

黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程试验研究

高素娟¹, 王占礼^{1,2}, 黄明斌^{1,2}, 张宽地³, 刘俊娥¹, 袁殷¹, 陈浩¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 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; 3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用人工模拟降雨试验的方法对黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程进行了研究。(1) 不同雨强条件下, 土壤侵蚀强度随降雨过程的动态变化趋势基本一致, 整体皆随降雨历时的增长而递增, 并皆可用对数线性组合方程很好地描述。开始降雨后的 15 min 和 35 min 是侵蚀强度随降雨过程变化的转折点; (2) 不同坡度条件下, 土壤侵蚀强度皆随雨强的增大而迅速增大, 变化趋势基本一致, 可用线性方程很好地描述; (3) 不同雨强条件下, 土壤侵蚀强度随坡度的增加表现为先增大后减小的趋势, 可用对数线性组合方程很好地描述, 25°左右是侵蚀强度发生变化的临界坡度; (4) 不同雨强条件下, 土壤侵蚀强度随坡长的增加整体表现为先增大后减小的趋势, 可用对数线性组合方程很好地描述, 坡长 80 cm 左右是侵蚀强度发生变化的转折点; (5) 土壤侵蚀强度随雨强、坡度、坡长的动态变化可用三元线性方程描述, 雨强对土壤侵蚀的影响远超过坡度与坡长, 且坡度与侵蚀强度的关系较坡长为密切。

关键词: 黄土坡面; 土壤侵蚀; 动态变化过程; 降雨强度; 坡度; 坡长

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0063-06

中图分类号: S157.1

Experiment Study of Soil Erosion Dynamic Processes on Loess Slope

GAO Su-juan¹, WANG Zhan-li^{1,2}, HUANG Ming-bin^{1,2},
ZHANG Kuan-di³, LIU Jun-e¹, YUAN Yin¹, CHEN Hao¹

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

2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on simulated rainfall experiment, the processes of soil erosion dynamic variation on the loess hillslope were studied and the following results were obtained: (1) Soil erosion rate was increased with rainfall process under different rainfall intensities and it could be described with a logarithmic and linear combined equation. 15 min and 35 min after rainfall beginning were the turning points of soil erosion rate with rainfall process. (2) Soil erosion rate was increased rapidly with the increase of rainfall intensity at different slope gradients and it could be described with linear equation. (3) Soil erosion rate varied with the increase of slope gradient at different rainfall intensities, having a trend of increase to decrease, and it could be described well with a logarithmic and linear combined equation. The critical slope gradient was about 25°. (4) Soil erosion rate varied with the increase of slope length at different rainfall intensities, having a trend of increase to decrease, and it could be described well with a logarithmic and linear combined equation. 80 cm of slope length is the turning point of soil erosion rate. (5) Effects of rainfall intensity, slope gradient, and slope length on soil erosion could be described with a ternary linear equation. The influence of rainfall intensity on soil erosion is more significant than slope gradient and slope length and slope gradient is more important than slope length.

Keywords: loess hillslope; soil erosion; dynamic variation process; rainfall intensity; slope gradient; slope length

收稿日期: 2009-06-14

修回日期: 2009-10-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(40971172); 国家 973 计划课题(2007CB407201); 中国科学院知识创新工程重要方向项目课题(KZCX2-YW-442-04); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究课题(10502-Z5-3); 西北农林科技大学创新团队建设计划(01140202)

作者简介: 高素娟(1983—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: gaosujuan100@163.com。

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省佳县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn; zwang@ms.iswc.ac.cn。

