

# 黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应\*

赵龙山 张青峰 王健 吴发启<sup>†</sup>

— (西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 通过人工模拟降雨试验, 结合高精度三维激光扫描技术研究了黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应特征。结果表明, 在同一条件下, 坡顶、坡面和洼地上高程统计特征具有明显的差异; 在降雨过程中, 由于糙度所处的位置不同, 对降雨侵蚀的响应特征也不同; 地表糙度与微坡度之间存在显著的线性关系。因此, 地表糙度对降雨侵蚀的响应规律具有一定的空间差异性。

**关键词** 地表糙度; 原位测量; 土壤侵蚀; 黄土高原

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

黄土区坡耕地上土壤侵蚀是一个较为复杂的侵蚀过程, 一直以来, 都受到研究人员的极大关注。在坡耕地上, 由于人为土地管理或耕作方式等的影响, 使得地表形成一种高低起伏的微地形, 或者称之为地表糙度<sup>[1-2]</sup>。根据地表糙度的空间变化特征, 可以将其分为随机糙度和有向糙度<sup>[3]</sup>。吴发启等<sup>[1, 3-5]</sup>研究表明, 在我国黄土高原地区的坡耕地上, 地表糙度主要是由于耕作活动和降雨侵蚀造成的。这些糙度具有明显的几何特征<sup>[5]</sup>, 其空间尺度在 0.109 ~ 28.0 cm 之间<sup>[6]</sup>, 耕作类型及耕作次数均会对其产生影响<sup>[1, 6]</sup>。

在水力侵蚀区, 人们将侵蚀归结为降雨与下垫面等因子综合作用的结果, 并将降雨因子视为“激励”变量, 下垫面因子视为“状态”变量<sup>[7-10]</sup>。因此, 水蚀过程就是包括雨滴溅蚀与搬运和径流冲刷与搬运四个子过程<sup>[11-13]</sup>。在裸露的坡耕地上, 地表糙度通过对蓄水和溅蚀作用的影响而改变土壤的入渗能力<sup>[4]</sup>, 并影响径流的大小<sup>[8]</sup>。同时, 地表糙度空间的起伏特征又会增加径流阻力, 影响坡面雨水的产流与汇流路径<sup>[2, 7, 12]</sup>。由此可见, 地表糙度对坡面土壤侵蚀的作用主要是通过其对坡面径流方式的影响而发生的。但是, 从目前的研究水平来看, 对地表糙度与侵蚀关系的研究还不够深入, 尤其是不同坡位上糙度与侵蚀关系的研究鲜见报道, 这必

然对深入了解地表糙度的侵蚀作用与指导社会生产实践造成不利影响。

鉴于此, 本文以黄土高原坡耕地上常见的地表糙度为研究对象, 通过人工模拟降雨试验, 在三维扫描处理技术的支持下, 对降雨过程中黄土坡面不同坡位上地表糙度对降雨侵蚀响应特征进行研究, 以期为进一步了解地表糙度的侵蚀作用机理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

试验采用室内模拟降雨的方法进行。所用人工降雨设备采用中国科学院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研制的侧喷式降雨系统, 降雨高度为 16 m, 降雨均匀度大于 80%, 单个试验区有效降雨面积约为 4 m × 9 m。

侵蚀槽为 2.0 m × 1.0 m × 0.5 m 的铁质槽, 侵蚀槽边缘以 1 cm 为单位标记刻度, 以作为微地形测量的控制点。供试土样取自杨凌土类名称为塋土的耕层土壤(0 ~ 20 cm), 机械组成见表 1。

土样风干后, 过 10 mm 筛, 并分层装入侵蚀槽内。在装土过程中, 为了使填土均匀且体积质量接近自然坡面, 采用体积质量随机实测法, 使土壤容

\* 国家自然科学基金项目(41271288)资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 吴发启(1957—), 陕西黄陵县人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。E-mail: wufaqi@263.net

