

# 坡面水蚀过程中地表糙度的空间异质性研究

张莉<sup>1</sup>, 张青峰<sup>1,2</sup>, 徐健<sup>3</sup>, 张翔<sup>1</sup>

(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. 中国石油长庆油田分公司, 西安 710018)

**摘 要:** 地表糙度是影响土壤侵蚀过程的重要因子之一, 也是土壤侵蚀学科领域研究的热点问题, 准确把握水蚀过程中地表糙度的空间异质性特征, 对进一步理解土壤侵蚀过程具有重要意义。该文以黄土高原人工锄耕(AB)坡面地表糙度为研究对象, 采用地统计学和 GIS 技术相结合的方法研究了微尺度(2 cm×2 cm)下地表糙度由雨前(BR)→溅蚀(SpE)→面蚀(ShE)→细沟侵蚀(RE)演化过程中的空间异质性特征。结果表明: 地表糙度在各侵蚀阶段均呈弱变异性; 半方差函数理论模型分析表明雨前(BR)、溅蚀(SpE)阶段符合指数模型, 面蚀(ShE)阶段符合球状模型, 细沟侵蚀(RE)阶段符合高斯模型; 从空间结构特征来看, 各侵蚀阶段均具有中等程度的空间自相关性, 空间异质性受随机性因素和结构性因素共同作用, 其自相关距分别为 0.46 m, 0.28 m, 1.29 m, 1.04 m; 分形维数分析表明不同水蚀过程中地表糙度的空间变异主要发生在较小尺度上。研究结果可为进一步揭示水蚀过程中地表糙度与土壤侵蚀的相互耦合关系奠定基础。

**关键词:** 地表糙度; 空间异质性; GIS; 地统计学; 分形

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0006-05

## Study on the Spatial Heterogeneity of Soil Surface Roughness during the Course of Water Erosion

ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHANG Qing-feng<sup>1,2</sup>, XU Jian<sup>3</sup>, ZHANG Xiang<sup>1</sup>

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

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Surface roughness is one of the most important factors affecting soil erosion process, and is also the hotspot in research filed of soil erosion. Exactly grasping the spatial heterogeneity of surface roughness in water erosion process is of significance for further understanding the process of soil erosion. This paper took the surface roughness of artificial backhoe cultivated in loess plateau as research objects, analyzed the spatial heterogeneity of surface roughness during the development of soil erosion from the stages of before rain (BR), splash erosion (SpE), sheet erosion (ShE) to rill erosion (RE) by the method of geostatistics and Geographical Information System (GIS) technique under the micro-scale (2 cm×2 cm) conditions. The results showed that the surface roughness at all stages of soil erosion presented a weak variation. Analysis of variance of theoretical variogram models showed that before rain (BR) and splash erosion (SpE) followed exponential model, sheet erosion (ShE) followed spherical model, and rill erosion (RE) followed Gaussian model. In terms of spatial structure, each stage of soil erosion all showed moderate spatial autocorrelation. The spatial heterogeneity was resulted from both structural factors and random factors. The autocorrelation distance of the stage of before rain (BR), splash erosion (SpE), sheet erosion (ShE) and rill erosion were 0.46 m, 0.28 m, 1.29 m and 1.04 m, respectively. Fractal dimension analysis showed that the spatial variability of surface roughness in the different process of water erosion mainly occurred on the smaller scales.

收稿日期: 2013-07-13

修回日期: 2013-08-07

资助项目: 陕西省自然科学基金项目(2011JM5007); 国家自然科学基金项目“黄土坡耕地地表糙度对产汇流的影响研究”(41271288)

作者简介: 张莉(1985—), 女, 甘肃会宁人, 硕士生, 研究方向: 地图学与地理信息系统。E-mail: zhangli11@yeah.net

通信作者: 张青峰(1974—), 男, 山西孝义人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地图学与地理信息系统、土地资源与空间信息技术方面的研究。  
E-mail: zhqf@nwsuaf.edu.cn

The results can offer a foundation for revealing the coupling relationship between surface roughness and soil erosion in the process of water erosion.

