

黄土坡面片流产流过程模拟研究*

刘俊娥^{1,3} 王占礼^{2,3†} 高素娟¹ 张宽地⁴ 陈浩^{1,3} 王莎^{1,3}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(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 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 采用模拟降雨试验方法对黄土坡面片流产流过程进行了试验研究, 试验雨强分别为 1.00、1.33、1.67、2.00、2.33 mm min⁻¹, 坡度分别为 9°、12°、15°、18°、21°。结果表明: 1) 不同雨强及不同坡度条件下, 坡面片流径流率随降雨历时的变化均呈先增大后趋于稳定的趋势, 不同雨强下较不同坡度下趋于稳定的时间早 5 min 左右, 变化过程皆可用对数方程 $y = a \ln(x) + b$ 描述; 2) 坡面片流径流深随雨强及坡度的变化皆可用幂函数方程 $H = at^b$ 和 $H = aS^b$ 描述; 3) 坡面片流径流深对坡度和雨强的综合响应可用二元幂函数方程 $H = 3.83t^{1.01} S^{0.490}$ 描述, 且雨强的影响大于坡度; 4) 黄土坡面片流产流的片蚀效应显著, 不同雨强及不同坡度条件下片流产流的片蚀效应分别表现为幂函数方程 $M = 0.0378 H^{1.21}$ 及线性方程 $M = 0.235H - 3.48$ 。

关键词 黄土坡面; 片流; 产流; 片蚀

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

干旱与土壤侵蚀是我国黄土地区并存的两大环境问题。地表径流是造成坡面土壤侵蚀的直接动力, 一般情况下, 坡面土壤侵蚀的强烈程度与坡面径流特征密切相关^[1-2]。我国黄土地区不仅年降雨量低, 而且降水变率大, 往往以暴雨形式降落, 形成超渗径流, 使该区有限而宝贵的降水资源大量流失, 加之该区黄土土壤抗冲抗蚀性很弱, 以致在水流失的同时, 也引起了严重的土壤侵蚀。因此, 如何有效调控黄土地区坡面径流, 已成为解决该地区干旱问题和控制土壤侵蚀的关键措施。

我国黄土地区的土壤侵蚀具有明显的垂直分带性^[1], 在黄土坡面上由分水岭向下依此出现片蚀带、细沟侵蚀带、浅沟侵蚀带等^[1]。在片蚀带, 坡面产流均为片流。在细沟侵蚀带, 由于细沟狭长, 只具有一定密度, 并不布满该带, 细沟间区的面积占了该带面积的绝大部分, 所以坡面产流实际上大多数还是片流, 细沟直接产生的净雨很少, 细沟流主要来自该带细沟间区及上部片蚀带的部分片流汇入细沟后形成, 所以该带产流主要是片流。在浅沟侵蚀带, 侵蚀类型由浅沟侵蚀、细沟侵蚀、细沟间

侵蚀组成, 由于浅沟密度更小, 浅沟占据该带的面积更少, 浅沟直接产生的净雨更少, 浅沟流主要来自该带细沟间区的片流汇入细沟后再汇入浅沟及上部细沟侵蚀带的部分径流汇入浅沟后共同形成, 前已述及细沟间共存区的径流主要来自片流产流, 所以, 该带产流主要是片流。由此可见, 黄土地区整个坡面的产流主要来自片流产流^[3], 控制住片流产流, 不仅能控制细沟流、浅沟流, 而且也能控制整个坡面产流。由于产流与侵蚀同时发生演变且密切相关, 产流是侵蚀的直接动力, 所以, 控制住片流产流, 即控制住了片蚀, 以及控制了细沟侵蚀、浅沟侵蚀, 因而控制了整个坡面侵蚀。因此, 阐明黄土坡面片流产流过程, 不仅可为调控和利用坡面片流径流资源, 乃至细沟径流、浅沟径流及整个坡面径流资源提供科学依据, 也为揭示黄土坡面片蚀过程奠定重要基础, 并为防治黄土坡面片蚀, 乃至细沟侵蚀、浅沟侵蚀及整个坡面侵蚀提供科学依据。可见, 开展黄土坡面片流产流过程研究对于该区同时解决干旱与土壤侵蚀并存的两大环境问题, 实现农业可持续发展、水土流失治理和生态环境建设,

