

黄土裸坡土壤侵蚀过程研究

王占礼, 王亚云, 黄新会, 牛振华

(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 杨陵 712100)

摘要: 黄土地区的土壤侵蚀严重地影响了当地和黄河下游地区的可持续发展, 研究黄土地区的土壤侵蚀对于该地区的水土保持工作具有重要意义。采用人工模拟降雨试验的方法对黄土裸坡土壤侵蚀过程进行了研究, 取得了如下结果: (1) 不同雨强条件下, 坡地土壤侵蚀随降雨过程的变化相似, 可用幂函数相关方程进行描述, 侵蚀强度变化的转变点在降雨开始后的 10~15 min 之间; (2) 不同雨强条件下, 坡度对土壤侵蚀的影响相近且可用抛物线相关方程进行描述, 侵蚀强度变化的临界坡度在 25~30 间; (3) 不同雨强条件下, 坡地土壤侵蚀总量随坡长的变化可用幂函数相关方程进行描述, 但坡长对侵蚀模数的影响比较复杂, 表现为不同的形式; (4) 不同坡度条件下, 降雨强度对土壤侵蚀的影响相似且均可用线性相关方程进行描述, 随着坡度的增大, 土壤侵蚀随雨强增大而增加的越明显; (5) 裸坡次降雨侵蚀经验模型为多元幂函数统计方程, 裸坡条件下降雨强度对土壤侵蚀的影响最大, 坡长与坡度的影响基本大体一致。研究结果表明, 采取不同措施增加地面覆盖、停止陡坡耕种、截断坡地径流是治理黄土地区水土流失的有效途径。

关键词: 黄土; 裸坡; 土壤侵蚀过程; 坡度; 坡长; 雨强
中图分类号: S 157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0084-04

Soil Erosion Process Research of the Loess Bare Slope

WANG Zhan-li, WANG Ya-yun, HUANG Xin-hui, NIU Zhen-hua

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

Abstract: Soil erosion of the loess areas greatly endangered sustainable development of the loess areas and the downstream areas of the Yellow River. Research on the soil erosion is significant to the soil and water conservation of the loess areas. With the simulated rainfall experiment, the bare-slope soil erosion of the loess areas was studied and the following results were made: (1) Under different rainfall intensity, hillslope soil erosion varied similarly with rainfall process and could be described with exponential equations. Erosion intensity didn't change until 10~15 min after rainfall began; (2) With rainfall intensity changed, slope gradient influenced soil erosion similarly and could be described with parabola equations. The critical slope degree was about 25~30° above which erosion intensity changed; (3) With rain intensity varied, general soil erosion amount changed with slope length and could be described with exponential equations. But slope length impacted erosion modulus more complicated with different forms; (4) With slope gradient differed, rainfall intensity affected soil erosion similarly and could be described with linear equations. The feature that soil erosion increased with rainfall intensity became more obvious to steeper slope; (5) The empirical model that simulated single-event bare-slope erosion processes was a plural exponential function. Rainfall intensity showed most influential to soil erosion, while slope length acted equally as slope gradient did on soil erosion. The result of study showed that taking different measures to increase ground cover, stopping cultivating on steeper slope and blocking hillslope runoff were effective ways of controlling soil and water loss in loess areas.

Key words: loess area; bare slope; soil erosion process; slope gradient; slope length; rainfall intensity

我国黄土地区具有独特的地理特征。该区在特定地史环境条件下堆积形成了全球地表厚度最大的松散沉积物——第四纪黄土。这种特殊的陆相沉积物及其发育形成的土壤质地疏松, 抗侵蚀能力差, 很容易遭受侵蚀。该区在气候上属于干旱与半干旱地区, 降雨主要集中在夏秋季的 6~9 月, 降水强度大, 并以暴雨形式降落, 极易形成地表径流并造成土

壤侵蚀。该区长期以来一直是人类各种农业活动广泛而强烈的地区, 植被严重破坏, 地面失去保护, 大多处于裸露状态。严峻的自然条件与过度人为活动的影响, 使得该区成为生态环境极其脆弱和全球土壤侵蚀最严重的地区, 不仅使当地的土壤质量严重退化, 土壤生产力水平严重下降, 农业的可持续发展严重受阻, 而且也使流经该地的黄河成为全球含沙量