作者简介: 赵龙山(1985—), 男, 甘肃古浪县人, 博士, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: zls@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2012-07-05; 收到修改稿日期: 2013-01-23

重保持在  $1.08 \text{ g cm}^{-3}$  左右。装土完成后,在坡面上按传统的耕作方式进行锄挖,以形成地表糙度。试

验设计坡度为  $10^\circ$ 。试验雨强为  $60 \text{ mm h}^{-1}$ 。用三维激光扫描仪测定地表高程信息。

表 1 试验用土壤(0~20 cm)机械组成

Table 1 Particle size distribution of the test soil (0~20 cm)

粒径 Particle size (mm)	<0.001	0.005~0.001	0.01~0.005	0.05~0.01	0.25~0.05	>0.25	物理性黏粒 Physical clay
质量百分比 Mass percent (%)	36.28	12.89	6.88	41.13	2.70	0.12	56.05

## 1.2 数据采集

根据侵蚀槽边缘的刻画,在布设微地形的坡面均匀标定 45 个大小为  $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$  的小区域,这 45 个小区域分别位于微地形的不同坡位,包括坡顶,坡面和洼地部分(如图 1 所示),并记录其坐标信息。用三维激光扫描仪分 4 个时段测定地表高程,

分别在雨前(0 min),降雨过程中的第 10 min、30 min 和 60 min。三维激光扫描仪的空间扫描间隔为 2 cm,即每个小区域可以测定 9 个高程值。实验结束后,通过坐标信息提取 45 个小区域监测到的高程数据,(共计 4 860 个高程值),来探讨黄土坡面不同坡位糙度对降雨侵蚀的响应特征。

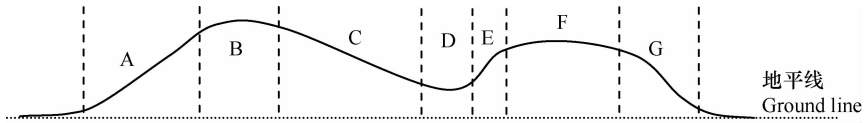


图 1 不同坡位上采集空间高程数据(A、C、E、G 为坡面;B、F 为坡顶;D 为洼地)

Fig. 1 Spatial elevation data of different slope positions (A, C, E and G are sides, B and F tops and D foot of slopes)

## 1.3 微地形分析方法

地表微地形是指空间尺度在厘米和毫米级上的地形特征,它所描述的是一个微小单元的地形信息。本研究将微地形信息表示为空间一点与相邻八个点的结构,如图 2 所示。并用微坡度来描述微地形的空间特征,用微坡向表示地形方向。

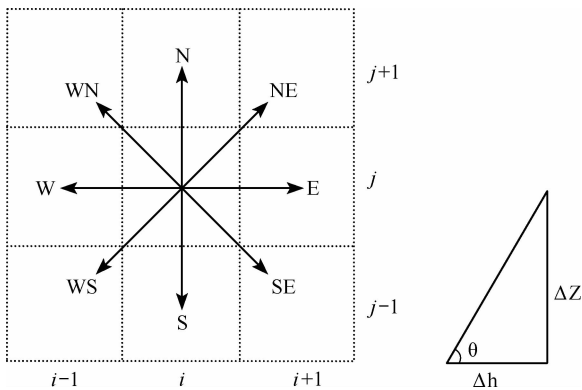


图 2 差分 DEM 网格计算示意图

Fig. 2 Sketch of calculation using difference DEM grid

利用差分原理来计算微坡度和微坡向,计算公式为<sup>[14]</sup>:

微坡度的数学表达式为,

$$S = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \times 180/n \quad (1)$$