土壤侵蚀是当今世界普遍关注的重大环境问题,地处我国黄河中上游的黄土高原,土质疏松,植被稀少,生态环境脆弱,土壤侵蚀严重,是黄河泥沙的主要来源区,也是世界上水土流失最严重的地区之一^[1]。黄土高原地区严重的土壤侵蚀造成了土壤生产力下降,泥沙、洪水灾害加剧,水利设施功能减低乃至丧失、损毁等^[2]。该区水土流失虽经多年治理,尚未得到有效控制,大大制约了区域农业与经济的发展,给国家生态安全和黄河安危造成严重威胁。因此,开展黄土地区土壤侵蚀研究具有重要意义。通过研究揭示黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程,可进一步深化对黄土坡面土壤侵蚀过程的认识,促进坡面侵蚀理论的进一步发展,同时,为黄土地区坡面水土流失治理及生态建设提供重要科学依据。

众多学者对于坡面土壤侵蚀进行了研究,并已经取得了丰富的成果。20 世纪 70 年代以后,我国开始注重土壤侵蚀的定量研究。研究了降雨特征、雨滴动能、降雨径流侵蚀力、植被盖度、微地貌形态等因素与侵蚀量的关系,取得了一些有较大意义的成果。如周佩华^[3]、蔡强国^[4]、江忠善^[5]、郭耀文^[6]、王贵平^[7]、牟金泽等^[8]等都作了大量的研究,建立了各自的侵蚀方程或取得了相应研究条件下的侵蚀特征规律。本文采用室内人工模拟降雨试验的方法,研究不同降雨强度、坡度、坡长等条件下的坡面土壤侵蚀动态变化过程,试图取得坡面土壤侵蚀强度动态变化特征及描述方程,实现对黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程的实验模拟。

1 材料与方法

试验在中国科学院水利部水土保持研究所进行,试验土样取自黄土高原腹地的陕西省安塞县,土壤类型为黄绵土。各项试验的前期土壤含水量为 14%,容重为 1.3 g/cm³。试验小区宽 40 cm,深 25 cm,装土深度为 22 cm。试验的坡度分别为 10°,15°,20°,25 和 30°。坡长分别为 0.4,0.8,1.2,1.6 和 2.0 m,

使坡面集中流侵蚀不会发生,侵蚀形态限定在仅具溅蚀及薄层水流侵蚀共存的状态。降雨强度分别为 0.80,1.04,1.70,2.475 和 2.835 mm/min。试验共进行了 45 个场次的降雨,并对所有场次的试验重复进行 1 次,各项试验的降雨历时均为 60 min。各次试验中,详细观测产流全过程,开始产流后对所有观测项目前 15 min 内分别间隔 1,2,3,4,5 min 观测 1 次,以后每隔 5 min 观测 1 次。各次观测分别收集各时段的浑水总量,并通过测定浑水容量与重量及泥沙密度,计算获得相应的侵蚀量。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀随降雨过程的动态变化

降雨及其产生的径流是引起黄土高原土壤侵蚀的主要动力,随降雨过程的进行,地面土壤水分特征、地表径流状况等都不断发生变化,坡面土壤侵蚀则相应地随侵蚀动力与抗侵蚀性特征的变化而予以响应。为了认识和阐明土壤侵蚀随降雨过程的动态变化规律,对坡长 1.6 m,坡度 15°,不同雨强条件下的土壤侵蚀强度随降雨过程的动态变化进行分析。

图 1 是该固定坡长与坡度条件下,5 个不同降雨强度产生的土壤侵蚀强度随降雨历时的动态变化过程。将通过相关分析取得的土壤侵蚀强度随降雨过程变化的经验方程及其检验结果列于表 1。