* 国家自然科学基金项目(40971172, 41171227)资助

† 通信作者, E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 刘俊娥(1987—), 女, 山西省河曲县人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: liujune20041021@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-04-01; 收到修改稿日期: 2012-07-23

促进坡面产流与侵蚀理论的发展具有重要意义。

坡面水流是指顺坡面流动的浅层水流,均匀覆盖土壤表面的水流称为片流^[2],又称为细沟间水流。诸多学者对坡面产流规律进行了研究。张光辉等^[4]和朱冰冰等^[5]对草本覆盖地表的产流进行了研究,结果表明人工草地径流起始时间随植被覆盖度的增大呈线性递减,而天然荒草地植被覆盖度为0%~60%时,产流量随植被覆盖度增加迅速降低,植被覆盖度>80%时,覆盖度的增加不能引起产流量的大幅度下降,植被对产流的调控作用趋于稳定。王占礼等^[6-8]对黄绵土裸坡条件下的降雨产流过程进行了研究,结果表明坡面径流深沿程分布呈现出具有对数变化特征的递增趋势。姚文艺等^[9]研究了不同立地下的黄土坡面产流过程特征,结果表明裸地径流过程具有明显的起涨阶段,而草地和灌木地的起涨阶段不明显,对径流过程具有消波调控作用。郑子成等^[10]和吴淑芳等^[11]研究了不同调控措施下的产流特性,结果表明通过不同耕作措施形成不同地表糙度后,降雨产流径流量随地表糙度的增加呈指数递减关系,而坡面采取了鱼鳞坑、苜蓿草地、秸秆覆盖径流调控措施后,径流流速明显降低,水流流态明显平缓,水流阻力显著增加。方海燕等^[12]对黄土丘陵沟壑区坡面产流能力对因子的响应进行了研究,结果表明研究区存在高强度短历时的A型雨、低强度长历时的C型雨以及居于二者之间的B型雨,不同雨型下坡面产流能力大小为A型雨>B型雨>C型雨。陈力等^[13]验证了用运动波理论和Green-Ampt入渗模型模拟坡面产流的有效性。吴发启^[14]建立了缓坡耕地的产流经验模型。穆天亮等^[15]则通过应用模拟降雨试验资料进行检验表明,基于短历时Philip入渗公式建立的降雨产流模型可以用于描述坡面降雨产流过程。肖波等^[16]验证了SCS-CN模型估算黄土高原流域径流的有效性。

以往这些研究对裸坡、草被、灌木、耕作、鱼鳞坑、秸秆覆盖等条件下的坡面产流问题进行了较全面的研究,揭示了各自研究条件下的坡面产流过程、产流对影响因子的响应特征及径流调控效应,验证和建立了研究条件下的产流模型,促进了坡面产流研究的发展。但这些研究及其结果针对的坡面水流类型比较笼统,少有明确针对坡面片流进行研究,对于黄土高原地区的产流研究则主要在黄绵土区开展,而针对黄河多沙粗沙来源区的沙黄土坡面的产流特性研究很少。因此,本文选择黄土高原

地区侵蚀产沙最强烈的多沙粗沙区的沙黄土坡面,采用模拟降雨试验方法,研究黄土坡面片流的产流过程,为黄土高原多沙粗沙区坡面径流资源的有效调控与高效利用,以及坡面土壤侵蚀的有效防治提供科学依据,并为深入揭示该区坡面片蚀过程奠定基础。

1 材料与方 法

试验在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人工模拟降雨大厅进行。试验土壤取自位于黄河多沙粗沙区的陕西省神木县,土壤类型为沙黄土,土壤机械组成为砂粒占65.2%,粉粒占27%,黏粒占5.8%。土壤中值粒径为0.095 mm。所有试验用土装槽之前自然风干并过5 mm筛,除去杂草和石块。

1.1 试验设置

试验小区尺度为长1 m,宽0.5 m,深0.4 m,底部铺设厚10 cm的天然细沙模拟天然坡面的透水状况,上层填土厚度为20 cm,每次试验均装填新土。为了降低土壤装填的变异性,每场试验前均进行30 mm h⁻¹的预降雨,时间以产流刚出现时停止为标准,预降雨和正式试验间隔12 h。