微坡向的数学表达式为,

$$A = \arctan \left( \frac{f_y}{f_x} \right) \quad (2)$$

式中,  $S$ 、 $A$  分别为地表上某点的微坡度、微坡向;  $f_x$  为  $X$  方向高程变化率,  $f_y$  为  $Y$  方向高程变化率,其计算公式如下,此处  $(X, Y) \in \{(X, Y) \mid X = N, Y = N, NE, \dots, WN\}$ 。

$$f_x = (Z_{i-1,j-1} + Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} - 2Z_{i,j+1} - Z_{i-1,j+1} - Z_{i+1,j+1})/8h \quad (3)$$

$$f_y = (Z_{i+1,j+1} + Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i+1,j} - 2Z_{i-1,j} - Z_{i-1,j+1} - Z_{i-1,j-1})/8h \quad (4)$$

式中,  $h$  为栅格间距,  $\text{cm}$ ;  $Z_{i,j}$  为某点高程,  $\text{mm}$ 。

## 1.4 地表糙度指标

目前,地表糙度(Random roughness,  $RR$ ) 是较为常用的计算地表糙度的指标<sup>[15]</sup>,其计算公式为:

$$RR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \bar{Z}]^2} \quad (5)$$

式中,  $RR$  为地表糙度,  $\text{mm}$ ;  $x_i$  为高程点的空间坐标,  $\text{cm}$ ;  $Z(x_i)$  为位置在  $x_i$  的高程值,  $\text{mm}$ ;  $\bar{Z}$  为研究区内测得高程值的均值,  $\text{mm}$ ;  $N$  为研究区内测得高程

点数目。

## 2 结 果

### 2.1 坡面高程分布特征

对不同坡位上坡面高程分布进行统计,结果见图 3。可以看出,在同一种耕作措施下,坡顶、坡面和洼地的高程分布特征存在一定的差异,同时,在降雨过程中不同坡位上高程分布的变化也不同。在降雨之

前(0 min),坡顶和洼地的高程频率分布较为相似,其正态分布偏度也较接近。而对于坡面而言,其正态分布曲线较地表高程频率分布曲线偏左。此后,随着降雨的延续,地表高程均发生变化,使得不同坡位上高程频率分布的峰值均出现一定的位移。当降雨延续至 60 min 时,坡面、坡顶和洼地高程分布的偏度均减小,且峰值向着高程较小的方向移动。这表明地表糙度具有明显的空间变异性。