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-442); 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿专项经费资助项目
作者简介: 王占礼(1960-), 男, 博士, 研究员, 从事土壤侵蚀研究。

最高的害河和最危险的悬河,给下游地区人民的安危造成严重威胁。因此,研究黄土地区裸地条件下的土壤侵蚀发生发展过程与机制,对于进行该区土壤保持决策、治理黄河,实现经济与社会的可持续发展具有重要意义。

坡地土壤侵蚀过程的主要影响因子有降雨、地形、土壤、植被和人为管理措施等,当坡地以裸露状态存在时,影响因子则主要表现为降雨、坡度及坡长。本文通过室内人工模拟降雨试验的方法对处于裸露状态的黄土在不同雨强、坡度及坡长条件下的侵蚀规律进行研究,旨在可控实验条件下做出较精确的实验模拟。

1 材料与方法

该研究采用室内人工模拟降雨试验的方法完成。试验在中科院水土保持研究所进行,试验土样取自黄土高原腹地的陕西安塞,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/cm^3 。试验小区宽 40 cm,深 25 cm。试验的坡度为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 和 30° ,坡长为 0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 m,雨强为 0.80、1.04、1.70、2.48 和 2.84 mm/min。试验共进行了 45 个场次,并对所有试验均重复进行一次。每场试验的降雨历时为 60 min。各次试验中,详细观测径流与侵蚀泥沙过程,开始产流后的前 15 min 内对所有观测项目分别间隔 1、2、3、4、5 min 观测一次,以后每隔 5 min 观测一次。各次观测分别收集各时段的浑水总量,并通过测量浑水容量与重量及泥沙比重,计算获得侵蚀量。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀随降雨过程的变化

将试验数据绘制为图 1,并将分析统计结果列于表 1。结果表明,各种雨强条件下侵蚀模数随降雨过程的变化关系均可采用幂函数相关方程进行描述。

从表 1 可以看出,在坡长 0.8 m 及坡度 20 的试验条件下,侵蚀强度随降雨过程变化呈幂函数相关关系皆比较显著。图 1 也表明,在不同降雨强度条件下,侵蚀强度随降雨过程的变化趋势基本一致。在降雨侵蚀过程的前期阶段,侵蚀强度随降雨时间的增长而不断增大,约在开始产生侵蚀到 10 min,甚至到 15 min 之间,侵蚀强度随降雨时间的增长几乎呈线性增大。随着降雨历时进一步增加,侵蚀强度的变化趋于平稳。土壤侵蚀随降雨过程呈现出这种变化规律的机制在于降雨侵蚀过程的开始阶段,雨滴打击扰动作用明显,薄层水流紊动性强且坡面水深逐步增大,侵蚀能力逐步增强,但随着降雨过程的继续进行,土壤入渗趋于稳定,径流的动态变化减弱,而其侵蚀作用则占了主导地位,虽仍受雨滴打击作用的影响,但作用比较一致,因此,侵蚀强度的变化也比较平稳。

2.2 坡度对土壤侵蚀的影响

对于坡度与侵蚀的关系,前人曾进行过特定条件下的一些研究,并得出了各自的经验公式。Wischmeier 和 Smith (1965) 研究获得坡度与侵蚀量呈多项式关系。陈永宗等 (1976) 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。吴普特等 (1993) 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。靳长兴 (1995) 从能量的角度出发,从理论上对临界坡度进行了研究,认为临界坡度在 24

~ 29 之间。赵晓光等 (1999) 认为临界坡度不是一个定值,而是随着土壤粗颗粒含量、密实度以及水分入渗速率、土壤团聚体性质等相互作用结果而变化,在黄土高原其值介于 21.4 ~ 45 之间,黄绵土的临界坡度约为 28° 。可见,坡度对土壤侵蚀的影响存在临界值,不同的条件下存在不同的临界值。本研究试图从模拟降雨试验的角度探讨在不同降雨强度条件下坡度影响土壤侵蚀的规律。