试验填土容重为1.5 g cm⁻³,通过测定过筛风干土壤含水量、按设计容重计算与称重装土、按5 cm厚度分层填装,最后再用环刀法测定装土容重,以保证装填土壤达到试验要求。

试验设计雨强分别为1.00、1.33、1.67、2.00、2.33 mm min⁻¹,设计坡度分别为9°、12°、15°、18°、21°。采用雨强和坡度的完全组合,设计重复试验一次,共50场次。试验时,在小区的径流出口每分钟接一次径流泥沙样,接样时间30 s。降雨历时为坡面开始出现细沟即停止试验,本试验历时在11~17 min之间。

1.2 分析测定

降雨结束后,用量筒量取接样浑水体积,用烘箱在105℃下烘干泥沙,并用天平称取泥沙质量^[7]。根据观测的径流量和小区投影面积计算相应的径流深,根据测得的泥沙质量和小区投影面积计算相应的片蚀模数,计算公式为:

$$y = \frac{10q}{at}$$

式中, y 为径流率,mm min⁻¹; q 为取样径流量,ml; a 为小区投影面积,cm²; t 为接样时间,min。

$$H = \sum y_i x_i$$

式中, H 为径流深或累积径流深, mm ; y_i 为 i 时刻的径流率, mm min^{-1} ; x_i 为取样时间间隔, min 。

$$M = \sum \frac{m_i}{at} x_i$$

式中, M 为片蚀模数, kg m^{-2} ; m_i 为第 i 个取样泥沙质量, kg ; a 为小区投影面积, m^2 ; t 为接样时间, min ; x_i 为取样时间间隔, min 。

1.3 数据处理

用 Excel 和 SPSS 进行数据的统计和分析。

2 结果与分析

2.1 黄土坡面片流产流随降雨过程的变化

片流产流过程是降雨与入渗平衡的过程, 降雨初期, 土壤的入渗率较强, 随着降雨的不断入渗, 土壤含水量不断增大, 土壤入渗率逐步减弱, 当入渗率小于降雨强度时, 即产生坡面径流, 由于入渗率在降雨过程中不断变化, 相应的坡面产流率也会不断变化^[2]。

图 1 和图 2 分别为不同雨强和坡度条件下坡面片流产流率随降雨历时的变化。可以看出, 同坡度不同雨强条件下的产流率和同雨强不同坡度条件下的产流率随降雨历时的变化趋势相似, 均随降雨历时呈现先增大后平稳变化的趋势。不同的是, 不同雨强下的产流率在降雨 5 min 左右后即达到稳定状态, 且各个雨强下的产流率之间存在明显差异, 在两个最小雨强下, 产流率在整个片流过程中起伏不大, 其余三个雨强条件下, 坡面产流率先迅速增大, 之后渐渐趋于稳定。此外, 2 个大雨强的产流率随时间的变化过程中差值较小, 而 3 个小雨强的产

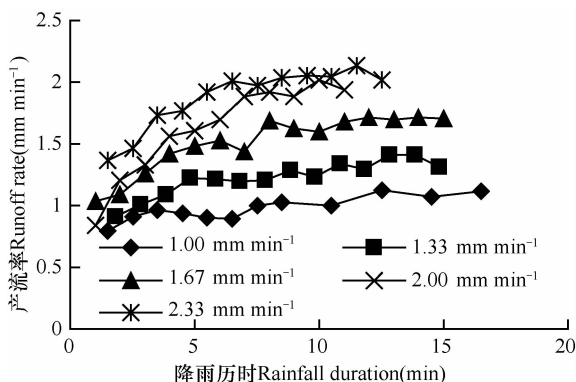


图 1 不同雨强条件下坡面片流产流率随降雨历时的变化
Fig. 1 Variation of sheet flow runoff rate with time under different rainfall intensities

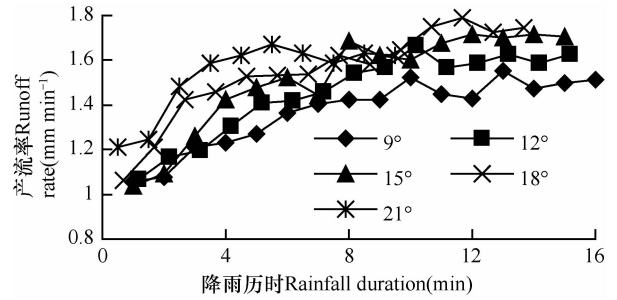


图 2 不同坡度条件下坡面片流产流率随降雨历时的变化
Fig. 2 Variation of sheet flow runoff rate with time under different slopes