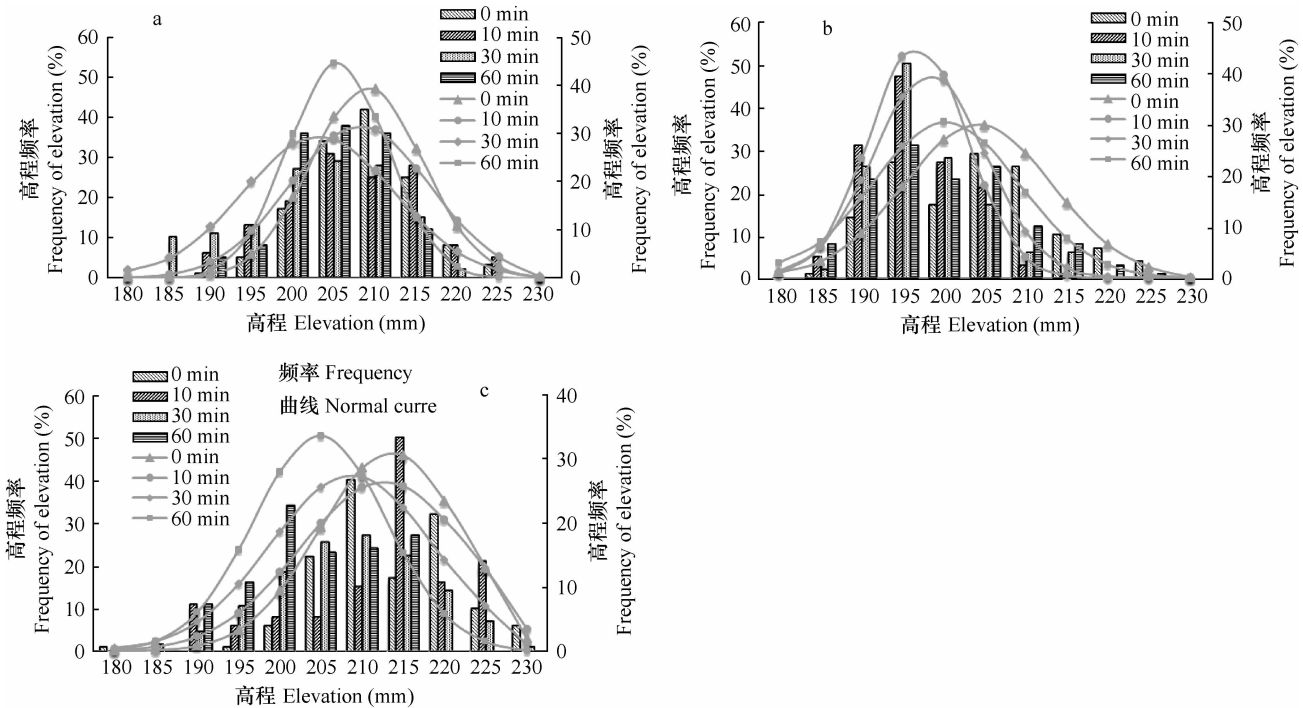


图 3 地表相对高程的频率分布特征(a 坡面;b 洼地;c 坡顶)

Fig. 3 Frequency distribution of relative elevations of land surface (a stands for side, b for foot and c for top of a slope)

### 2.2 微地形变化特征

对每个采样区域中心点 ( $Z_{i,j}$ ) 在不同方向上的微坡度进行统计,结果见表 2。表中 NW、N、NE、W、E、SE、S、SE 表示采样区域中心点的八个方向,数值表示微坡度大小。可以看出,对于坡顶、坡面和洼地,在 NW 方向上微坡度均较小,而在 N、SW、S 和 SE 方向上微坡度逐渐变大。

当降雨历时 0 min,对坡顶而言,微坡度在 NW 方向上最小,为 0.26%,在 S 方向上最大 (19.86%),在不同方向上的大小分布依次为 NW < W < E < SE < NE < N < S < SE;对坡面而言,微坡度的大小分布与坡顶具有较为相似的趋势;对于洼地而言,微坡向在不同方向上的大小分布依次为 NW < E < SE < S < W < SW < NE < N,可以看出,洼地微

坡度的分布在 E、W 和 SW 方向上较坡顶和坡面有较大的差异。此后,随着降雨侵蚀对地表的作用,坡面微地形发生相应的变化,但是由于所处的位置不同,其变化规律各不相同。至降雨历时 10 min 后,坡面、坡顶和洼地位置微坡度的分布规律均发生变化,特别是在坡顶和洼地上微坡度分布规律的变化最为明显。坡顶上 W 和 SW 方向上的微坡度明显变大,NE 方向上微坡度显著减小。洼地上 S 和 SE 方向上微坡度显著增大,W 和 NE 方向上微坡度显著减小。

### 2.3 不同坡位上糙度对降雨侵蚀的响应

图 4 显示了不同降雨时期地表糙度的变化特征。可以看出,不同坡位上糙度对降雨侵蚀的响应特征不同。在洼地上,在降雨前 30 min,地表糙度逐

渐增大,此后的 30 min 内,糙度又逐渐减小;对于坡顶而言,在降雨前 10 min,地表糙度出现小幅减小,之后又逐渐增大。当降雨持续 30 min 后,糙度又减小,因此其变化特征较复杂;对坡面而言,地表糙度的变化特征为前 30 min 减小,后 30 min 增大,这一特征与洼地的变化恰好相反。总体而言,地表糙度