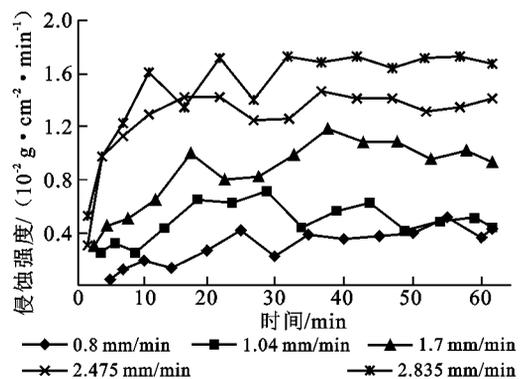


图 1 不同雨强条件下侵蚀强度过程变化

表 1 土壤侵蚀强度随降雨过程变化的经验方程

坡长/cm	坡度/(°)	雨强/(mm·min ⁻¹)	经验方程	相关系数	显著性水平
160	15	0.800	$y=0.0015 \ln T - (2.90E-06) T - 0.0018$	0.9002	0.01
160	15	1.040	$y=0.0032 \ln T - (1.14E-04) T - 0.0015$	0.7819	0.01
160	15	1.700	$y=0.0034 \ln T - (6.10E-05) T - 0.0002$	0.9267	0.01
160	15	2.475	$y=0.0045 \ln T - (1.50E-04) T + 0.0033$	0.9434	0.01
160	15	2.835	$y=0.0044 \ln T - (1.02E-04) T + 0.0047$	0.9507	0.01

注: y 为土壤侵蚀模数 (g/(cm²·min)); T 为降雨历时 (min)。

从表 1 可以看出,不同雨强条件下土壤侵蚀强度随降雨过程的动态变化皆可用对数线性组合方程很好地描述,且相关性显著。通过分析图 1 可以看到,不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随降雨过程的动态变化趋势基本一致,整体皆随降雨历时的增长呈递增趋势。在降雨开始后的前 35 min 以内,侵蚀强度随降雨历时的增加幅度较大,尤其是开始降雨后的 5~15 min 左右,侵蚀强度基本呈直线递增。随后,随着降雨历时的延长,土壤侵蚀强度随降雨过程的变化基本趋于平稳状态,变化幅度不大。

当降雨开始后,雨滴降落到裸露的坡面上,直接打击土壤,使土壤颗粒发生分散、分离和溅起,形成溅蚀。随着降雨过程的延长,表层土壤渗入的水分增加,土壤颗粒间大部分为水填充,继续承受雨滴冲击,致使土壤更加分散,当土壤表层水分继续增加,土粒成为稀泥状态时,再受雨滴打击,则造成泥浆溅起,土壤表层的泥浆阻塞土壤孔隙,妨碍水分下渗,使得坡面径流短时间内迅速增大,形成的薄层水流紊动性增强,水流侵蚀力增大,加之表层大量松散土粒的存在,致使土壤侵蚀强度急剧增加。随着降雨过程的持续,坡面产流与入渗逐步趋于稳定状态,径流的动态变化减弱,水流侵蚀力的变化不大,所以,土壤侵蚀强度的变化基本处于稳定状态。

2.2 土壤侵蚀随降雨强度的动态变化

降雨强度是影响土壤侵蚀的最重要因子之一,大量研究表明,黄土高原土壤侵蚀只发生在少数几场暴雨之中,侵蚀性降雨强度与土壤侵蚀关系十分密切。根据贾志伟^[10]等的研究,在一次降雨过程中,水土流失量的大小与短时段集中雨强,尤其与最大 30 min 雨强关系密切。降雨强度对坡面侵蚀产沙过程的显著影响,主要表现为降雨雨滴的打击溅蚀作用和形成相应径流的侵蚀作用。

将不同坡度条件下土壤侵蚀强度随雨强的动态变化绘制成图 2,动态变化关系的相关方程及检验结果为表 2。

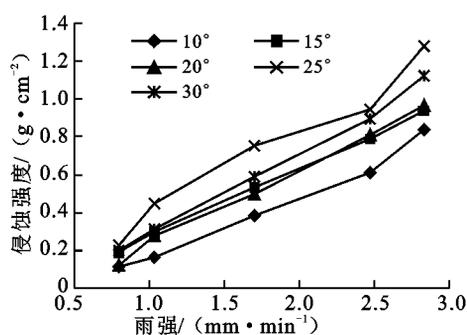


图 2 不同坡度条件下土壤侵蚀强度随雨强的变化

表 2 土壤侵蚀强度随雨强变化的经验方程

坡长/ cm	坡度/ (°)	经验方程	相关 系数	显著性 水平
160	10	$y = 0.3425I - 0.1852$	0.9909	0.01
160	15	$y = 0.3597I - 0.0875$	0.9992	0.01
160	20	$y = 0.4018I - 0.1755$	0.9979	0.01
160	25	$y = 0.4585I - 0.0800$	0.9821	0.01
160	30	$y = 0.4388I - 0.1524$	0.9977	0.01

