

黄土坡耕地地表微地形空间变异性研究

赵龙山, 宋向阳, 张青峰, 吴发启

(西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以黄土高原普遍采用的人工锄耕、人工掏挖和等高耕作等管理措施的坡耕地为研究对象,利用半方差方法分析了不同耕作措施下坡面相对高程空间变异结构特征,以期开展数值模拟坡面微地形的研究提供理论支持。结果表明:不同耕作措施下坡面相对高程具有较强的空间相关性,依次为等高耕作 < 人工掏挖 < 人工锄耕;人工锄耕与人工掏挖坡面具有自相似性特征,等高耕作坡面,在平行坡面方向上具有自相似特征,在垂直坡面方向上具有自仿射性特征;利用球状理论模型能够较好地模拟坡耕地微地形空间分布特征。

关键词:半方差函数;空间变异;微地形;黄土区

中图分类号: S157; S343.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0146-05

微地形是小范围内地面的起伏状态,量纲为厘米级^[1],因此,耕作状态下的地表地形属于微地形的范畴。由于气候、土壤、植被和人类活动等因素的影响,地表微地形长期处于一个动态变化的过程,因此很难找出一个合理的指标来描述它,严重影响了人们对其在土壤侵蚀中的作用及相互耦合关系的认识。在水力侵蚀区,地表微地形会随着侵蚀过程,通过自身的消长与位置变化影响径流的产生、流向、汇流及径流量的多少,从而影响到侵蚀类型的演变和侵蚀产沙量的大小。为此,在 20 世纪 60 年代起, Kuripers, H A 等^[2]就该问题的研究提出过初步设想,并且定义地表糙度作为反映地表微地形的定量指标。随后,国内外许多学者就其形成的影响因素、测量方法以及与侵蚀和坡面水文关系等方面展开了研究,然而,由于其空间分布的复杂性和侵蚀过程中的难确定性,从而使一些研究成果难以解释其与土壤侵蚀的相互关系^[2-7]。

鉴于此,本文以黄土高原普遍采用的等高耕作、人工掏挖、人工锄耕等耕作措施的坡耕地为研究对象^[8],在对坡面相对高程的概率密度分布函数进行 $K-S$ 正态检验的基础上,采用半方差方法分析不同耕作措施下的坡面相对高程空间变异结构特征,探讨坡面相对高程的空间变异性,为开展数值模拟坡面微地形的研究工作提供理论支持,这将有助于进一步研究水蚀过程中地表微地形与土壤侵蚀的相互耦合关系。

1 试验设计与方法

1.1 试验概况

试验在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降雨大厅进行。选取杨凌耕地表层土(0~20 cm)为供试土壤。

耕作措施模拟:对于等高耕作,选用横坡耕作方式,形成犁沟和土垄,垄高 7~10 cm,垄距为 30 cm;人工掏挖,用镢头掏挖坡面,深度 5~8 cm,间距 20~25 cm;人工锄耕,沿坡面以传统方式锄耕,深度 4~5 cm。试验中聘请长期从事相同耕作措施农业生产的农民进行操作,使布设的耕作措施更接近自然状况。

等高耕作是坡耕地实施其它水土保持耕作措施的基础,沿等高线进行横坡耕作,在犁沟方向上形成“蓄水沟”;对于人工掏挖而言,主要模拟夏闲地翻耕晾晒;人工锄耕主要模拟在一些畜力牵引耕作方式不能进行的坡耕地及其人们对土地的日常管理形成的地形状态。这些地形都有拦蓄地表径流,增加土壤水分入渗率,减少水土流失,有利于作物生长的生产效益^[5,8]。

考虑到坡面上对物质运移起决定作用的是顺坡向下作用的重力分力,而当倾角较小时,质点沿坡面向下移动的重力加速度很小^[8],因此,认为倾角为 5°时较合理,基于此,试验设置 5 个坡度处理,分别为 5°、10°、15°、20°和 25°,模拟坡面从缓到陡的地形。

收稿日期:2010-01-28

基金项目:国家自然科学基金(40871133);国家重点基础研究发展计划(2007CB407201)

