

黄土坡面薄层流侵蚀过程试验研究

刘俊娥¹, 王占礼^{1,2}, 袁殷¹, 张宽地¹, 高素娟¹, 陈浩¹

(1. 西北农林科技大学 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;

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)

摘要: 研究黄土坡面薄层流侵蚀过程对于深化黄土坡面土壤侵蚀过程有重要意义。采用人工模拟降雨试验方法, 对黄土坡面薄层流侵蚀过程进行了研究。(1) 不同雨强条件下, 薄层流侵蚀随降雨过程的变化相似, 都随降雨历时的增长呈递增趋势, 可用幂函数方程进行描述; (2) 不同坡度条件下, 薄层流侵蚀模数皆随雨强的增大而增大, 可用线性相关方程进行描述; (3) 不同雨强条件下, 薄层流侵蚀模数随坡度的增加总体呈先增大后减小的趋势, 侵蚀模数随坡度变化的关系可以用对数线性相关方程进行描述; (4) 不同雨强条件下, 薄层流侵蚀随坡长的增加可用对数线性方程进行描述; (5) 不同雨强、坡度、坡长条件下, 坡面薄层流侵蚀变化可用三元线性经验方程表述。其中降雨强度对侵蚀的影响最大, 其次是坡度, 坡长对其的影响最小。

关键词: 黄土坡面; 薄层流; 侵蚀; 雨强; 坡度; 坡长

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)03-0027-04

中图分类号: S157.1

Experimental Study of Sheet Flow Erosion Processes on Loess Hillslope

LIU Jun-e¹, WANG Zhan-Li^{1,2}, YUAN Yin¹, ZHANG Guan-di¹, GAO Su-juan¹, CHEN Hao¹

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

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)

Abstract: To reveal the mechanisms of soil erosion by sheet flow is important for the understanding of erosion processes on loess slope. With artificially simulated rainfall tests, sheet flow erosion processes on loess hill-slope are studied and the following results are obtained: (1) Under different rainfall intensities, sheet flow erosion varied similarly with rainfall process and can be described with power functions. Sheet flow erosion increased with rainfall duration increasing. (2) Under different slope gradients, sheet flow erosion increased with rainfall intensity increasing and can be described by linear equations. (3) Under different rainfall intensities, sheet flow erosion modulus increased firstly and then decreased with soil gradient increasing. Their relationship can be described by log-linear equations. (4) Under different rainfall intensities, the relationship can be described by power equations. (5) Under different rainfall intensities, slope gradients, and slope lengths, sheet flow erosion can be described by ternary linear equations. Rainfall intensity affected erosion modulus most greatly, followed by slope gradient, and slope length behaved minimal impacts.

Keywords: loess slope; sheet flow; erosion; rainfall intensity; slope gradient; slope length

土壤侵蚀是全球面临的严重环境问题之一, 这一环境问题时刻制约着社会、经济、生态的可持续与协调发展。我国黄土高原是世界上土壤侵蚀最严重的地区^[1]。黄土高原土壤侵蚀面积占总土地面积的 75% 以上, 多年平均侵蚀模数 3 700 t/(km²·a), 最

大侵蚀模数约 3 × 10⁴ t/(km²·a)^[2], 其中土壤侵蚀模数在 5 000 t/(km²·a) 以上的地区达 1.56 × 10⁵ km², 每年产沙 1.4 × 10⁹ t。严重的水土流失产生的大量泥沙在黄河下游淤积, 影响着当地的生产生活, 对两岸人民的安危造成严重威胁。因此, 开展黄土坡

收稿日期: 2009-12-23

修回日期: 2010-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 国家 973 计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中科院知识创新工程重要方向项目课题“多沙粗沙区土壤水蚀机理研究”(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“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”(10502-Z5-3)

作者简介: 刘俊娥(1987—), 女(汉族), 山西省河曲县人, 硕博连读生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: liujun-e20041021@yahoo.com.cn.