注: y 为土壤侵蚀强度 (g/cm^2); I 为降雨强度 (mm/min)。

从表 2 可以看出,不同坡度条件下,土壤侵蚀强度与雨强的相关关系可用线性方程很好地描述,且相关性极高。通过分析图 1 可以看出,不同坡度条件下,土壤侵蚀强度皆随降雨强度的增大而迅速增大,且变化趋势基本一致,但不同雨强范围内增加幅度略有差别。当雨强在 2.475~2.835 mm/min 时,土壤侵蚀强度随雨强的增大而急剧增大,增加幅度明显高于其它几个雨强范围。土壤侵蚀强度随雨强的增大而迅速增大的趋势表明在一次降雨侵蚀过程中,降雨强度的大小起着至关重要的作用,雨强是影响土壤侵蚀最重要的降雨特征之一,它的大小直接影响着该次降雨过程中土壤侵蚀的强烈程度。

雨强是最重要的降雨特征之一,随降雨强度的增大雨滴动能必然增加,降雨对地面的打击力增强,土壤分散、分离量增大,为坡面径流搬运提供了更多处于分散状态的土粒。降雨强度增大,雨滴打击裸露地表使土层更密实,同时,溅散的土粒堵塞土壤孔隙,减小了地面粗糙度,降低土壤入渗能力,增加地表径流量,从而使起重要作用的径流动力进一步增强。另外,降雨强度的增大也使径流的紊动性增强,侵蚀能力相应增大。

降雨强度增大后导致的各种直接或间接侵蚀增强效应叠加在一起,必然会产生土壤侵蚀随降雨强度的增大而显著增强的规律。

2.3 土壤侵蚀随坡度的动态变化

坡度是影响坡面侵蚀的一个重要地形因子,在相同的其它条件下,坡度对坡面侵蚀强度的大小变化也具有重要影响作用。关于坡度与坡面土壤侵蚀的关系国内已作了大量研究,20 世纪 60 年代史德明^[11]等在江西长岗测定了紫色土不同条件下的侵蚀量,发现在坡长相等的条件下,陡坡 (35.2°) 比缓坡 (5°) 的侵蚀量多 50%~80%;黄委会西峰水保站^[12]和朱显谟^[13]等一致认为,黄土梁峁坡地上的侵蚀量与坡度呈幂相关。本研究试图从模拟降雨试验的角度探讨在一定坡长不同降雨强度条件下坡度对土壤侵蚀影响的规律。

将一定坡长不同降雨强度条件下土壤侵蚀随坡度变化的试验结果点绘为图 3,并对试验观测数据进行相关分析,分析与检验结果见表 3。

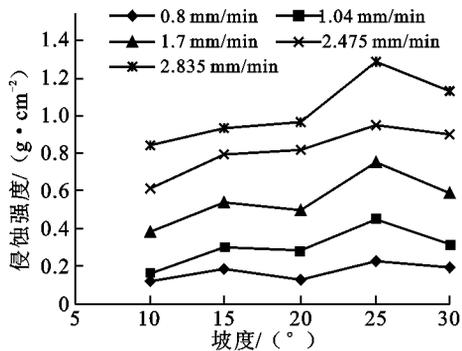


图 3 不同雨强条件下侵蚀强度随坡度的变化

从表 3 可以看出,一定坡长,不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随坡度的变化可用对数线性组合方程很好地描述,且具有极高的显著性。通过分析图 3 可以得出,不同雨强条件下,土壤侵蚀强度在 10°~15° 范围内皆随坡度的增加而增大,但增加幅度比较平缓;