作者简介:赵龙山(1985—),男,甘肃占浪人,硕士生,主要从事土壤侵蚀与生态环境建设方面的研究。E-mail:zls7759989@163.com。

通讯作者:吴发启, E-mail:wufuqi@263.net。

试验在 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的土槽中进行,采用自制激光扫描仪采集坡面高程信息,具体描述见 1.1 节。

空间相关性计算用 GS+ 软件,空间变异性分析用 ArcGIS 9.3 软件。

1.2 高程数据获取

高程信息的测量采用非接触式激光扫描仪,见图 1。激光扫描仪由三部分组成: X-Y 工作台;激光测距仪(垂直精度 $\pm 0.03\text{ mm}$);数据采集及控制系统,其原理类似于针式打印机的传动装置。每个坡面扫描面积 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$,为了消除边际效应,有效面积定为 $0.57\text{ m} \times 1.74\text{ m}$,这样每个坡面获得 3 480 个高程点,每个点代表实际地面 $0.02\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ 的范围。



图 1 自制激光扫描仪

Fig.1 Homemade laser scanner

1.3 数据分析

1.3.1 坡面相对高程空间变异性经典统计分析方法 采用坡面相对高程的标准偏差(S_d)和变差系数(C_v)等统计特征值量化其空间变异分布状况,其中 S_d 反映了坡面相对高程的分布状况, C_v 反映了坡面相对高程分布的离散程度和空间变异程度,当 $C_v \leq 0.1$ 时,为弱变异性; $0.1 < C_v < 1$ 时,为中等变异性; $C_v \geq 1$,为强变异性^[9]。

采用单样本 $K-S$ 法对坡面相对高程概率密度分布函数进行正态检验。假设 H_0 : 为样本总体与指定的理论分布之间无显著性差异。当相对于 $K-S$ 的 Z 统计量相伴概率值 P 大于给定的显著性水平时,则接受 H_0 假设,认为样本总体服从假设的理论分布^[10]。

1.3.2 坡面相对高程空间变异结构分析方法 借助地统计学方法分析坡面相对高程空间变异结构。经验半方差公式样本数据点对高程与它们之间距离关系可以描述为^[11]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, x_i 为已知坡面高程测点的空间坐标位置; $Z(x_i)$ 为已知坡面高程测点处的相对高程值; h 为任意两个已知坡面高程测点间的距离; N 为已知坡面高程测点的数量; $N(h)$ 为间距为 h 的坡面高程数据样本对数。式(1)中,随着 h 的逐渐增大, $\gamma(h)$ 也不断增大,当 $h \leq H$ 时,任意两坡面高程点的相对高程值之间具有相关性,而当 $h \geq H$ 时,则不再存在相关性,其中 H 称为坡面相对高程的空间分布相关距离。基于式(1)给出的半方差经验函数,采用 Kriging 插值法对相对高程进行最优无偏估值,得到微地面的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 坡面相对高程特征分析

2.1.1 坡面相对高程统计特征值 表 1 给出不同耕作措施下坡面相对高程统计特征值结果。可以看出,不同耕作措施下坡面相对高程的标准偏差值 S_d 等高耕作坡面最大,其次是人工掏挖和人工锄耕,不同措施下坡面微地形分布明显不同。反映坡面相对高程空间变异程度的 C_v 值均小于 0.1,这说明坡面微地形分布的空间变异强度属于弱变异程度^[9],且等高耕作 > 人工掏挖 > 人工锄耕。

