circ > 15^\circ > 8^\circ > 25^\circ$,对应的相关系数 c 也呈现相同的变化规律,而相关系数 a 随着坡度的增加而减小, b 则没有一定的变化规律。 a_i 与坡度 S 之间的拟合效果在不同雨强条件下由高到低依次为 $30 > 60 > 120 > 150 > 90$ mm/h,前 4 个雨强的 R^2 均大于 0.90,拟合效果较好,而 90 mm/h 雨强下的 R^2 不到 0.50,拟合效果较差。不同雨强下 a_i 和坡度 S 之间的相关系数 A 、 B 、 C 之间没有明显规律

性。拟合的结果表明,坡面径流的径流系数 α_s 主要受雨强的影响,而壤中流的径流系数 α_i 则主要受坡度的影响。坡面径流随坡度变化较为复杂这一结果

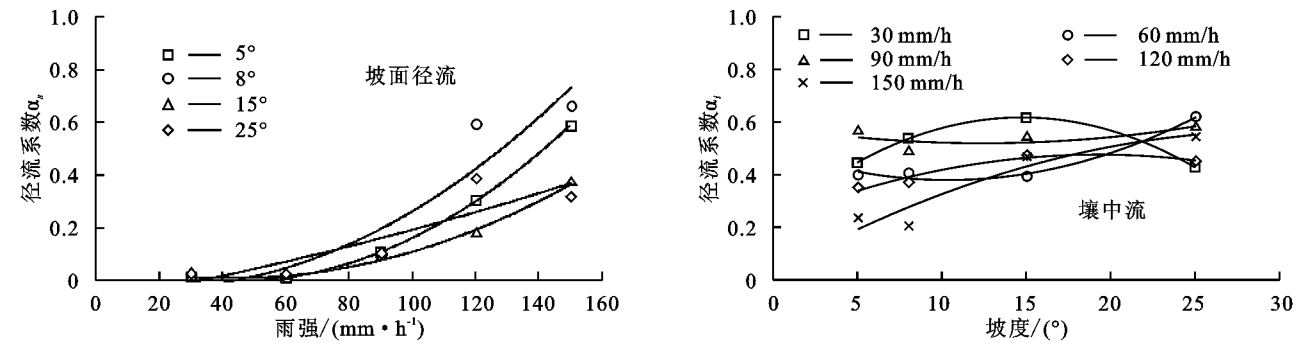


图 2 不同坡度与雨强下坡面径流和壤中流的径流系数

表 2 不同坡度与雨强下坡面径流和壤中流的径流系数拟合结果

径流类型	模拟条件	拟合方程	拟合度 R^2
坡面径流	坡度 $S/(^{\circ})$	5 $\alpha_5=0.000054I^2-0.00484I+0.10908$	0.9998
		8 $\alpha_8=0.000044I^2-0.00168I-0.00102$	0.8912
		15 $\alpha_{15}=0.000031I^2-0.00268I+0.06356$	0.9944
		25 $\alpha_{25}=0.000006I^2+0.00214I-0.07954$	0.7813
壤中流	降雨强度 $I/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	30 $\alpha_{30}=-0.001803S^2+0.05317S+0.0.22561$	0.9996
		60 $\alpha_{60}=0.001108S^2-0.02289S+0.49668$	0.9815
		90 $\alpha_{90}=0.000412S^2-0.01018S+0.58138$	0.4865
		120 $\alpha_{120}=-0.000678S^2+0.02603S+0.22551$	0.9412
		150 $\alpha_{150}=-0.000593S^2+0.03572S+0.02775$	0.9007

2.3 坡面径流与壤中流的分配与径流模数

由表 3 可以看出,在坡度相同时壤中流占总径流量的值随着雨强的增大总体上呈减小趋势,这是由于雨强越大,雨滴动能和终极速度越大,对土壤表层稳定性破坏越大,容易形成地表结皮,减少了降雨的土壤入渗量;另一方面,雨强的增大也会引发坡面径流的运动加快,加上坡面径流的运动路径较短,坡面径流的占比变大,所以壤中流的比重相应减小。在 30, 60, 90 mm/h 雨强时,在同一雨强下不同坡度的壤中流比重基本相同,这是降雨量向下入渗引起的;在 120, 150 mm/h 雨强下壤中流比重随坡度的变化没有明显的规律,表明不同的降雨强度下的临界坡长不一样。由于总径流量包括了壤中流和坡面径流,坡面径流占总径流量的比重变化规律与壤中流的相反。

表 3 不同坡度不同雨强下壤中流占总径流量的比重
单位: %

雨强/ (mm · h ⁻¹)	5°	8°	15°	25°
30	96.92	97.31	98.50	94.84
60	98.20	97.58	96.50	96.84
90	83.94	83.20	85.99	85.14
120	53.56	38.38	73.09	54.22
150	28.53	23.45	55.80	63.41