在 15°~20° 范围内,两个大雨强 (2.475, 2.835 mm/min) 条件下,侵蚀强度基本保持不变或略有增加,而其余 3 个雨强 (0.8, 1.04, 1.7 mm/min) 条件下,侵蚀强度反而出现缓慢下降趋势;在 20°~25° 范围内,各雨强条件下土壤侵蚀强度皆随坡度的增加而急剧增大;但在 25°~30° 范围内,侵蚀强度皆呈下降趋势,这就表明,土壤侵蚀强度并不是随着坡度的增大而无限地增大的,而是存在着一个总体上由小变大再由大变小的临界坡度。该结果与我国陈永宗等多数研究者的结论基本相同。陈永宗^[14]等根据绥德、离石两地径流小区资料得出,当坡度达到 25 或 28° 以后,其侵蚀量反而减少,并认为这是坡地上水力侵蚀强度的上限临界坡度;郑粉莉^[15]对黄土地区发生细沟侵蚀的研究得出临界坡度为 26.5°,靳长兴^[16]提出,在流量一定的条件下,临界坡度在 24°~29° 之间,其大小视坡面水深与大于等于 84% 的坡面颗粒的粒径而定;吴普特^[17]等认为,当坡度小于临界坡度时,坡度与土壤侵蚀是增函数关系,坡度大于临界坡度时是减函数关系。

表 3 土壤侵蚀强度随坡度变化的经验方程

坡长/cm	雨强/(mm·min ⁻¹)	经验方程	相关系数	显著性水平
160	0.800	$y = -0.2317 \ln \frac{S}{S-5} + 0.2449$	0.9974	0.01
160	1.040	$y = -0.4261 \ln \frac{S}{S-5} + 0.4572$	0.9981	0.01
160	1.700	$y = -0.7225 \ln \frac{S}{S-5} + 0.7939$	0.9989	0.01
160	2.475	$y = -0.6744 \ln \frac{S}{S-5} + 1.0483$	0.9999	0.01
160	2.835	$y = -1.3610 \ln \frac{S}{S-5} + 1.4551$	0.9996	0.01

注: y 为土壤侵蚀强度 (g/cm^2); S 为坡度 (°)。

降雨侵蚀条件下坡面土壤侵蚀强度随坡度的增加呈现先增大后减小之变化趋势的根本原因在于,随着坡度的增大,降雨产生的径流在坡面上停留的时间变短,水流损失变小。入渗土壤的机会也变小,坡面径流流速加大,侵蚀能力增强。同时随着坡度的增大,土壤的稳定性降低,抗侵蚀能力减弱,两者结合,导致了随坡度增大土壤侵蚀强度也相应增加;另一方面,随着坡度的继续增大,单位坡面投影面积上的受雨面积增大,使得单位受雨面积的受雨量减少,承雨强度降低,则侵蚀强度自然变小。因此,侵蚀强度随坡度的增加表现为先增大,到达临界坡度后又减小的趋势。

2.4 土壤侵蚀随坡长的动态变化

汇水坡长也是影响坡面汇水流量、侵蚀方式演变及其侵蚀产沙过程的重要因子。但坡长与土壤侵蚀的关系比较复杂,在不同的土壤,不同地面坡度和不

同降雨的情况下,所得研究结果往往不同。华绍祖利用天水、绥德等地径流资料求得侵蚀量与坡长的 0.15~0.5 次幂成正比^[18];郑粉莉^[19]的研究结果表明,当坡面以细沟侵蚀为主时,坡面侵蚀产沙量随坡长的变化呈强弱波状起伏变化;蔡强国^[20]认为侵蚀量沿坡长先是增加,超过一定坡长后逐渐减少。根据实验观测资料,本研究得出土壤侵蚀强度随坡长变化的关系如图 4。对试验数据进行相关分析取得的经验方程与检验结果见表 4。