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省佳县人, 博士, 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: zwang0407@163.com.

面土壤侵蚀研究具有重要意义, 研究揭示的侵蚀过程与机理, 可为该区防治水土流失提供重要科学依据。

薄层流侵蚀作为水蚀的开端, 包括雨滴溅蚀和冲刷侵蚀, 二者对侵蚀的贡献不同, 侵蚀泥沙主要产生于雨滴击溅。Wischmeier^[3], 蔡强国^[4], 高学田^[5]等研究了雨强对土壤侵蚀的影响, 得出降雨强度直接影响径流侵蚀力, 侵蚀随雨强的增大而增大。吴普特, 周佩华^[6], 贾志军^[7], 陈浩^[8]等研究了坡度和坡长对溅蚀的影响, 发现侵蚀存在临界坡度。但是, 坡长对于侵蚀的影响目前尚无定论。江忠善^[9]对薄层流各影响因子对侵蚀的影响作了系统的研究并给出了统计模型。

本文采用人工模拟降雨方法, 研究黄土坡面上不同雨强、坡度、坡长条件下坡面薄层流的土壤侵蚀动态变化过程。

1 材料与方法

试验在中科院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行, 试验土样取自位处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 40, 80, 120, 160 和 200 cm, 使其不产生细沟侵蚀, 侵蚀形态控制在仅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。

试验在 200 cm 坡长条件下, 观测不同坡度不同雨强组合下的侵蚀过程; 在 25° 坡度下, 观测不同雨强不同坡长组合下的侵蚀过程。去掉重复试验场次, 试验降雨共 45 场, 所有试验重复 1 次, 共 90 场, 各项试验的降雨历时均为 60 min。各项试验中, 详细观测径流及侵蚀产生的泥沙变化过程, 产流开始后开始观测所有项目, 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, 测定浑水容量、重量、泥沙密度, 计算得到相应的侵蚀量。

2 结果与分析

2.1 薄层流侵蚀随降雨过程的变化

降雨是黄土高原土壤侵蚀的主要动力, 坡面土壤侵蚀规律会随降雨过程发生相应的变化。

本文对坡长 200 cm, 坡度为 30°, 不同雨强条件下的土壤侵蚀过程进行研究分析。将试验数据绘制成图并进行统计分析, 结果见表 1。从表 1 可以看出, 不同雨强条件下坡面薄层流侵蚀模数随降雨过程

的动态变化呈幂函数关系, 且相关性显著。由结果分析可以得出, 在不同降雨强度条件下, 侵蚀模数随降雨过程的变化趋势基本一致, 都随降雨历时的增长呈递增趋势。降雨开始后的 30 min 内, 侵蚀模数随降雨历时的增长幅度明显, 0—10 min 内的增长趋势几乎呈线性递增, 尤其 0—3 min 内增长幅度很大, 30 min 以后随降雨历时的变化趋于平稳, 变化不大。

表 1 薄层流侵蚀模数和降雨历时的关系

坡长/ cm	坡度/ (°)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	经验方程	相关 系数	显著性 水平
200	30	0.800	$E = 0.0010T^{0.42}$	0.89	0.01
200	30	1.040	$E = 0.0025T^{0.28}$	0.97	0.01
200	30	1.700	$E = 0.0042T^{0.32}$	0.98	0.01
200	30	2.475	$E = 0.0062T^{0.32}$	0.93	0.01
200	30	2.835	$E = 0.0130T^{0.17}$	0.87	0.01

注: E 为薄层流侵蚀模数 (g/(cm²·min)); T 为降雨历时 (min)。

分析坡面薄层流侵蚀模数随降雨历时呈现这种变化规律的原因, 可以得出: 在降雨初期, 裸露土壤表面水分含量低, 雨滴直接打击地面, 溅蚀作用比较明显, 地表出现很多从土体分离出来的土粒, 供沙充分, 使得薄层流侵蚀迅速增大。