**Key words:** surface roughness; spatial heterogeneity; GIS; geostatistics; fractal dimension

黄土坡耕地地表糙度是由于人为土地管理和土壤侵蚀共同作用形成高低起伏和凹凸不平的地表形态,严重影响地表的下渗、地表产流、产沙及地表演化过程<sup>[1-5]</sup>。与此相反,地表洼地填水和泥沙拦截、输移等过程也会对地表糙度产生影响,而这一相互影响过程是随地表糙度空间分布特征的变化而变化的<sup>[1]</sup>,因此,开展坡面侵蚀过程中地表糙度空间分布特征的研究,对于深入了解坡面水蚀过程具有重要意义。空间异质性是生态学过程和格局在空间分布上的差异性和复杂性<sup>[6]</sup>。近年来已逐渐成为生态学、土壤学等领域研究的热点问题<sup>[7-8]</sup>。而针对坡耕地地表糙度空间异质性的研究较少<sup>[9-10]</sup>,尤其是针对不同水蚀过程中地表糙度空间异质性的研究<sup>[10]</sup>。研究不同水蚀过程中地表糙度的空间异质性,能够深入了解水蚀过程中地表糙度的空间结构特征,空间变异性,尺度及其复杂程度,对进一步揭示水蚀过程中地表糙度与土壤侵蚀的相互耦合关系具有重要意义。

地统计学是以传统统计学为基础发展起来的一门新的空间分析方法,适用于区域化变量空间分布特征的描述。将地统计学与 GIS 技术相结合,一方面能有效地揭示变量的空间分布、变异及相关性特征,另一方面还能将空间格局与生态过程联系起来,更好地解释空间格局对生态过程与功能的影响,被认为是研究变量的空间异质性最为有效的方法之一<sup>[11]</sup>。在区域土壤属性的空间变异性研究中得到了广泛地应用<sup>[6,12-13]</sup>。本文试图采用地统计学与 GIS 技术相结合的方法,分析比较黄土人工锄耕坡面地表糙度在不同侵蚀(雨前一溅蚀一片蚀一细沟侵蚀)演化过程中的空间异质性特征,揭示水蚀过程中地表糙度的空间异质性,以期为进一步明确水蚀过程中地表糙度与土壤侵蚀的相互耦合关系奠定基础。

## 1 研究方法

### 1.1 实验设计

本试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅进行,所用降雨设备为侧喷式人工降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨高度为 16 m,可以满足所有的雨滴达到终点速度。试验用土槽规格为 2.0 m×1.0 m×0.5 m,以陕西省杨凌区坡耕地原状表层土(0—20 cm)为实验用土,土壤容重为 1.30 g/cm<sup>3</sup>,含水率约为 10%。为了使布

设的耕作措施更接近自然状况,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。试验雨强为 60 mm/h,坡度为 20°,设置 3 个重复,进行连续分段(雨前 BR、溅蚀阶段 SpE、面蚀阶段 ShE、细沟侵蚀阶段 RE)人工模拟降雨实验<sup>[14]</sup>。同时,采用高分辨率、非接触式激光扫描仪<sup>[15]</sup>(徕卡,垂直误差小于 3 mm)分别测量分段降雨前后的耕作地表糙度(采样间隔 2 cm×2 cm),进而构建微地表数字高程模型(M-DEM)<sup>[15]</sup>。

### 1.2 数据分析

运用 SPSS 17.0 分别对不同侵蚀阶段坡面相对高程数据进行描述性统计分析,并采用单样本 K-S(柯尔莫哥洛夫—斯摩洛夫)法在  $\alpha=0.05$  显著水平上对统计量进行正态分布检验。将服从正态分布的原始数据在 GS<sup>+</sup> 软件中进行地统计分析,拟合半方差函数模型,绘制半方差函数图,进行空间异质性分析。半方差函数计算公式如下:

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

式中: $\gamma(h)$ ——半方差函数; $h$ ——样点间距即步长(lag); $N(h)$ ——间距为  $h$  的样点数; $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ ——高程  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i+h$  处的观测值。

半变异函数曲线通常可用的拟合模型有球状模型(Spherical)、高斯模型(Gaussian)、指数模型(Exponential)和线性模型(Linear)等。模型的最优化选择可用决定系数  $R^2$ 、残差平方和 RSS 及变程来决定。 $R^2$  越大,拟合曲线模型越精确;RSS 越小,说明拟合曲线模型的效果越好<sup>[16]</sup>,越能反映地表糙度的空间变异性。通过半方差函数拟合参数可以分析地表糙度的空间异质性特征。