表 1 不同耕作措施下坡面相对高程统计特征值

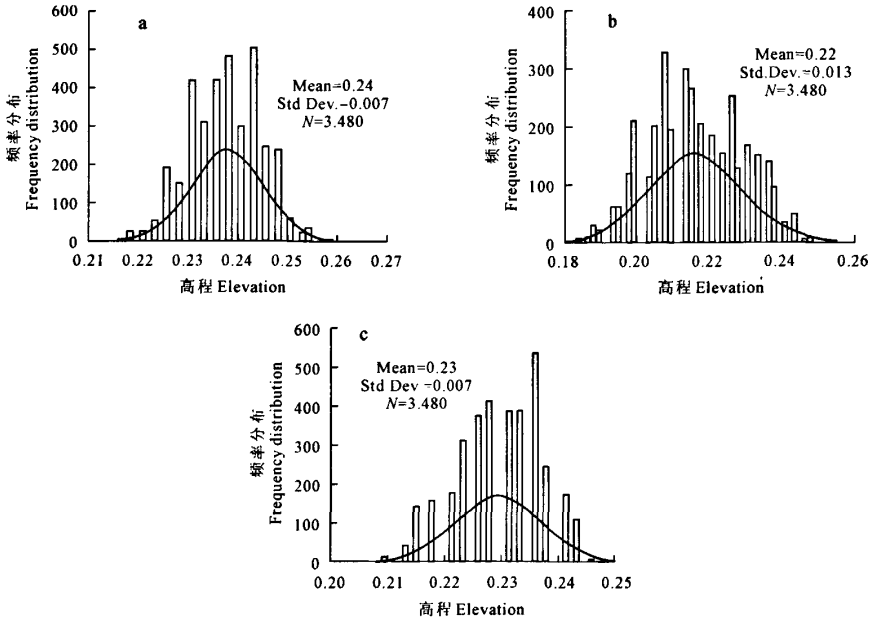
Table 1 Statistical features of relative elevation under different types of tillage practice

耕作措施 Tillage practice	均值 Z (m) Mean		标准偏差 S_d Standard deviation	变差系数 C_v Variation coefficient
	变化范围 Range	均值 Mean		
等高耕作 Contour tillage	0.181 ~ 0.260	0.216	0.013	0.061
人工掏挖 Artificial digging	0.188 ~ 0.260	0.238	0.009	0.038
人工锄耕 Artificial hoeing	0.178 ~ 0.230	0.226	0.007	0.030

2.1.2 坡面相对高程概率密度分布函数的正态检验 图 2 显示了不同措施下坡面相对高程空间分布,利用单样本 $K-S$ 法对不同耕作坡面相对高程概率密度分布函数进行正态检验^[10],在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著,表明不同耕作措施下坡面相对高程概率密度分布函数均服从正态分布。

图 3 显示了不同耕作措施下坡面相对高程 $Q-Q$ 正态概率,图中点趋于 45° 斜线分布,这进一步表明坡面相对高程概率密度分布呈现正态分布状态,

可采用地统计学方法分析不同耕作措施下坡面相对高程空间变异性。



注:a 人工掏挖; b 人工锄耕; c 等高耕作。下同。
Note: a Artificial digging; b Artificial hoeing; c Contour tillage. The same as below.

图 2 不同耕作坡面相对高程概率密度分布

Fig.2 The frequency density distribution of relative elevation under different types of tillage practice

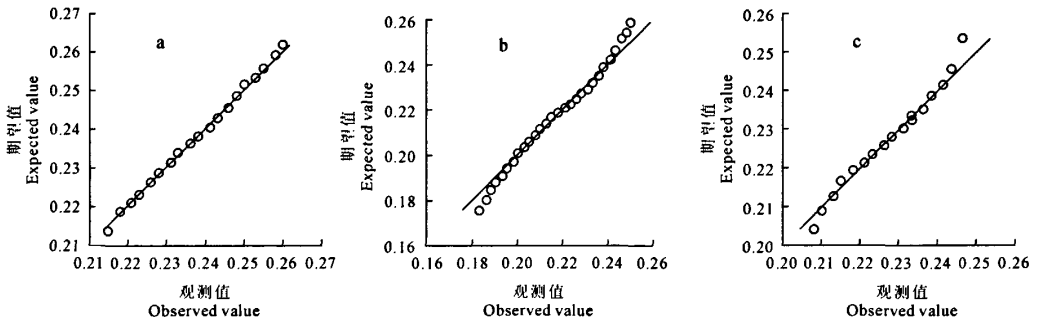


图 3 不同耕作措施下坡面相对高程 Q - Q 正态概率图

Fig.3 Normal Q - Q plot of relative elevation under different types of tillage practice