随着降雨历时的延长, 表层土壤含水量逐渐达到饱和, 形成径流, 薄层水流紊动性强, 水深逐渐增大, 侵蚀能力相应增强, 随着降雨过程的继续, 土壤入渗趋于稳定, 径流的动态变化减弱, 薄层流侵蚀强度趋于稳定。

2.2 雨强对薄层流侵蚀的影响

降雨强度对薄层流侵蚀的作用主要表现在降雨雨滴击溅侵蚀作用为薄层流提供搬运物质和通过打击扰动影响薄层流的侵蚀能力, 以及降雨产生薄层径流的直接侵蚀作用。

Wischmeier 和 Smith^[3]分析了雨滴动能和降雨强度的关系。美国通用水土流失方程在确定降雨侵蚀力指标时, 发现土壤侵蚀量与最大 30 min 雨强密切相关。贾志伟^[10]发现, 土壤侵蚀量与短时集中降雨密切相关。本文分析恒定降雨雨强与薄层流侵蚀的关系。

坡长 200 cm, 不同坡度条件下坡面薄层流侵蚀模数随雨强的动态变化试验数据的统计分析结果见表 2。从表 2 可以看出, 在不同坡度条件下, 薄层流侵蚀模数随雨强的增大而增大, 且可以用直线方程来表示变化关系, 相关性较高。而且可以看出随着坡度的增大, 薄层流侵蚀模数随雨强的增大而增大的程度更突出。

雨强是影响土壤侵蚀的重要因素之一,雨强的增大将增强径流的紊动性,径流的侵蚀力增强。随着雨强的增大,雨滴动能也必然增大,雨滴对地面的打击作用就增强,导致土壤分离,溅蚀量增大,提供了大量可被薄层流搬运的物质。溅散的土粒堵塞土壤孔隙,土壤的入渗能力降低,地表的径流量增加,径流动力增强。各种效应的叠加,使得薄层流侵蚀模数随雨强的增大呈现显著的增大规律。

表2 薄层流侵蚀模数和雨强的关系

坡长/ cm	坡度/ (°)	经验方程	相关 系数	显著性 水平
200	10	$E = -0.200 + 0.20 I$	0.820	0.01
200	15	$E = -0.078 + 0.35 I$	0.970	0.01
200	20	$E = -0.110 + 0.30 I$	0.940	0.05
200	25	$E = -0.076 + 0.39 I$	0.990	0.01
200	30	$E = -0.140 + 0.40 I$	0.998	0.01

注: E 为薄层流侵蚀模数 [$g/(cm^2 \cdot min)$]; I 为降雨强度 (mm/min)。

2.3 坡度对薄层流侵蚀的影响

坡度是地面形态的主要特征之一,对侵蚀模数的变化有重要的影响作用。关于坡度和侵蚀模数的关系,许多学者已经得到各自的经验公式。Wischmeier和Smith^[3]发现二者呈多项式关系。吴普特^[6]发现,坡度小于临界坡度时,坡度与土壤侵蚀是增函数关系,大于临界坡度时,呈减函数关系。黄委会西峰水保站^[11]、朱显谟^[12]认为,黄土梁峁坡地的侵蚀量和坡度呈幂相关。

本文在坡长 200 cm,不同雨强条件下研究薄层流侵蚀模数随坡度的变化规律。将试验数据绘制成图,并对其进行统计分析,结果列于表 3。

表3 薄层流侵蚀模数和坡度的关系

坡长/ cm	雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	经验方程	相关 系数	显著性 水平
200	0.800	$E = 0.3184 \ln \frac{S}{S-5} + 0.1087$	0.9990	0.01
200	1.040	$E = 0.0489 \ln \frac{S}{S-5} + 0.3665$	0.9910	0.01
200	1.700	$E = -0.2793 \ln \frac{S}{S-5} + 0.6664$	0.9970	0.01
200	2.475	$E = 0.0304 \ln \frac{S}{S-5} + 0.8512$	0.9996	0.01
200	2.835	$E = -0.7121 \ln \frac{S}{S-5} + 1.1374$	0.9999	0.01