坡面表现为减小,坡顶和洼地表现为增大,且在降雨的最后阶段(60 min)地表糙度趋于相同,洼地、坡面和坡顶的地表糙度分别为 3.74、3.58 和 3.52 mm。显然,在不同坡位上糙度的变化具有一定的差异性。究其原因,可能与降雨过程中不同坡位上地表对降雨侵蚀过程的响应差异有关。

表 2 不同方向上微坡度的变化特征

Table 2 Variation of micro-slope along different aspects

坡位 Position on slope	降雨历时 Rainfall duration (min)	微坡度 Micro-slope (%)							
		NW	N	NE	W	E	SW	S	SE
坡顶 Top	0	0.26	19.33	15.22	7.19	9.58	11.77	19.86	18.31
	10	0.15	13.58	9.78	11.61	8.17	7.64	13.64	16.19
	30	0.12	39.01	12.58	6.51	6.95	13.94	18.59	17.73
	60	0.10	18.62	9.77	10.08	6.22	15.70	19.31	13.58
坡面 Side	0	0.22	27.33	21.39	12.84	17.11	18.39	24.92	15.91
	10	0.15	19.09	12.04	5.61	10.65	15.44	17.89	14.18
	30	0.15	15.38	7.31	10.91	10.22	7.70	14.41	10.71
	60	0.15	19.38	15.93	8.57	9.06	10.12	18.00	12.44
洼地 Depression (Foot)	0	0.23	20.66	14.32	11.36	6.02	12.62	9.59	9.12
	10	0.15	15.54	14.75	12.66	10.67	9.57	21.25	15.19
	30	0.18	25.82	16.68	10.96	8.34	15.39	19.29	18.49
	60	0.19	23.00	13.46	6.81	9.03	14.75	21.14	16.99

土壤侵蚀过程是降雨与地表土壤相互作用的结果,在此过程中雨滴打击、径流冲刷与搬运、沉积是降雨对地表土壤的主要作用方式<sup>[16-18]</sup>。理论上,在雨滴打击作用下,地表土壤颗粒逐渐被剥蚀,粒径减小,糙度应该呈减小趋势,地表径流的冲刷和搬运作用进一步增加了糙度的这一变化<sup>[2,10]</sup>。但是,在坡顶位置,尽管土壤颗粒被剥蚀,并随径流向下坡迁移,但是雨滴打击下会形成鱼鳞坑,这反而增大了地表糙度<sup>[19]</sup>。而在坡面上尽管有雨滴的打击形成的鱼鳞坑,但是由于这些鱼鳞坑的深度和大小并不能抵抗径流的冲刷作用,因此随时被移平,从而削弱雨滴的打击效果,同时,径流还会挟带走坡面的土壤颗粒,从而使糙度呈减小的趋势<sup>[20-21]</sup>。对于洼地而言,在产流开始之前,雨滴的打击是主要影响因素,但是在产流之后,泥沙随着径流不断流入,而此时,洼地又会降低径流的挟带能力,从而使部分土壤颗粒沉积下来,进而增大了糙度<sup>[15,22]</sup>。

由此可见,由于所处坡位的不同,降雨过程中

雨滴打击、径流冲刷与搬运、沉积对糙度作用效果不同,因此,造成了不同坡位上糙度对降雨侵蚀的不同响应特征。

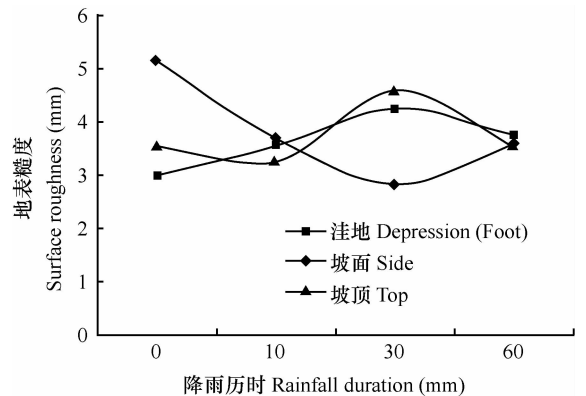


图 4 降雨侵蚀过程中不同坡位上地表糙度变化规律

Fig. 4 Variation of soil surface roughness with position on slope during rainfall