分形维数  $D$  的大小是变量复杂程度的一种度量<sup>[17]</sup>,其计算公式为:

$$D = 2 - m/2 \quad (2)$$

式中: $m$ ——双对数半方差图的斜率,可通过对数据点的直线拟合来得到。 $D$  值的大小反映了变量的小尺度变异和大尺度变异的相对重要性。 $D$  值越大,说明小尺度上的变异显著,由随机性因素引起的异质性占有较大的比重,它所表现的空间分布越复杂; $D$  值越小,说明大尺度上的变异控制着地表糙度的配置,空间分布相对简单,空间自相关性较强,结构性好。

Kriging 插值方法是地统计学中最常用的插值方法之一,它以空间自相关为基础,利用原始数据和半方差函数的结构性,对坡面内未知高程点的相对高程进行最优无偏估值,得到相关坡面地表糙度的空间变异分布状况<sup>[18]</sup>。

2 结果与分析

2.1 地表糙度的描述性统计特征

运用经典统计方法对各个坡面相对高程进行描述性统计特征分析,获取变量的平均值、变异系数等,以此来衡量不同侵蚀阶段地表糙度的平均状况和变异程度,当  $CV \leq 10\%$  时,为弱变异性; $10\% < CV < 100\%$  时,为中等变异性;当  $CV \geq 100\%$  时,为强变异性<sup>[19]</sup>。结果如表 1 所示,其中,平均值反映变量的绝对变异,变异系数反映变量的相对变异。

表 1 黄土坡耕地地表糙度的基本特征统计值

侵蚀阶段	最小值	最大值	均值/ cm	标准偏 差 Sd	变异 系数/%	分布类型
BR	0.171	0.253	0.219	0.014	6.5	正态分布
SpE	0.178	0.250	0.220	0.013	5.8	正态分布
ShE	0.181	0.250	0.221	0.013	5.8	正态分布
RE	0.173	0.253	0.216	0.014	6.4	正态分布

从平均值来看,表现为  $ShE > SpE > BR > RE$ 。从变异系数 CV 来看,各侵蚀阶段的变异系数 CV 均在 10% 以下,属于弱变异性,其中,RE 阶段最小,为 6.4%,BR 阶段最大,为 6.5%,SpE 和 ShE 阶段相等,介于 BR 和 RE 之间。经 K-S 检验,各侵蚀阶段相对高程数据均符合正态分布。