注: E 为薄层流侵蚀模数 [$g/(cm^2 \cdot min)$]; S 为坡度(°)。

经分析,薄层流侵蚀模数随坡度的增加在 20°~25°之前,整体趋势是增大的,在 20°~25°以后,侵蚀模数随坡度的增加整体趋势是下降的。可以看出,薄

层流侵蚀模数随坡度的变化有一个临界坡度值存在。赵晓光^[13]认为临界坡度不是一个定值,而是随着土壤颗粒含量和入渗速率等而变化,黄土高原的侵蚀临界值在 21.4°~45°之间。相关学者^[6-16]通过研究都得出坡面侵蚀随坡度的增大而增加,当超过临界坡度后侵蚀随坡度的增加而减小。

由表 3 可以看出,薄层流侵蚀模数与坡度的关系可以表示为对数线性关系,相关系数极高,且关系极显著。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,入渗量变小,坡面径流流速加大,侵蚀能力增强,同时土壤的稳定性降低,抗蚀能力减弱,土壤侵蚀强度相应增加;到达一定坡度后,随着坡度的继续增大,单位坡面投影面积减小,使得单位受雨面积的降雨量减少,侵蚀强度变小。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 坡长对薄层流侵蚀的影响

坡长也是影响侵蚀的因素之一。坡长与侵蚀的关系比较复杂,不同地区不同条件下的研究,结果也不同。江忠善^[17]、华绍祖^[18]发现的结果类似,土壤流失量与坡长的小数次方成正比。牟金泽^[19]等根据径流小区试验指出,其他因素不变时,土壤流失量随坡长的增大而增大。蔡强国^[20]根据子洲径流小区的试验得出,坡面产流量相同时,20 m 长的小区侵蚀率最大,随着坡长的增加,单位面积的侵蚀率递减,坡长为 60 m 左右时,水沙含量趋于稳定。因此,坡长对侵蚀的影响尚无定论。

本文在 25°的坡度及不同雨强条件下研究薄层流侵蚀随坡度的变化规律。将试验数据绘制成图并进行统计分析,结果列于表 4 中。

表4 薄层流侵蚀模数和坡长的关系

雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	经验方程	相关 系数	显著性 水平
0.800	$E = -0.0377 \ln \frac{L}{L-40} + 0.2551$	0.99	0.01
1.040	$E = 0.1756 \ln \frac{L}{L-40} + 0.3014$	0.99	0.01
1.700	$E = 0.8943 \ln \frac{L}{L-40} + 0.3229$	0.99	0.01
2.475	$E = 0.5383 \ln \frac{L}{L-40} + 0.7071$	0.99	0.01
2.835	$E = 0.7893 \ln \frac{L}{L-40} + 0.7920$	0.99	0.01

注: E 为薄层流侵蚀模数 [$g/(cm^2 \cdot min)$]; L 为坡长(cm); 坡度全为 25°。

分析得出,不同雨强条件下,薄层流侵蚀模数随坡长的增加整体表现为先增大后减小的趋势。在坡长为 40~80 cm 之间时,土壤侵蚀模数随坡长的增加

明显增加,坡长大于 80 cm 时,薄层流侵蚀模数开始随坡长的增大而呈现减小的趋势,坡长大于 160 cm 时,变化趋于平稳,总体略显上升趋势。由表 4 可以看出,薄层流侵蚀模数和坡长的关系可以用对数线性方程很好的表示,且相关性较高,关系显著。

坡长对薄层流侵蚀模数的影响呈现为如此复杂的关系,原因有坡面上从上到下,随着坡长的增加,坡面水深增加,侵蚀能力增强,同时,径流含沙量增加,水体能量主要为泥沙载荷消耗,所以,一定坡长后侵蚀能力减弱。因此,坡长对薄层流侵蚀的影响是很复杂的。