由表 4 可知,一定坡度,不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随坡长的变化可用对数线性组合方程很好地描述,且显著性极高。由图 4 可见,不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随坡长的增加整体表现为先增大后减小的趋势。小雨强条件下,侵蚀强度随坡长的动态变化幅度较小,随着雨强的增加,侵蚀强度随坡长的起

伏波动增大。在坡长为 40~80 cm 之间时,土壤侵蚀强度随坡长的增加皆出现明显增大的趋势,但坡长大于 80 cm 时,土壤侵蚀强度反而降低,且各雨强下降低的幅度基本一致。随后侵蚀强度随坡长的增加而趋于平缓,起伏不大,总体略显下降趋势。

坡长对侵蚀的影响表现为复杂的关系,其原因也比较复杂。一方面,土壤侵蚀强度之所以随着坡长的增加而增大,是因为当坡度一定时,坡长越长,汇流流量就越大,侵蚀能力就越强,导致单位面积的侵蚀量增大,侵蚀强度增加;另一方面,土壤侵蚀强度之所以随着坡长的增加而减小,是因为随着坡长的增加,水体中的含沙量增加,水体能量的一部分为泥沙负荷所消耗,结果侵蚀反而减弱。当然,坡长越大,径流在

坡面上停留的时间也相对变长,入渗土壤的机会变大,径流量逐渐减小,侵蚀能力减弱,也可导致侵蚀强度下降或维持基本不变的状态。

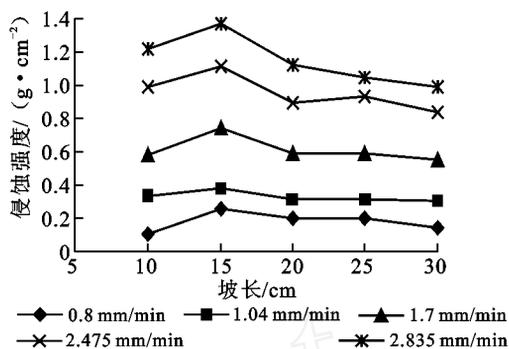


图 4 不同雨强条件下侵蚀强度随坡长的变化

表 4 土壤侵蚀强度随坡长变化的经验方程

坡长/cm	雨强/(mm·min ⁻¹)	经验方程	相关系数	显著性水平
30	0.800	$y = 0.1916 \ln \frac{L}{L-40} + 0.1228$	0.9997	0.01
30	1.040	$y = 0.1527 \ln \frac{L}{L-40} + 0.2637$	0.9999	0.01
30	1.700	$y = 0.3849 \ln \frac{L}{L-40} + 0.4602$	0.9999	0.01
30	2.475	$y = 0.4858 \ln \frac{L}{L-40} + 0.7481$	0.9999	0.01
30	2.835	$y = 0.8042 \ln \frac{L}{L-40} + 0.8075$	0.9999	0.01

注:y 为土壤侵蚀强度(g/cm²); L 为坡长(cm)。

2.5 土壤侵蚀随雨强、坡度及坡长的动态变化

雨强、坡度、坡长是产生土壤侵蚀的主要降雨特征及地形特征因子,这些因子组合在一起对土壤侵蚀产生重要影响,其作用关系密切而复杂。本研究通过对不同坡度、坡长及雨强条件进行试验所得的观测数据进行多元统计分析,取得了土壤侵蚀随雨强、坡度及坡长动态变化的下列经验方程:

$$M = 0.43325928I + 0.00873448S - 0.00052716L - 0.30011574$$

$$(R = 0.9698, \text{Sig} = 0.01, F = 216.2105 > F_{3,41}^{0.01} = 4.31)$$

式中:M——土壤侵蚀强度(g/cm²); I——降雨强度(mm/min); S——坡度(°); L——坡长(cm)。

分析结果表明,降雨强度、坡度、坡长与土壤侵蚀强度之间的关系可用多元线性方程来描述,土壤侵蚀的大小与三者的关系极为密切,具有极高的相关性。上述经验方程表明,降雨强度对土壤侵蚀的影响最为显著,远超过坡度与坡长因子对侵蚀强度的影响作用。而在坡度与坡长因子当中,坡度对侵蚀强度的影响作用较坡长为