流率差值相当。雨强越大, 产流率越大。而不同坡度条件下的产流率在降雨 10 min 左右才趋于稳定, 且各个坡度时的产流率之间的差异较小, 基本一致。产流随雨强的增大趋势明显, 随坡度的增大趋势不明显。

坡面产流率随降雨过程发生这种变化的原因是在降雨开始后的前期, 坡面表层土壤的含水量相对较低, 土壤的入渗率相对高, 土壤接收的降雨全部入渗, 没有引起地表径流的产生, 随着降雨的继续, 雨水入渗使土壤含水量增大, 表层土壤接近饱和, 加之溅蚀颗粒阻塞土壤孔隙, 入渗率将减弱, 当入渗率小于雨强时, 产流出现。产流开始后, 土壤入渗率迅速减弱, 导致坡面产流率迅速增加, 当土壤含水量和空隙的变化渐减, 入渗将趋于稳定状态, 由于雨强一定, 坡面的产流率也就趋于稳定状态, 坡面的产流率随降雨历时的变化就表现为相对较恒定过程^[7]。

对图 1 与图 2 中的试验数据进行统计分析, 结果表明同坡度不同雨强条件下及同雨强不同坡度条件下, 坡面产流率随降雨历时的变化皆可用对数方程很好地描述(表 1 和表 2)。

表 1 不同雨强条件下坡面径流率随降雨过程变化的经验方程

Table 1 Statistical relationship of variations of runoff rate with rainfall duration under different rainfall intensities			
雨强 Rainfall intensity (mm min^{-1})	经验方程 Statistical relationship	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance
1.00	$y = 0.119 \ln(x) + 0.759$	0.886	<0.01
1.33	$y = 0.213 \ln(x) + 0.807$	0.945	<0.01
1.67	$y = 0.279 \ln(x) + 0.992$	0.969	<0.01
2.00	$y = 0.489 \ln(x) + 0.847$	0.990	<0.01
2.33	$y = 0.353 \ln(x) + 1.25$	0.965	<0.01

注: y , 径流率 (mm min^{-1}); x , 降雨历时 (min) Note: y , runoff rate (mm min^{-1}); x , rainfall duration (min)

表 2 不同坡度条件下坡面径流率随降雨过程变化的经验方程

Table 2 Statistical relationship of variations of runoff rate with rainfall duration under different slopes

坡度 Slope gradient (°)	经验方程 Statistical relationship	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance
9	$y = 0.189 \ln(x) + 1.01$	0.963	<0.01
12	$y = 0.245 \ln(x) + 0.990$	0.971	<0.01
15	$y = 0.279 \ln(x) + 0.992$	0.969	<0.01
18	$y = 0.235 \ln(x) + 1.14$	0.980	<0.01
21	$y = 0.166 \ln(x) + 1.31$	0.913	<0.01

注: y , 径流率 (mm min^{-1}); x , 降雨历时 (min) Note: y , runoff rate (mm min^{-1}); x , rainfall duration (min)

2.2 黄土坡面片流产流对雨强的响应

雨强在坡面产流中具有重要作用,由于片流产流土层厚度小,雨强的产流作用不仅通过供给雨水数量大小来体现,而且雨滴打击作用对入渗的影响也很明显,是影响坡面片流产流的重要因素^[13]。

图 3 为不同坡度条件下,坡面次降雨前 10 min 对应的累积径流深对雨强变化的响应。可以看出,径流深随雨强的增加显著增大,且不同坡度之间的变化趋势基本一致。统计分析表明,不同坡度条件下坡面径流深对雨强的响应关系可用幂函数方程很好地描述,且相关性极显著(表 3)。

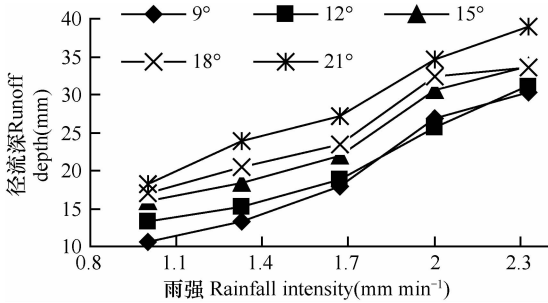


图 3 黄土坡面片流产流随雨强的变化

Fig. 3 Variation of sheet flow runoff with rainfall intensities

表 3 坡面片流径流深随雨强变化的经验方程

Table 3 Statistical relationship of variations of runoff depth with rainfall intensities