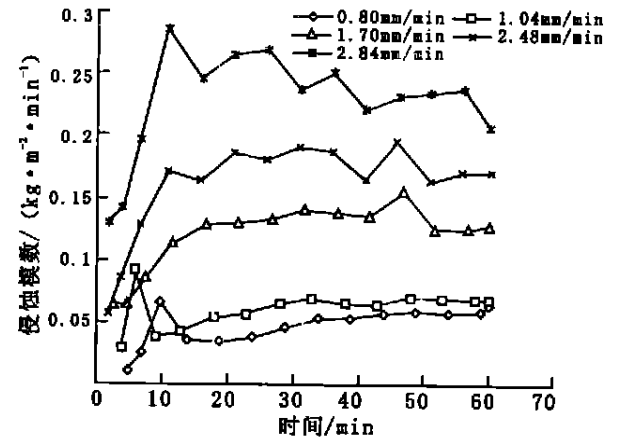


图 1 不同雨强条件下土壤侵蚀随降雨过程的变化
表 1 侵蚀模数随降雨过程变化的经验方程

坡长/m	坡度/ $^\circ$	雨强/(mm·min ⁻¹)	经验方程	相关系数	显著水平
0.8	20	0.80	$E=0.017t^{0.461}$	0.7739	0.01
		1.04	$E=0.037t^{0.206}$	0.5925	0.05
		1.70	$E=0.057t^{0.254}$	0.8894	0.01
		2.48	$E=0.077t^{0.279}$	0.8678	0.01
		2.84	$E=0.147t^{0.147}$	0.6935	0.01

将实验数据点绘成图 2,并经过相关分析表明,土壤侵蚀随坡度的变化可用抛物线相关关系进行描述,各种降雨强度条件下的统计分析与检验结果见表 2。

从表 2 中可以看出,在 0.8 m 坡长及不同降雨强条件下,侵蚀强度与坡度之间呈抛物线关系的相关程度皆为显著和较显著。图 2 表明,不论大、中、小雨强条件下的侵蚀,各条拟合曲线的变化均具有一致的趋势,其表现形式为在 10 ~ 25 之间,侵蚀强度随坡度的增大而增大,在 25 ~ 30 之间,侵蚀强度随坡度有减小的趋势,这与前人研究所得结论基本吻合。

坡度对土壤侵蚀的影响,一方面,随着坡度的增加,坡面径流流速加大,侵蚀能力增强,同时土壤的稳定性降低,抗侵蚀阻力减弱,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,随着坡度的增大,单位斜面面积上受雨面积减少,承雨强度降低,则侵蚀强度变小。坡度对土壤侵蚀的影响就表现在这两个方面作用的此消彼长中。当坡度增大到一定程度时,坡度增大侵蚀的作用已不能抵消由于斜面面积增大,单位斜面面积上降雨强度变小导致的弱化侵蚀作用的功效,因此总的土壤侵蚀强度反而开始减小。图 2 中所示的 25 ~ 30 之间的变化特征,正是本研究中呈现出的坡度影响侵蚀作用的这种规律。

2.3 坡长对土壤侵蚀的影响

我国学者就黄土高原坡长与侵蚀的关系已经进行过一些研究。原黄河工程局 (1957) 根据径流小区资料分析,认为坡长与侵蚀有的成正比,有的成反比,其变化视降雨状况而

异。罗来兴(1958)根据雨后细沟调查资料认为,沿坡长的侵蚀特点是强弱交替变化。牟金泽(1981)等根据径流小区试验指出,在坡度和其他因素相同的条件下,土壤流失量随坡长增大而增加。张信宝利用¹³⁷Cs法研究认为,0~50 m 坡长范围内侵蚀速率随坡长的增加而增加,坡长大于50 m 时,侵蚀速率随坡长的增加变化不大,65 m 以后,随坡长的增加还略有减少。蔡强国(1989)对陕西子洲径流小区实际观测资料的分析,认为当坡面产流量相同时,20 m 坡长小区单位面积侵蚀率最大,随着坡长的增加,单位面积的侵蚀率递减。当坡长为60 m 左右时,水流含沙量趋于稳定。可见,坡长对侵蚀的影响机制复杂,目前并无定论。