## 2.4 不同坡位上糙度与微坡度之间的关系

对不同坡位上微坡度与地表糙度之间的相关关系进行分析,结果见表3。可以看出,在降雨侵蚀过程中,坡顶处糙度与N、W方向上微坡度呈线性相关;坡面处糙度与SE、S等7个方向上微坡度呈线性相关;洼地处糙度与SE和S方向上微坡度呈线性相关。

表3 不同坡位上地表糙度与微坡度的相关关系

Table 3 Relationship between soil surface roughness and micro-slope as affected by position on slope

坡位 Position on slope	统计方程 Statistical equations	决定系数 $R^2$
坡顶 Top	$RR = 19.07 S_N - 48.26$	0.99
坡面 Side	$RR = -3.14 S_W + 20.55$	0.69
	$RR = 2.20 S_{SE} + 4.94$	0.88
	$RR = 4.59 S_S + 1.32$	0.99
	$RR = 4.59 S_{SW} - 4.52$	0.80
	$RR = 3.38 S_E - 1.08$	0.79
	$RR = 8.86 S_{NE} - 8.07$	0.88
	$RR = 5.25 S_N + 0.35$	0.99
	$RR = 0.03 S_{NW} + 0.04$	0.84
洼地 Depression (Foot)	$RR = 7.56 S_{SE} - 12.5$	0.91
	$RR = 7.74 S_S - 10.28$	0.62

注:表中RR表示地表糙度; $S_N$ 、 $S_W$ 、 $S_{SE}$ 、 $S_S$ 、 $S_{SW}$ 、 $S_E$ 、 $S_{NE}$ 和 $S_{NW}$ 分别表示坡向为N、W、SE、S、SW、E和NE时对应的微坡度 Note: RR represents soil surface roughness and  $S_N$ ,  $S_W$ ,  $S_{SE}$ ,  $S_S$ ,  $S_{SW}$ ,  $S_E$ ,  $S_{NE}$  and  $S_{NW}$  represents the micro-slopes with aspect towards N, W, SE, S, SW, E and NE, respectively

## 3 结 论

本研究通过人工模拟降雨试验,对黄土坡面不同坡位上地表糙度与降雨侵蚀的关系进行了研究,获得如下结论和认识:(1)不同坡位上地表高程分布特征不同,对降雨侵蚀的响应变化也不同;(2)对于坡顶、坡面和洼地,在NW方向上微坡度均较小,而在N、SW、S和SE方向上微坡度逐渐变大。雨前,对坡顶而言,在不同方向上的大小分布依次为 $NW < W < E < SE < NE < N < S < SE$ ;对坡面而言,微坡度的大小分布与坡顶具有较为相似的趋势;对于洼地而言,微坡向在不同方向上的大小分布依次为 $NW < E < SE < S < W < SW < NE < N$ ;(3)降雨侵蚀过程中,坡位不同时糙度对侵蚀的响应规律也不同。不同坡位上糙度变化与微坡向具有显著的线性关系。

通过以上研究,本研究发现,在同一尺度上,由于地表糙度具有一定的空间变异性,从而使其对降雨侵蚀的响应也具有一定的空间差异。因此,在对具有一定起伏特征坡面的土壤侵蚀过程进行研究时,应对其空间差异性进行充分考虑。