2.5 坡度、坡长及雨强对薄层流侵蚀的影响

雨强,坡度,坡长单个因素组合在一起会对侵蚀产生重要影响,关系复杂。本文通过对不同因子及水平条件下所得试验数据进行多元统计分析,得出如下经验方程:

$$E = 0.3789I + 0.0025S - 0.0007L + 0.0168$$

$$(R = 0.9305, \text{Sig} = 0.01, F = 88.193 > F_{3,41}^{0.01} \approx 4.31)$$

式中: E ——薄层流侵蚀模数 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$]; I ——降雨强度 (mm/min); S ——坡度 ($^\circ$); L ——坡长 (cm)。

上式表明,不同雨强、坡度、坡长条件下的薄层流侵蚀模数变化可以用雨强、坡度和坡长的三元线性方程表述,其中,雨强对侵蚀的影响最显著,其次是坡度,坡长对侵蚀的影响最小。

3 结论

采用人工模拟降雨试验的方法对黄土坡面薄层流侵蚀过程进行了研究,结果表明:

(1) 不同雨强条件下,薄层流侵蚀随降雨过程的变化相似,都随降雨历时的增长呈递增趋势,可用幂函数相关方程进行描述。

(2) 不同坡度条件下,雨强对薄层流侵蚀的影响相似,侵蚀模数随雨强的增大而增大,均可用线性相关方程进行描述。

(3) 不同雨强条件下,薄层流侵蚀模数随坡度的增加在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 之前整体趋势表现为增大,在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 以后,则表现为下降,坡度与薄层流侵蚀模数随坡度变化的关系可以用对数线性相关方程描述。

(4) 不同雨强条件下,薄层流侵蚀模数随坡长的增加整体表现为先增大后减小的趋势,侵蚀模数随坡长的变化可用对数线性方程进行描述。

(5) 不同雨强、坡度、坡长条件下,坡面薄层流侵蚀经验方程可表述为三元线性函数统计方程,其中降雨强度对薄层流侵蚀的影响最大,其次是坡度,坡长对其的影响最小。

[参 考 文 献]

- [1] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1996.
- [2] 吴钦孝,赵鸿雁.黄土高原水土保持目标及对策[J].水土保持研究,1999,6(2):76-80.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm playing[C]//Trans. 7th International Cong. Soil Sci. 1960:418-425.
- [4] 蔡强国.降雨特性对溅蚀影响的初步实验研究[J].中国水土保持,1986(6):30-35.
- [5] 高学田,包忠漠.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-47.
- [6] 吴普特,周佩华.地表坡度与薄层水流侵蚀的关系的研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [7] 贾志军,李俊义,王小平.地面坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响[C]//陈永宗.晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集.北京:水利电力出版社,1990:26-31.
- [8] 陈浩.坡度对溅蚀影响的初步试探研究[J].人民黄河,1986(1):34-36.
- [9] 江忠善,刘志.降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[C]//卢宗凡.黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业文集(下册).陕西:杨凌:天则出版社,1990:115-121.
- [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] 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.
- [12] 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(3,4):1-9.
- [13] 赵晓光,吴发启,刘秉正.再论土壤侵蚀的坡度界限[J].水土保持研究,1999,6(2):42-46.
- [14] 彭文英,张科利,江忠善,等.黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征[J].地理科学,2002,22(4):397-402.
- [15] 王玉宽.黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀试验研究[J].中国水土保持,1993(7):22-24.
- [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] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].西北水保所集刊,1988(7):40-45.
- [18] 龚时旸.黄河流域黄土高原土壤侵蚀的特点[J].中国水土保持,1988(9):8-10.
- [19] 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[C]//第一次河流泥沙国际学术讨论会文集.北京:光华出版社,1980.
- [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):83-91.