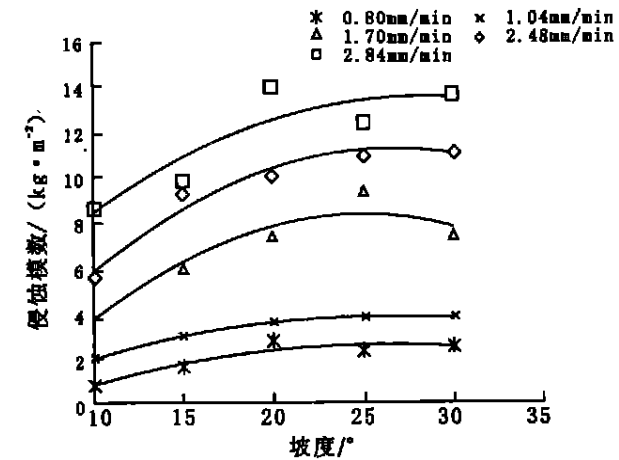


图 2 不同雨强条件下土壤侵蚀随坡度的变化

表 2 坡度对土壤侵蚀影响的经验方程				
坡长/m	雨强/(mm·min ⁻¹)	统计方程	相关系数	显著水平
0.8	0.80	$E = -0.008S^2 + 0.394S - 2.417$	0.950	0.05
	1.04	$E = -0.007S^2 + 0.356S - 0.930$	0.999	0.01
	1.70	$E = -0.021S^2 + 1.045S - 4.747$	0.957	0.01
	2.48	$E = -0.019S^2 + 1.022S - 2.433$	0.983	0.01
	2.84	$E = -0.015S^2 + 0.89S + 0.106$	0.905	0.05

将试验数据绘成图 3,并对数据进行分析表明,土壤侵蚀总量随坡长的增大而增加,其变化可用表 3 的幂函数方程进行描述。

从表 3 中可以看出,在 20 的坡度及不同降雨强度条件下,侵蚀总量与坡长之间具有显著的幂函数相关关系。由于随着坡长的增大,侵蚀面积、侵蚀动力皆增大,所以总侵蚀量是必然增大的。

表 3 坡长对土壤侵蚀总量影响的经验方程				
坡度/°	雨强/(mm·min ⁻¹)	经验方程	相关系数	显著水平
20	0.80	$E = 27.29L^{1.222}$	0.919	0.05
	1.04	$E = 53.12L^{1.199}$	0.957	0.01
	1.70	$E = 102.06L^{1.181}$	0.973	0.01
	2.48	$E = 326.03L^{1.017}$	0.982	0.01
	2.84	$E = 822.95L^{0.861}$	0.973	0.01

进一步将侵蚀模数随坡长的变化绘制为图 4。从图 4 可以看出,坡长对侵蚀模数的影响比较复杂,不同雨强条件下表现为不同的影响形式。如雨强为 1.70 mm/min 和 1.04 mm/min 时,随着坡长的增大,侵蚀强度总的有增加的趋势;雨强为 2.84 mm/min 时,侵蚀强度表现有先增大后递减的趋势;雨强为 0.80 mm/min 和 2.48 mm/min 时,随着坡长增大,侵蚀强度则出现两次增强和两次减小过程,其变化呈现波动性。