2.2 地表糙度的空间结构特征

由上述描述性统计特征分析可知,各侵蚀阶段坡面相对高程数据均符合正态分布,故可对其进行半方差函数分析<sup>[20]</sup>(图 1)。

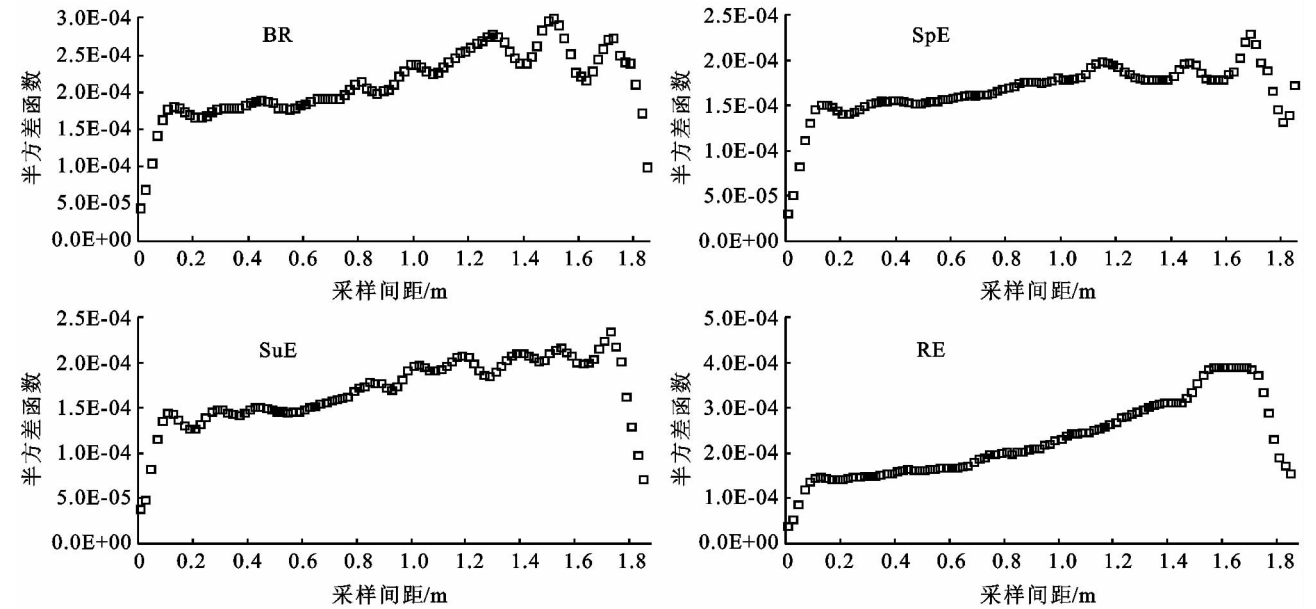


图 1 不同侵蚀阶段地表糙度的半方差函数

由图 1 可知,在整体上,各侵蚀阶段的半方差函数值均随采样间距的增加而增加,在一定的尺度范围内又保持相对稳定的趋势。其中,BR、SpE、ShE 阶段在一定的尺度范围内表现出相似的空间变异特征。在 0—10 cm 的较小范围内,各侵蚀阶段的半方差值均随采样间距的增加而增加,表现为  $BR > SpE > ShE > RE$ 。在 20—50 cm 的范围内,各侵蚀阶段的半方差值保持相对稳定的趋势。BR、SpE、ShE 在 60—170 cm 的范围内又逐渐增加,达到最大值,在 170—180 cm 的范围内逐渐减小;RE 阶段在 60—160 cm 的范围内逐渐增加,达到最大,在 160—180 cm 的范围内半方差值又随采样间距的增加而减小。半方差函数图的这种变化说明在不同侵蚀阶段,黄土坡耕

地地表糙度的空间异质性存在多尺度变异特征,且不同尺度上的变异叠加在一起,形成“巢状”的方差结构<sup>[21]</sup>。由表 2 半方差函数拟合结果可以看出,BR 和 SpE 阶段的空间变异以指数模型拟合效果较好,ShE 阶段以球状模型拟合效果较好,RE 阶段以高斯模型拟合效果较好,其中,除了 BR 阶段的  $R^2$  较小,RSS 较大之外,其他阶段的理论模型拟合程度均较高,能够很好地反映地表糙度的空间结构特征。块金值  $C_0$ 、基台值  $C+C_0$ 、结构比  $C/(C+C_0)$  以及变程是半方差函数中的几个重要参数,通过对这些参数的分析可以比较地表糙度的空间异质性特征,其中,块金值  $C_0$  反映地表糙度由随机因素引起的空间

异质性,即受不确定性因素影响的程度。不同侵蚀阶段地表糙度随机部分的空间异质性相同。基台值( $C+C_0$ )反映地表糙度在研究范围内的总的空间变异强度,其值越高,表示系统总的空间异质性越高。由表 2 得出,在 RE 阶段地表糙度的空间异质性最强。结构比  $C/(C+C_0)$  用来量化地表糙度由自相关部分引起的空间异质性程度的高低<sup>[22]</sup>。当  $C/(C+C_0)$  小于 25% 时,表明变量具有较弱的空间自相关性,当  $C/(C+C_0)$  在 25%~75% 之间时,变量具有中等的空间自相关性,当  $C/(C+C_0)$  大于 75% 时,变量具有较强的空间自相关性<sup>[23]</sup>。通过对比分析不同侵蚀阶段地表糙度的结构比  $C/(C+C_0)$  发现,各侵蚀阶段的  $C/(C+C_0)$  均在 25%~75% 之间,说明黄土人工锄耕坡面地表糙度在各侵蚀阶段均具有中等程度的空间自相关性。变程反映地表糙度空间自相关变异的尺度范围,在变程内地表糙度存在空间相关性,反之则不存在。随降雨侵蚀的不断进行,各侵蚀阶段的空间

自相关范围也不同,ShE 阶段的变程最大,达到 1.29 m,表明在面蚀阶段,坡面具有较好的空间连续性,在 2 cm×2 cm 的研究尺度下其空间变异性并不明显,有待更小尺度的研究;RE 阶段的变程较小,表明在细沟侵蚀阶段,影响坡面空间变异过程的作用尺度较小<sup>[24]</sup>。SpE 阶段的变程最小,为 0.28 m,说明溅蚀阶段坡面的空间连续性较差,在以后的研究中应取更小的采样间距。