2.2 坡面相对高程空间相关性分析

2.2.1 半方差函数分析 表 2 给出利用球状理论模型拟合式(1)得到的坡面相对高程半方差函数中的相关参数。利用空间变异特征参数 $C_0/(C_0 + C)$ 对坡面相对高程的空间相关性进行程度分类:该值小于 0.25 时,表明较强的空间相关性;在 0.25 ~ 0.75 之间,属中等空间相关性;大于 0.75 则意味着较弱的空间相关性^[9]。3 种耕作方式下坡面 $C_0/(C_0 + C)$ 的均值分别为 0.1833、0.2195 和 0.2186,这说明相对高程具有较强的空间相关性。另一方面,

不同的耕作方式下 H 值不同,等高耕作措施下为 0.326 m,人工掏挖与人工锄耕分别为 1.275 m 和 1.437 m。由此可见,3 种耕作管理措施下坡面微地形具有较强的空间相关性,且空间相关距大小关系为等高耕作 < 人工掏挖 < 人工锄耕。

2.2.2 坡面微地形分布的空间变异性 不同耕作方式下坡面微地形分布具有明显的方向性。对于等高耕作方式的坡面在垂直于坡面的方向上主要为土垄或土沟,具有明显的自仿射性,平行于坡面方向上以沟垄相间分布,具有明显的自相似性特征;人工锄

表 2 不同耕作措施下坡面相对高程空间变异特征参数及其统计特征值
Table 2 Statistical features of relative elevation under different types of tillage practice

耕作方式 Tillage practices	统计特征值 Characteristic value	坡面相对高程空间变异特征参数 Spatial variability parameters of relative elevation				相关性程度 Degree of correlation
		C_0 (cm^2)	$(C_0 + C)$ (cm^2)	$C_0/(C_0 + C)$	H (m)	
等高耕作 Contour tillage	最大值 Max.	0.000103	0.001770	0.478200	4.010000	强 Strong
	最小值 Min.	0.000070	0.000126	0.058300	0.040000	
	均值 Mean.	0.000048	0.000309	0.183300	0.326000	
	变差系数 CV	0.710000	1.130000	0.550000	2.770000	
人工掏挖 Artificial digging	最大值 Max.	0.000131	0.002030	0.402400	4.010000	较强 Stronger
	最小值 Min.	0.000020	0.000080	0.096400	0.050000	
	均值 Mean.	0.000060	0.000350	0.219500	1.275000	
	变差系数 CV	0.800000	1.250000	0.630000	1.260000	
人工锄耕 Artificial hoeing	最大值 Max.	0.000090	0.001600	0.466600	4.010000	最强 Strongest
	最小值 Min.	0.000010	0.000050	0.031400	0.040000	
	均值 Mean.	0.000040	0.000280	0.218600	1.437000	
	变差系数 CV	0.650000	1.310000	0.550000	1.250000	

注:表中数据为 5°,10°,15°,20°,25°坡面计算的均值。

Note: The data in the table are the mean values calculated with the gradients of 5°, 10°, 15°, 20° and 25°.

挖和人工锄耕耕作方式下坡面以凹凸起伏的地形为主,具有明显的自相似性特征。因此,在模拟坡面微地形空间变化的过程中要充分考虑这一特征。

基于表 2 给出的坡面相对高程球状半方差函数的参数,利用 ArcGIS 9.3 中 Kriging 内插法生成不同耕作方式下坡面微地形的空间分布特征,如图 4 所示。人工锄耕高程变化为 0.178 m~0.230 m,人工掏挖高程变化为 0.188~0.260 m,等高耕作高程变化为 0.181~0.260 m。人工锄耕微地形最大高程差为 0.052 m,人工掏挖为 0.079 m,人工锄耕为 0.078 m,人工掏挖和等高耕作坡面微地形起伏较大,正负地形分明。和人工锄耕措施下坡面比较人工掏挖坡面凸面多而且大,凸起大多呈东西走向,南北方向上高程变化明显,南坡较长且较北坡平缓。

由此可见,等高耕作下坡面微地形主要以南北、东西两个方向呈现不同的空间特征;人工锄耕和人工掏挖坡面则呈各向同性的特征。

3 结论与讨论

耕作措施是影响坡面微地形空间分布的主要因素,不同耕作措施下坡面相对高程具有较强的空间相关性,且空间相关距大小关系为等高耕作 < 人工掏挖 < 人工锄耕;人工锄耕与人工掏挖坡面具有各向同性特征,而等高耕作坡面,在平行坡面方向上具有自相似特征,在垂直坡面方向上具有自仿射性特征。利用 ArcGIS 9.3 中球状理论模型能够较好地模拟坡耕地微地形空间分布特征。