坡度 Slope (°)	经验方程 Statistical relationship	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance
9	$H = 9.90 I^{1.31}$	0.984	<0.01
12	$H = 12.2 I^{1.03}$	0.974	<0.01
15	$H = 15.0 I^{0.931}$	0.972	<0.01
18	$H = 16.5 I^{0.854}$	0.976	<0.01
21	$H = 18.2 I^{0.893}$	0.994	<0.01

注: H , 片流径流深 (mm); I , 雨强 (mm min^{-1}) Note: H , runoff depth (mm); I , rainfall intensity (mm min^{-1})

由于坡面产流是降雨与土壤入渗相平衡的结果^[13],而本试验各既定坡度的不同雨强场次之间下垫面土壤状况固定,土壤入渗特征在不同雨强场次之间基本一致或虽有差异但小于雨强的变化,全部降雨在满足土壤入渗后,均形成地表径流,因此试验坡面的产流特征与雨强变化相对应,随雨强的增大而增加。从表 3 中各经验方程可以进一步看出,随坡度增大,方程的系数与指数分别具有增大和总体减小的变化,其中,随坡度增大,方程的系数增大,表明一定雨强条件下坡度越大产流越多,而随坡度增大,方程的指数总体减小,表明一定雨强下产流的坡度增强效应或单位坡度产流深随坡度增加的变化呈总体减小的非线性趋势。

2.3 黄土坡面片流产流对坡度的响应

坡度也是影响坡面产流的一个重要因素。坡度通过改变径流水体的受力状况,使径流在坡面方向上的分力大小发生变化,从而通过影响径流速度和土壤入渗量的大小^[13],实现对坡面产流的作用。

图 4 为不同雨强条件下,坡面次降雨前 10 min 对应的累积径流深对坡度变化的响应,可以看出,径流深随坡度的增加而增加,但递增速率很小,且不同雨强下的变化趋势基本一致。统计分析表明,不同雨强条件下坡面径流深对坡度的响应关系可用幂函数方程很好的描述(表 4)。

降雨产流发生的坡面具有特定的坡度,一定雨强条件下随着坡度的增大径流在坡面方向上的分力增大,水流流速加快,水流渗入土壤的机会减小,因此,随坡度增大,坡面产流径流深必然增加^[6]。从表 4 中各经验方程可以进一步看出,随雨强增大,方程的系数与指数分别具有增大和总体减小的变化,其中,随雨强增大,方程的系数增大,表明一定

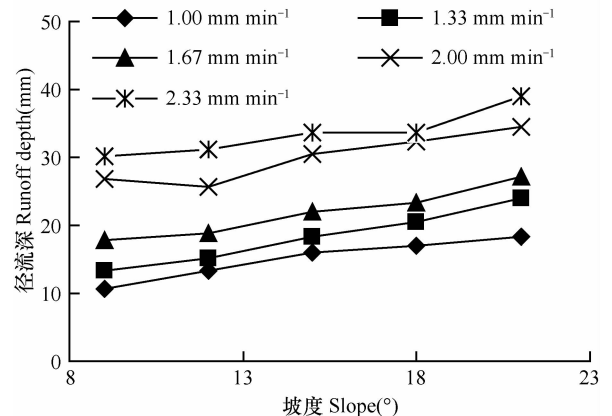


图 4 黄土坡面片流产流随坡度的变化

Fig. 4 Variation of sheet flow runoff with slopes

表 4 坡面径流深随坡度变化的经验方程

Table 4 Statistical relationship of variations of runoff depth with slopes

雨强 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	经验方程 Statistical relationship	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance
1.00	$H = 2.61 S^{0.651}$	0.988	<0.01
1.33	$H = 2.84 S^{0.691}$	0.992	<0.01
1.67	$H = 5.94 S^{0.484}$	0.970	<0.01
2.00	$H = 12.0 S^{0.340}$	0.909	<0.01
2.33	$H = 16.3 S^{0.268}$	0.909	<0.01