分形维数  $D$  表征地表糙度空间分布的复杂程度。由表 2 可以看出,在不同的侵蚀阶段,地表糙度的分形维数较大( $1.80\pm0.02$ ),接近于 2,这个较大的  $D$  值说明黄土人工锄耕坡面地表糙度在不同水蚀过程中的空间变异主要发生在较小的尺度上<sup>[21]</sup>。其中,不同侵蚀阶段地表糙度的复杂性表现为  $BR\approx ShE>SpE>RE$ ,表明在 BR 和 ShE 阶段,地表糙度的空间格局较复杂,而在 SpE 和 RE 阶段地表糙度的空间格局相对简单,结构性较好。

表 2 黄土坡耕地地表糙度的半方差函数拟合曲线模型及参数

侵蚀阶段	理论模型	块金值 / $\times 10^{-5}$	基台值 / $\times 10^{-5}$	结构比 /%	判定 系数	残差 平方和	变程 /m	分形维数
BR	Exponential	10	20	57	0.50	1.117E-07	1.38	1.82
SpE	Exponential	10	20	59	0.63	3.227E-08	0.85	1.80
ShE	Spherical	10	20	50	0.50	7.196E-08	1.29	1.82
RE	Gaussian	10	30	65	0.70	2.039E-07	1.80	1.78

Christien 等<sup>[25]</sup>认为一个具有异质性的系统属性其在空间上的表现形式为斑块状态(Patchiness),而非均匀(Uniform)或随机(Random)分布。由表 1、表 2 可得出,黄土坡耕地地表糙度在不同水蚀过程中均存在空间异质性现象,表明将地统计学与 GIS 技术相结合来研究黄土坡耕地地表糙度的空间异质性具有可行性,这为今后在黄土区进行地表糙度空间异质性的研究提供一定的方法支持。

2.3 地表糙度的空间分布特征

Kriging 插值图能够直观反映地表糙度的空间异质性及空间分布格局。利用 Kriging 插值法对所有坡面相对高程进行最优化内插,绘制黄土人工锄耕坡面地表糙度在各侵蚀阶段的空间分布图(图 2)并进行分析,进一步了解不同水蚀过程中地表糙度的空间分布特征。Kriging 插值各参数的设置参照表 2 中的半方差函数模型参数。

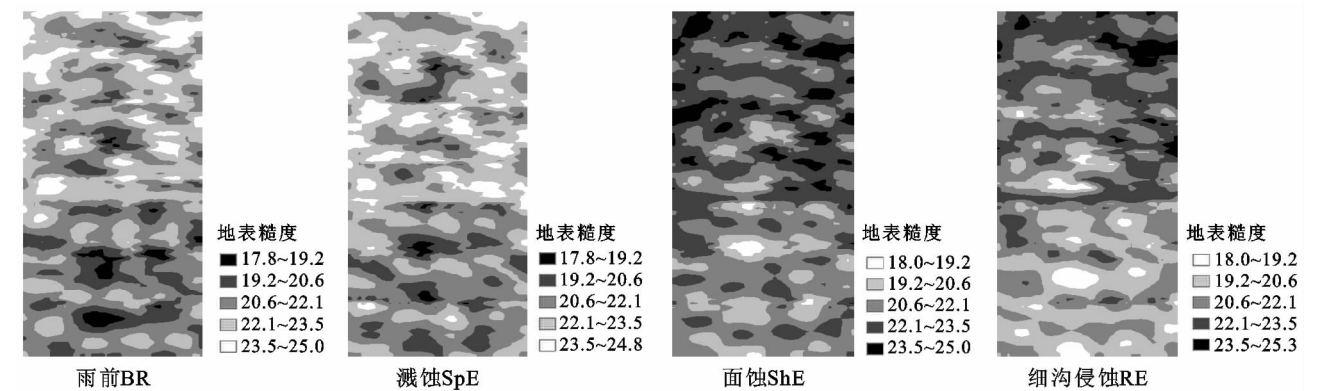


图 2 不同侵蚀阶段地表糙度的空间分布

由图 2 可以看出,不同水蚀阶段地表糙度空间分布的复杂程度和斑块等级不同,具有明显的斑块状或

连续分布的特点,通过分形维数可以衡量斑块的复杂程度,其中,BR、ShE 阶段的分形维数较大,其空间分

布较复杂,在图中呈现明显的斑块状分布,且差异明显;RE 阶段的分形维数较小,在图中的空间分布较简单,呈现出较明显的连续分布状况。这正好和分形维数分析所得的结果相吻合。表明 SpE、ShE 和 RE 阶段对地表糙度变化的影响不同,ShE 阶段对地表糙度变化的影响最大。