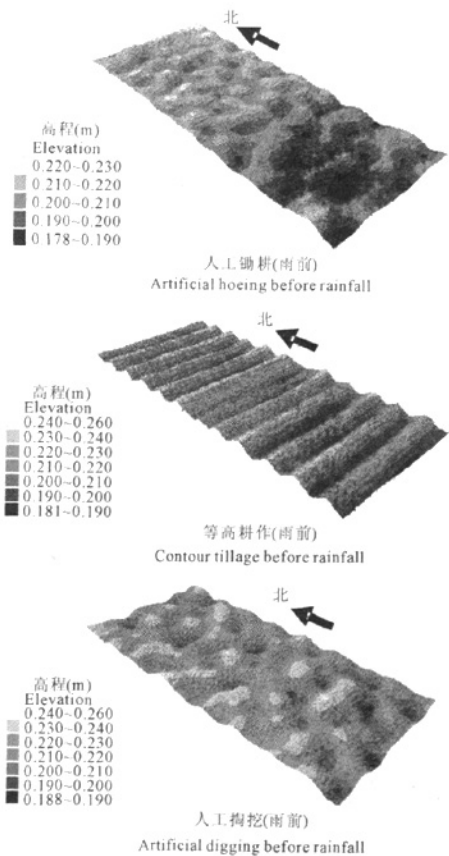


图 4 不同耕作措施下坡面微地形空间分布特征
Fig.4 Spatial distribution of micro-topography under different types of tillage practice

在试验基础上采用半方差方法对坡耕地微地形的空间变异结构特征进行研究,对于揭示耕作状态下微地形特征的本质,为开展数值模拟坡面微地形的研究工作提供理论支持。同时对正确理解、描述与量化水蚀过程中地表微地形与土壤侵蚀的相互耦合关系具有重要的理论意义。

参考文献:

- [1] 秦宜云,卜英勇.基于分形理论的富结壳微地形可视化技术[J].计算机工程,2001,1(32):226—228.
- [2] Kniipers H A. A relief-meter for soil cultivation studies[J]. Neth J Agric Sci, 1957, 5:255—262.
- [3] Sören N H, Matthias K, Sabine C, et al. Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning[J]. Catena, 2009, 72(2):128—139.
- [4] Onstad C A. Depressional storage on tilled soil surfaces[J]. Trans Am Soc Agric Eng, 1984, 27:729—732.
- [5] 郑子成,吴发启,何淑勤.耕作措施对产流作用的研究[J].土壤,2004,36(3):327—330.
- [6] 吴发启,赵晓光,刘秉正,等.地表糙度的量测方法及对地面径流和侵蚀的影响[J].西北林学院学报,1998,(2):15—19.
- [7] 吴发启,郑子成,何淑勤.坡耕地地表糙度的研究进展[J].西北林学院报,2002,17(3):38—43.
- [8] 吴发启,赵晓光,刘秉正.缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析[M].西安:陕西科学技术出版社,2000.
- [9] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York:Academic Press, 1980.
- [10] 余建英,何旭宏.数据统计分析与SPSS应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.

Spatial variability of micro-topography in the loess slope land

ZHAO Long-shan, SONG Xiang-yang, ZHANG Qing-feng, WU Fa-qi

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

Abstract: The semi-variance methodology is applied to analyze the spatial variability characteristics of field surface relative elevation (SRE) under different types of tillage measures like artificial hoeing, contour tillage and artificial digging in loess slope land. The results indicated that: (1) The degree of spatial correlation of different types of tillage practice was contour tillage < artificial digging < artificial hoeing. (2) Soil surface microrelief had the self-similar features to the slope with hoeing and that with digging in the aspects of different directions, while to the slope with contour tillage, it had self-similar features in the parallel to slope and had self-affine features in the vertical to slope, and spherical interpolation model could be used to simulate the spital distribution features of micro-topography in the loess slope land.

Keywords: semi-variogram; spatial variability; micro - topography; loess area