3 结论

(1) 不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随降雨过程的动态变化趋势基本一致,整体皆随降雨历时的增长呈递增趋势,并皆可用对数线性组合方程很好地描述。在降雨开始的前 35 min,侵蚀强度随降雨历时的增加幅度较大,开始降雨后的 5~15 min 左右,土壤侵蚀强度基本呈直线急剧递增,35 min 以后,其变化基本趋于平缓状态。

(2) 不同坡度条件下,土壤侵蚀强度皆随降雨强度的增大而迅速增大,且变化趋势基本一致,不同雨强范围内增加幅度略有差别,大雨强范围内增加幅度较大。土壤侵蚀强度随雨强的动态变化可用线性方程很好地描述。

(3) 不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随坡度的增加表现为先增大后减小的趋势,25 左右是其转折的临界坡度。土壤侵蚀强度随坡度的动态变化可用对数线性组合方程很好地描述。

(4) 不同雨强条件下,土壤侵蚀强度随坡长的增

加整体表现为先增大后减小的趋势,坡长 80 cm 左右是其趋势变化的转折点。小雨强条件下,侵蚀强度随坡长的动态变化幅度较小,随着雨强的增加,侵蚀强度随坡长的起伏波动增大。土壤侵蚀强度随坡长的动态变化亦可用对数线性组合方程很好地描述。试验坡长下坡面集中流侵蚀没有发生,侵蚀形态属于溅蚀及薄层水流侵蚀共存的状态。

(5) 土壤侵蚀强度随降雨强度、坡度、坡长的动态变化可用三元线性方程很好地描述,雨强对土壤侵蚀的影响远超过坡度与坡长因子,且坡度与土壤侵蚀强度的关系较坡长为密切。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报,1991,11(1):1-8.
- [2] 史德明. 土壤侵蚀对生态环境的影响及防治对策[J]. 水土保持学报,1991,5(3):1-8.
- [3] 周佩华,窦葆璋,孙清芳,等. 降雨能量的试验研究初报[J]. 水土保持通报,1981,1(3):51-60.
- [4] 蔡强国. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报,1996,2:108-116.
- [5] 江忠善,宋文经. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[C]//北京河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:水利出版社,1982.
- [6] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持,1997(4):15-17.
- [7] 王贵平,曾伯庆,陆兆熊,等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及预报研究[J]. 中国水土保持,1992(3):16-20.
- [8] 牟金泽,熊贵枢. 陕北小流域产沙量预报及水土保持措施拦沙计算[M]. 北京:水利出版社,1981.
- [9] 吴发启,赵晓光,刘秉正. 缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析[J]. 水土保持研究,2000,7(1):12-17.
- [10] 贾志伟,江忠善,刘志. 降雨特征与水土流失关系的研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1990,12:9-15.
- [11] 史德明,姚宗虞,许心鹤. 江西省兴国县紫色土地区的土壤侵蚀及其防治方法[J]. 土壤学报,1965,13(2):181-193.
- [12] 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站. 从南小河沟的治理成果探讨黄土高原沟壑区的治理途径[J]. 人民黄河,1979(3):19-21.
- [13] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1981,1(3):1-9;1(4):13-18.
- [14] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育[M]//中国科学院地理研究所地理集刊(10). 北京:科学出版社,1976.
- [15] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J]. 中国水土保持,1989(8):23-24.
- [16] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报,1995,50(3):234-239.
- [17] 吴普特,周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J]. 水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [18] 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响[J]. 云南地理环境研究,1998,10(1):34-43.
- [19] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报,1998,35(1):95-101.
- [20] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究,1989(4):84-91.