在人工模拟降雨停止之前,坡面径流与壤中流事件基本上都已发生,壤中流的发生滞后于坡面径流,

与张会茹等^[23]的研究结果一致,坡度和雨强对于坡面径流系数和壤中流径流系数的影响存在着彼此消长的关系。

因此存在着一段壤中流和坡面径流同时发生的时间段,将该时间段内降雨产流总量(坡面径流量与壤中流径流量的总和)定义为混合流。对每一场降雨的径流收集分为坡面径流、混合流和壤中流 3 个部分进行径流模数(单位流域面积单位时间内所产生的径流量)的计算。由图 3 可知,不同坡度不同雨强下的混合流的径流模数最大,而且在相同的坡度条件下,随着雨强的增大而显著增大,降雨强度相同时基本上不随坡度改变。除了最大雨强最大坡度条件下的一个畸点外,坡面径流的变化规律与混合流类似,但在 120, 150 mm/h 大雨强下,坡面径流的径流模数随坡度变化大小为 8°>5°>15°>25°。壤中流的径流模数在 5°和 8°坡度下随着雨强的增大呈先增后减小的变化趋势,雨强大于 90 mm/h 后的壤中流,径流模数小于坡面径流的径流模数;在 15°和 25°条件下,壤中流的径流模数随着雨强的增大而增大,在数值上基本都大于坡面径流的径流模数。雨强相同时,壤中流的径流模数随坡度的变化不大。理论上,不同类型径流模数的大小为混合流>壤中流>坡面径流。由于试验过程中壤中流的采集时间为 180 min,因此 5°和 8°条件下可能存在大量的水分仍然保留在土壤中,而不能像 15°和 25°条件下及时流出,对试验结果造成一定的影响。因此,在后续的研究中应该将此类因素考虑到试验操作过程中。

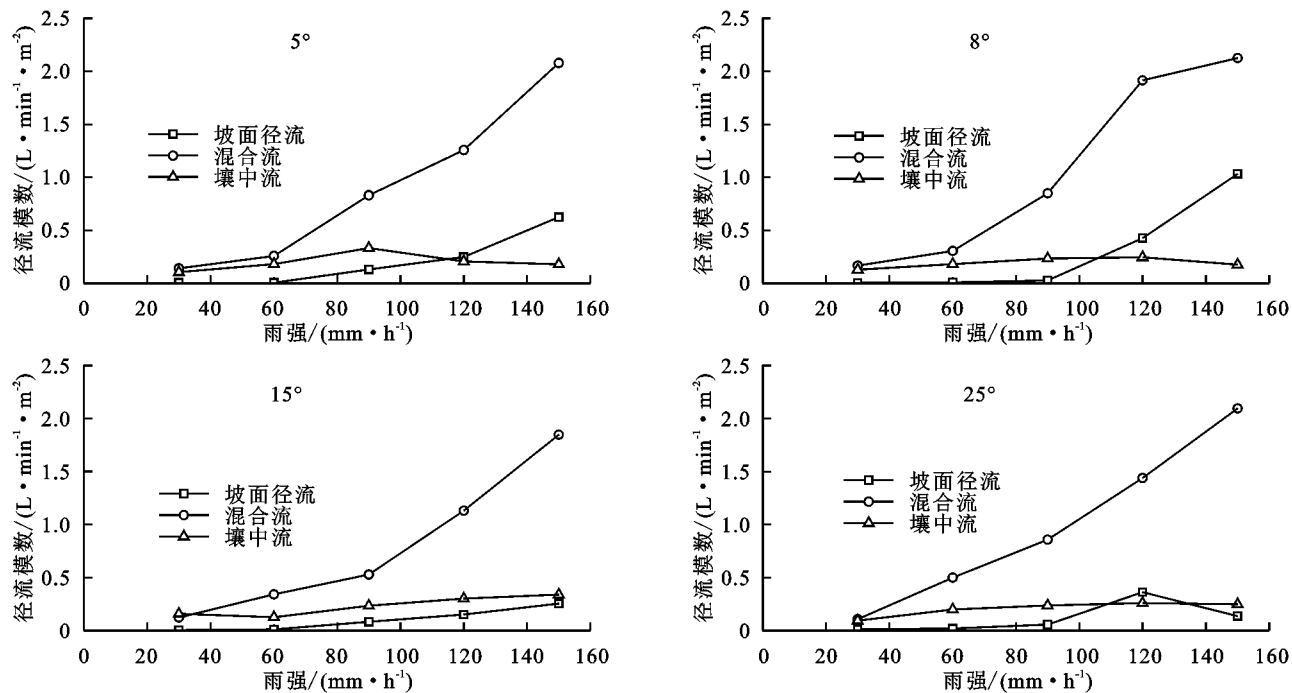


图 3 不同坡度下坡面径流、壤中流以及混合流的径流模数随雨强的变化趋势

3 结论

通过对侵蚀性风化花岗岩坡地的降雨产流特征和水文动态过程的模拟研究,得出主要结论为:

(1)坡面径流和壤中流的初始产流时刻均随降雨强度和坡度的增大而提前, T_i 随坡度和雨强的增大明显减小, T_i 随雨强的增大而明显减小,但随坡度的增大,其减小幅度不大。壤中流的初始产流时刻明显滞后于坡面径流,雨强愈小滞后的时间愈长。