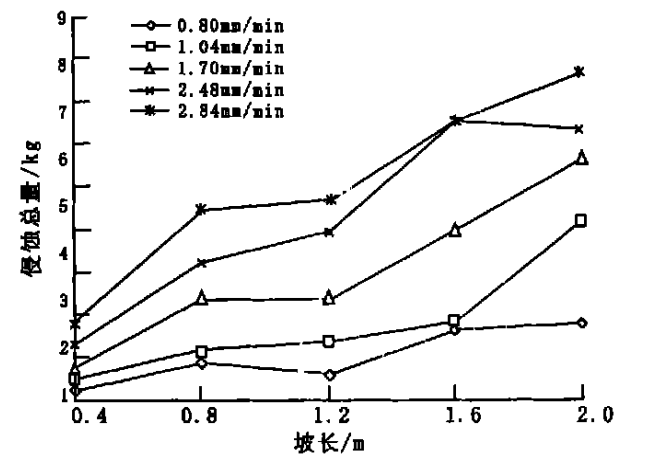


图 3 不同雨强条件下侵蚀总量随坡长的变化

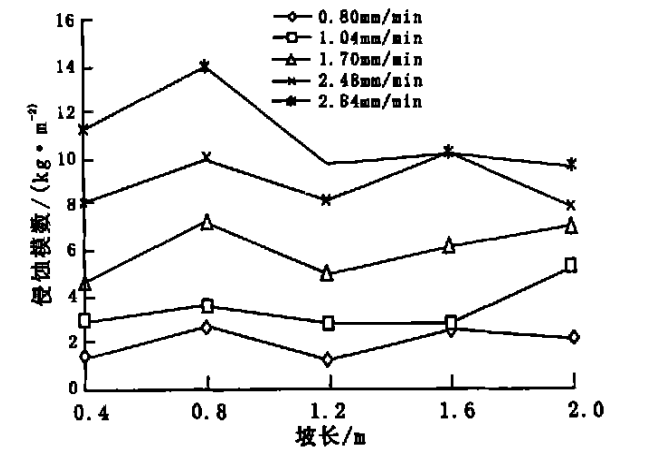


图 4 不同雨强条件侵蚀模数随坡长的变化

坡长对侵蚀的影响之所以表现为复杂的关系,其原因也比较复杂。一方面,从上坡到下坡随着坡长的增加,坡面水深逐渐增加,侵蚀能力增强;另一方面,随着坡长的增加,径流含沙量增加,水体能量主要为泥沙荷载所消耗,侵蚀能力又会减弱。根据孔亚平等(2001)的研究,不同的降雨类型条件下,坡长对侵蚀强度的影响不同。短历时或小强度的降雨实验条件下,坡长的影响并不显著,而随着降雨历时的延长或降雨强度的增加,坡长的影响会越来越大,所有这些都使坡长与侵蚀强度的关系复杂化。

2.4 降雨强度对土壤侵蚀的影响

降雨强度对土壤侵蚀的作用主要表现在降雨雨滴击溅侵蚀作用和形成径流的侵蚀作用。雨滴击溅侵蚀能力来自于雨滴动能,雨滴动能与降雨强度成正相关关系。W. H. Wischmeier 和 D. D. Smith 分析了它们的关系,得到动能和降雨强度呈高度正相关的方程。江志善(1983)根据对天水、绥德、西峰、离石四站实测资料的研究,得到了黄土高原普通雨型降雨能量和降雨强度之间呈对数相关关系定量表达。贾志伟等(1990)研究表明,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 雨强有着密切的关系,这与美国通用土壤流失方程确定降雨侵蚀力指标的研究结果一致。本实验分析在不同坡度条件下降雨强度对土壤侵蚀的影响。

不同坡度条件下降雨强度与土壤侵蚀关系的描述如图 5。对试验数据进行统计分析表明,降雨强度对土壤侵蚀的影响关系可以采用直线方程加以描述,各坡度条件下的拟合方

程与检验结果见表 4。

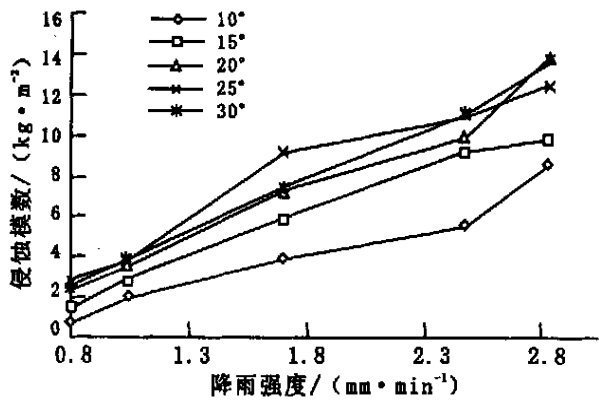


图 5 不同坡度条件下土壤侵蚀随降雨强度的变化

表 4 降雨强度对土壤侵蚀影响的经验方程

坡长/m	坡度/°	统计方程	相关系数	显著水平
0.8	10	$E=3.420I-1.891$	0.978	0.01
	15	$E=4.163I-1.484$	0.994	0.01
	20	$E=5.200I-1.693$	0.986	0.01
	25	$E=4.892I-0.909$	0.972	0.01
	30	$E=5.376I-1.807$	0.998	0.01