注: H , 片流径流深 (mm); S , 坡度 (°) Note: H , runoff depth (mm); S , slope (°)

坡度条件下雨强越大产流越多, 而随雨强增大, 方程的指数总体减小, 表明一定坡度下产流的雨强增强效应或单位雨强产流深随雨强增加的变化呈总体减小的非线性趋势。

试验条件下, 雨强和坡度是影响坡面片流的两个重要因子, 通过对比图 3 和图 4 可以发现, 坡面径流深随雨强的变化率明显高于随坡度的变化率, 雨强对试验坡面片流产流的影响要大于坡度的影响。

2.4 雨强和坡度对黄土坡面片流产流的综合影响

在本试验条件下, 雨强和坡度是影响坡面片流产流特征的两个主要因素, 将所有场次试验数据进行统计, 分析坡面片流产流对雨强和坡度的响应关系, 得到式(1)。

$$H = 3.83I^{1.01}S^{0.490} \quad (R^2 = 0.943, p < 0.01, F = 180 > F(2, 23)_{0.01} = 5.57) \quad (1)$$

式中, H 为坡面片流产流深, mm; I 为雨强, mm min⁻¹; S 为坡度, °。

式(1)表明, 坡面片流径流深对雨强和坡度的响应关系可用二元幂函数方程描述, 相关性极显著, 说明径流深的大小与雨强和坡度的关系极为密切。从雨强和坡度的指数可以看出, 雨强的指数大于坡度的指数, 因此雨强对径流影响的贡献要大于坡度, 此结论与上述图 3 图 4 的对比结论一致。

2.5 黄土坡面片流产流的片蚀效应

对本研究试验坡度 15° 不同雨强组合条件下, 以及雨强 1.67 mm min⁻¹ 不同坡度组合条件下取得的片流产流深与片蚀模数之间的关系分别进行相关分析得出下列式(2)和式(3)。

$$M = 0.0378H^{1.21} \quad (\text{坡度 } 15^\circ, R^2 = 0.9725, p < 0.01) \quad (2)$$

$$M = 0.235H - 3.48 \quad (\text{雨强 } 1.67 \text{ mm min}^{-1}, R^2 = 0.9979, p < 0.01) \quad (3)$$

式(2)及式(3)中, M 为坡面片蚀模数, kg m⁻²; H 为坡面片流产流深, mm。

式(2)与式(3)及其检验结果显示, 不同雨强条件下坡面片流径流深的片蚀效应可用幂函数方程描述, 相关性极显著, 不同坡度条件下坡面片流径流深的片蚀效应可用线性方程描述, 相关性也极显著, 表明黄土坡面片流产流的片蚀效应明显。

3 结 论

本试验研究的降雨强度和坡度条件下, 可得出如下结论:

1) 不同雨强条件下, 坡面径流率随降雨历时的变化表现为先增大后趋于稳定的趋势, 径流率随降雨历时的变化可用对数方程描述。

2) 不同坡度条件下, 坡面径流率随降雨历时的变化表现为先增大后趋于稳定的趋势, 转折点为开始降雨后的 10 min 左右, 径流率随坡度的变化可用对数方程描述。

3) 不同坡度条件下, 坡面径流深随雨强的增加而增大, 可用幂函数方程描述; 不同雨强条件下, 坡面径流深随坡度的增加而增大, 可用幂函数方程描述。坡面径流深对雨强和坡度的综合响应表现为二元幂函数方程, 且雨强对径流深影响的贡献大于坡度对其影响的贡献。

4) 黄土坡面片流产流的片蚀效应明显, 不同雨强条件下坡面片流产流的片蚀效应可用幂函数方程描述, 不同坡度条件下坡面片流产流的片蚀效应可用线性方程描述。

参 考 文 献

- [1] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 1: 5—8. Liu Y B, Zhu X M, Zhou P H, et al. A study on the vertical zoning of soil erosion in the Loess Plateau (In Chinese). Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988, 1: 5—8
- [2] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I)-坡面流. 力学进展, 2004, 34(3): 360—372. Liu Q Q, Li J C, Chen L, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion(I)-Overland flow (In Chinese). Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360—372
- [3] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(II)-土壤侵蚀. 力学进展, 2004, 34(4): 493—506. Liu Q Q, Li