(2)坡面径流和壤中流的分配随雨强和坡度的不同而发生变化。在大部分情况下(85%)坡面径流量小于壤中流流量,雨强愈小壤中流流量的比重越大,坡度对壤中流流量比重的影响不明显。

(3)坡面径流的径流系数与雨强之间的相关性拟合效果较好,与坡度之间的拟合效果很差;壤中流的径流系数主要受坡度大小的影响,与雨强的相关性关系较差。坡度和雨强对于径流系数的影响存在彼此消长的关系。

(4)不同径流类型径流模数的大小依次为坡面径流<壤中流<混合流。不同坡度下坡面径流、壤中流和混合流的径流模数随雨强的增大而增大,混合流增大的幅度最明显。

总之,在侵蚀严重的风化花岗岩砂土层出露的坡地,降雨产流以壤中流所占比重较大。揭示出砂土层出露坡地的降雨再分配过程明显不同于典型性的地带性红壤和紫色土,在理论上为本研究领域的拓展提供了思路,在生产实践上为沟道汇流洪峰的调节提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] Ala-Aho P, Soulsby C, Wang H, et al. Integrated surface-subsurface model to investigate the role of ground-water in headwater catchment runoff generation: A minimalist approach to parameterisation[J]. Journal of Hydrology, 2017, 547(4): 664-677.
- [2] 莫明浩, 谢颂华, 张杰, 等. 红壤坡地氮溶质分层输出特征试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 924-933.
- [3] Bechmann M. Long-term monitoring of nitrogen in surface and subsurface runoff from small agricultural dominated catchments in Norway[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 198(12): 13-24.
- [4] 李馨欣, 王小燕, 蔡崇法, 等. 紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 25-31.
- [5] 田坤, Huang C H, 田鹏, 等. 降雨—径流条件下混合层深度模拟试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 188-192.
- [6] 彭娜, 谢小立, 王开峰, 等. 红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 17-20.
- [7] 朱磊, 田军仓, 孙晓磊. 基于全耦合的地表径流与土壤水分运动数值模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 322-330.
- [8] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1220-1226.
- [9] Liu C, Wu G X, Mu H Z, et al. Synthesis and application of lignin-based copolymer LSAA on controlling non-point source pollution resulted from surface runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(7): 820-826.
- [10] 田坤, Huang C H, 王光谦, 等. 降雨—径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 81-87.
- [11] Verseveld W J V, McDonnell J J, Lajtha K. A mechanistic assessment of nutrient flushing at the catchment scale[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(3/4): 268-287.

- [12] Villatoro-Sánchez M, Bissonnais Y L, Moussa R, et al. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523(4): 409-426.
- [13] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 三峡库区不同厚度紫色土坡耕地产流机制分析[J]. *水科学进展*, 2011, 22(5): 680-688.
- [14] 何凡, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩地区降雨因子对优先流的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 75-78.
- [15] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降水入渗影响的模拟试验[J]. *水土保持通报*, 1984(4): 10-13.
- [16] 王秀英, 曹文洪, 陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J]. *泥沙研究*, 1998(2): 36-41.
- [17] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. *地理学报*, 1999, 54(4): 347-356.
- [18] 李凤英, 何小武, 周春火. 坡度影响土壤侵蚀研究进展[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(6): 229-231.
- [19] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [20] Kateb H E, Zhang H, Zhang P, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. *Catena*, 2013, 105(5): 1-10.
- [21] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Laboratory investigation on the role of slope on infiltration over grassy soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 542-547.
- [22] 刘松波, 庄春兰, 孟琳琳. 坡度对坡面侵蚀产沙响应的研究[J]. *中国水土保持*, 2009(5): 44-47.
- [23] 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.
- [24] Yu Z, Carlson T N, Barron E J, et al. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(5): 1313-1326.
- [25] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 358-389.
- [26] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 822-829.
- [27] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J]. *水利学报*, 2011, 42(8): 899-907.
- [28] 谢颂华, 莫明浩, 涂安国, 等. 自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 132-138.
- [29] 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 526-534.
- [30] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 41-45.
- [31] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 229-234.
- [32] Vente J D, Poesen J, Verstraeten G. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1/4): 63-86.

(上接第51页)

- [10] Vidon P, Cuadra P E. Impact of precipitation characteristics on soil hydrology in tile-drained landscapes[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(13): 1821-1833.
- [11] 高朝侠, 徐学选, 赵妍娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. *生态学报*, 2014, 34(11): 2801-2811.
- [12] 盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘—淀粉染色示踪研究[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 144-148.
- [13] 潘网生, 许玉凤, 卢玉东, 等. 基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 140-147.
- [14] 陈晓冰, 程金花, 陈引珍, 等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 174-186, 194.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [16] 张韫. 土壤、水、植物理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [17] van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78(1): 36-47.
- [18] Bargués Tobella A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. *Water Resources Research*, 2014, 30(7): 3342-3354.
- [19] 吴庆华, 张家发, 蔺文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 82-90.
- [20] 盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(1): 101-108.