分析表明,在 0.8 m 坡长及不同坡度条件下,侵蚀模数与降雨强度之间呈非常显著的线性正相关关系,可见降雨强度是一个在侵蚀过程中发挥重要作用的侵蚀主要影响因子。图 5 不仅显示出在各种坡度条件下,侵蚀模数总是随着降雨强度的增加而增大,并且还从关系曲线的斜率可以看出,随着坡度的增大这种侵蚀随雨强增大而增加的程度更加突出。

由于雨强的增大而使雨滴动能增大,降雨对地面的打击力增强,溅蚀量增大,为坡面径流搬运提供了更多处于分散状态的土粒。由于雨强的增大,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,从而使起重要侵蚀作用的径流动力也进一步增强。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。雨强增大后导致的各种增强效应叠加在一起,必然会产生土壤侵蚀随雨强的增大参考文献:

[1] Wischmeier, W H, smith, D D. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains [S]. Agric. Handbook. No. 282. Washington, D. C: USDA. 1965.

[2] 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.

[3] 孔亚平, 张科利, 唐克丽, 等. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 17- 20.

[4] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究 [J]. 中国水土保持, 1983, (3): 32- 36.

[5] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育 [A]. 中国科学院地理研究所地理集刊 (10) [M]. 北京: 科学出版社, 1976.

[6] 吴普特, 等. 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.

[7] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度 [J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234- 239.

[8] 西北黄河工程局. 西北黄土区坡地固体径流和液体径流形成过程的初步研究 [J]. 黄河建设, 1957, (12): 17- 21.

[9] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡面细沟侵蚀量的野外测定及其初步分析结果 [J]. 地理学资料, 1958, (2): 111- 118.

[10] 牟金泽, 等. 陕北小流域产沙量预报及水土保持措施拦沙计算 [A]. 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集 [C]. 北京: 光华出版社, 1980. A4- 1, A3- 10.

[11] 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.

[12] 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, 第 12 集: 9- 15.

而显著增强的规律。

2.5 裸坡土壤侵蚀经验方程

裸坡土壤侵蚀主要随坡度、坡长及降雨强度三个因子的作用而变化。通过对不同坡度、坡长及降雨强度条件下裸坡土壤侵蚀试验结果进行多元统计分析,获得裸坡次降雨侵蚀经验方程为:

$$E=0.007L^{0.185}S^{0.179}I^{4.190}$$
$$R=0.964, \quad F=157.226, \quad F_{0.01}(3,41)=4.31$$

式中: E ——侵蚀模数(kg/m^2); L ——坡长(m); I ——降雨强度(mm/min); S ——坡度($^\circ$)。

检验结果表明,研究建立的该裸坡土壤侵蚀方程,其侵蚀模数与相应的坡度、坡长和雨强三个因子之间具有高度显著的相关性。该侵蚀方程中进一步表明,裸坡土壤侵蚀强度与降雨强度间的关系最为密切,而与坡长及坡度的关系则基本一致。

3 结 论

采用人工模拟降雨试验的方法对黄土裸坡土壤侵蚀过程进行了研究,结果表明:

- (1) 不同雨强条件下,坡地土壤侵蚀随降雨过程的变化相似,可用幂函数相关方程进行描述,侵蚀强度变化的转变点在降雨开始后的 10~15 min 之间;
- (2) 不同雨强条件下,坡度对土壤侵蚀的影响相近且可用抛物线相关方程进行描述,侵蚀强度变化的临界坡度在 25~30 间;
- (3) 不同雨强条件下,坡地土壤侵蚀总量随坡长的变化可用幂函数相关方程进行描述,但坡长对侵蚀模数的影响比较复杂,表现为不同的形式;
- (4) 不同坡度条件下,降雨强度对土壤侵蚀的影响相似且均可用线性相关方程进行描述,随着坡度的增大,土壤侵蚀随雨强增大而增加的越明显;
- (5) 裸坡次降雨侵蚀经验方程为多元幂函数统计方程,裸坡条件下降雨强度对土壤侵蚀的影响最大,坡长与坡度的影响基本大体一致。

从研究结果中可以进一步表明,针对不同因子对土壤侵蚀的影响作用,采取不同措施增加地面覆盖、停止陡坡耕种、截断坡地径流是治理黄土地区水土流失的有效途径。