## 参 考 文 献

- [1] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正. 缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000: 55—76. Wu F Q, Zhao X G, Liu B Z. Analysis of erosion condition and dynamic mechanism in slight sloping field (In Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000: 55—76
- [2] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, 2005, 59(3): 253—266
- [3] 吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响. 水土保持学报, 2003, 17(3): 115—117. Wu F Q, Zhao X N, Cui W F. Effect of tillage management measure on rainfall infiltrates (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 115—117
- [4] 付湘, 谈广鸣, 胡铁松. 土壤空间变异条件下田间降雨入渗率的发布特性. 水利学报, 2010, 41(7): 759—801. Fu X, Tan G M, Hu T S. Characteristics of the infiltration rate distribution in spatial variable soil field (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(7): 759—801
- [5] 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于GIS的坡耕地数字高程模型的建立与应用. 农业工程学报, 2010, 26(11): 317—322. Zhao L S, Zhang Q F, Liang X L, et al. Establishment and application of DEM forloess slope land based on GIS (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 317—322
- [6] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 坡耕地地表糙度初探. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 39—41. Zheng Z C, He S Q, Wu F Q. An inquisition into surface roughness on slope farmland (In Chinese). *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(1): 39—41
- [7] 王民, 崔灵周, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下径流侵蚀力与地貌特征的动态响应关系. 水利学报, 2008, 39(9): 1105—1109. Wang M, Cui L Z, Li Z B, et al. Dynamic response relationship between runoff erosivity and topographic feature under the condition of artificial simulated rainfall (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(9): 1105—1109
- [8] 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—505. Liu Q Q, Li J C, Chen L, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (II)-Soil erosion (In Chinese). *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 493—505
- [9] Mark W S, Timothy R G, James C A. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(1): 4—48
- [10] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water re-

- gimes. *Catena*, 2001, 46(2): 103—123
- [11] Ellison W D. Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 1944, 25(4): 131—136
- [12] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力学过程试验研究. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 5—7. Li Z B, Lu K X, Ding W F. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on loess slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 5—7
- [13] 王文龙, 雷阿林. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究. *水利学报*, 2003, 34(9): 66—70. Wang W L, Lei A L. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism of slope flow in loess hilly region (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(9): 66—70
- [14] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006: 86—88. Tang G A, Yang X. An experiment introductory of spatial analysis based on ArcGIS (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006: 86—88
- [15] Kamphorst E C, Jetten V, Guerif J, et al. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1749—1758
- [16] 郑粉莉, 高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程. *土壤学报*, 2004, 41(1): 134—139. Zheng F L, Gao X T. Upslope runoff and sediment and downslope erosion-transport-deposition processes (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 134—139
- [17] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 40—45. Wu P T, Zhou P H. Research on the sheet flow erosion of Loess surface (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(1): 40—45
- [18] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 713—719
- [19] Ghadiri H. Crater formation in soils by raindrop impact. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(1): 77—89
- [20] Planchon O, Mouche E. A physical model for the action of raindrop erosion on soil micro-topography. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4): 1092—1103
- [21] Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 2005, 62(2): 111—124
- [22] Mwendera E J, Feyen J. Estimation of depression storage and Manning's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*, 1992, 52(4): 235—250

## EFFECT OF SOIL SURFACE ROUGHNESS ON RAINFALL EROSION AS AFFECTED BY SLOPE POSITION ON LOESS SLOPE

Zhao Longshan Zhang Qingfeng Wang Jian Wu Faqi<sup>†</sup>

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

**Abstract** Surface roughness of farmland, as a result of the joint effects of land management and soil erosion, has a critical impact on the processes of surface runoff and soil erosion. Through simulated rainfall experiments, investigation was made of effect of soil surface roughness on rainfall erosion as affected by slope position on a loess slope, using high-precision 3-D laser scanning techniques. Results show that of the same slope, the top, side and foot was significantly different in statistical characteristics of elevation and the effect of soil surface roughness on rainfall erosion was significantly affected by slope position. Soil surface roughness was found to be in significant linear relationship to gradients of micro-slopes. It is, therefore, concluded that the effect of surface roughness on rainfall erosion varies spatially.

**Key words** Soil surface roughness; In-site measurement; Soil erosion; Loess Plateau

(责任编辑:檀满枝)