- J C, Chen L, *et al.* Dynamics of overland flow and soil erosion (1)-Soil erosion (In Chinese). *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 493—506
- [4] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究. *水土保持学报*, 1995, 9(3): 78—83. Zhang G H, Liang Y M. Study on runoff beginning time of artificial grassland in loess hilly region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(3): 78—83
- [5] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401—407. Zhu B B, Li Z B, Li P, *et al.* Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 401—407
- [6] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究. *水土保持通报*, 2005, 25(4): 1—4. Wang Z L, Huang X H, Zhang Z G, *et al.* Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(4): 1—4
- [7] 刘俊娥, 王占礼, 袁股, 等. 黄土坡面薄层流产流过程试验研究. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 223—227. Liu J E, Wang Z L, Yuan Y, *et al.* Experimental study on runoff dynamic processes on loess hillslope (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5): 223—227
- [8] 马春艳, 王占礼, 谭贞学. 黄土坡面产流动态变化过程实验模拟. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 122—123. Ma C Y, Wang Z L, Tan Z X. Experimental modelling of runoff dynamic processes on loess hillslope (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 122—123
- [9] 姚文艺, 肖培青, 申震洲, 等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系. *水利学报*, 2011, 42(12): 1438—1444. Yao W Y, Xiao P Q, Shen Z Z, *et al.* Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(12): 1438—1444
- [10] 郑子成, 吴发启, 何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究. *土壤*, 2004, 36(3): 327—330. Zheng Z C, Wu F Q, He S Q. Effect of cultivation management on runoff (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(3): 327—330
- [11] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 14—18. Wu S F, Wu P T, Yuan L F. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 14—18
- [12] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究. *地理研究*, 2009, 28(9): 583—591. Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau (In Chinese). *Geographical Research*, 2009, 28(9): 583—591
- [13] 陈力, 刘青泉, 李家春. 坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究. *泥沙研究*, 2001(4): 61—67. Chen L, Liu Q Q, Li J C. Study on the runoff generation process on the slope with numerical method (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2001(4): 61—67
- [14] 吴发启, 赵晓光. 缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析. *水土保持研究*, 2000, 7(1): 12—17. Wu F Q, Zhao X G. Analysis of the effect of rainfall and infiltration on runoff in gently sloping farmland (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(1): 12—17
- [15] 穆天亮, 王全九, 王辉. 基于短历时 Philip 入渗公式的产流模型. *水土保持学报*, 2008, 22(7): 62—64. Mu T L, Wang Q J, Wang H. Surface runoff formation model based on Philip equation (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(7): 62—64
- [16] Xiao B, Wang Q H, Fan J, *et al.* Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high heterogeneity. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 738—749

SIMULATED-RAINFALL EXPERIMENTAL STUDY ON RUNOFF OF SHEET FLOW ON LOESS HILLSLOPE

Liu Jun'e^{1,3} Wang Zhanli^{2,3†} Gao Sujuan¹ Zhang Kuandi⁴ Chen Hao^{1,3} Wang Sha^{1,3}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Sheet flow runoff on loess hillslope was studied through simulated rainfall experiments, under the conditions of rainfall intensities of 1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.33 mm min⁻¹ and slopes of 9°, 12°, 15°, 18°, 21°. Results show that 1) regardless of rain intensity and slope degree, the runoffs displayed a general trend in rate, that is, increasing first and leveling off late, however, the turning point came 5 min earlier in treatments of rain intensity than in treatments of

slope degree, and the variation could be described with a logarithm equation $y = a \ln(x) + b$; 2) depth of the sheet flow runoff varied with rainfall intensity and slope gradient as well, which could be described with a power function equation $H = aI^b$ and $H = aS^b$ respectively; 3) the integrated response of the runoffs in depth to rainfall intensity and slope gradient could be described with a dual power function equation $H = 3.83I^{1.01}S^{0.490}$, and the response to rainfall intensity was greater than to slope gradient; and 4) the effect of sheet flow runoffs on sheet erosion was significant, and varied with rainfall intensity and slope gradient, which could be described with a power function equation $M = 0.0378H^{1.21}$ and a linear equation $M = 0.235H - 3.48$ respectively.

Keywords Loess hillslope; Runoff; Sheet flow; Sheet erosion

(责任编辑:过 园)