### 3 结论

(1) 由描述性统计特征分析得出,黄土人工锄耕坡面地表糙度在各侵蚀阶段均具有较弱的空间变异性,这与赵龙山等<sup>[9]</sup>的研究结果相似。

(2) 从空间结构特征来看,黄土人工锄耕坡面地表糙度在各侵蚀阶段均具有中等程度的空间自相关性,空间异质性受随机性因素和结构性因素的共同作用,其自相关距分别为 0.46 m,0.28 m,1.29 m,1.04 m;地表糙度在 RE 阶段具有较强的空间异质性。分形维数分析表明地表糙度在不同水蚀过程中均具有较大的分形维数( $1.80 \pm 0.02$ ),表明不同侵蚀阶段地表糙度的空间变异主要发生在较小尺度上,其中,不同侵蚀阶段地表糙度的复杂性表现为  $BR \approx ShE > SpE > RE$ ,表明在 BR 和 ShE 阶段,地表糙度的空间格局较复杂,而在 SpE 和 RE 阶段,地表糙度的空间格局相对简单,结构性较好。

(3) 从空间分布特征来看,BR、ShE 阶段地表糙度的空间分布较复杂,在图中呈现明显的斑块状分布,且差异明显;SpE 阶段地表糙度的空间分布较简单,RE 阶段糙度的空间分布最简单,呈现出较明显的连续分布状况。这正好和分形维数分析所得的结果相吻合。表明 SpE、ShE 和 RE 对地表糙度变化的影响不同,ShE 阶段对地表糙度变化的影响最大。

地表糙度受人为耕作管理措施<sup>[10]</sup>、降雨<sup>[26]</sup>、雨强和坡度<sup>[27]</sup>等多种因素的影响,本文仅对固定坡度( $20^\circ$ )、雨强(60 mm/h)及耕作管理措施(人工锄耕)坡面地表糙度的空间异质性进行了研究,对于不同坡度、雨强及耕作措施条件下地表糙度的空间异质性还有待深入系统地研究,另外,本文对于分段降雨中各侵蚀阶段的界定主要依据个人的主观判断,存在一定的不科学性,在以后的研究中应寻求一种较为客观的判定方法。另外,从地表糙度的空间结构特征和空间分布特征得出,SpE、ShE 和 RE 对地表糙度变化的影响不同,ShE 阶段对地表糙度变化的影响最大,但不同水蚀过程对地表糙度变化的影响程度如何,如何度量,本文对这一问题的研究还不够深入,在以后的研究中应努力解决这一问题。

### 参考文献:

- [1] 郑子成,何淑勤,吴发启.坡面水蚀过程中地表糙度的研究进展[J].节水灌溉,2008(8):8-12.
- [2] Burwell R E, Larson W E. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(3): 449-452.
- [3] 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.
- [4] Takken I, Govers G, Jetten V, et al. Effects of tillage on runoff and erosion patterns[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 61(1): 55-60.
- [5] Martin Y, Valeo C, Tait M. Centimetre-scale digital representations of terrain and impacts on depression storage and runoff[J]. Catena, 2008, 75(2): 223-233.
- [6] 苏松锦,刘金福,何中声,等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [7] 赵安玖,胡庭兴,陈小红. 森林类型对土壤表层有机碳空间异质性的影响[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1748-1756.
- [8] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.
- [9] 赵龙山,宋向阳,张青峰,等. 黄土坡耕地地表微地形空间变异性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 146-150.
- [10] 高树静,赵龙山,梁心蓝,等. 人工降雨条件下坡耕地地表糙度的时空变异分布研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 12-16.
- [11] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [12] 赵军,张久明,孟凯,等. 地统计学及在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用:以海伦市为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 53-57.
- [13] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.
- [14] 张莉,张青峰,郑子成,等. 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 7-11.
- [15] 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 317-322.
- [16] Si J H, Feng Q, Yu T, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Ejina oasis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(12): 2600-2606.

0.966 和 0.877。模型有助于定量评价崩积体坡面土壤侵蚀的影响因子,为崩积体治理的施工设计提供科学理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. 山地学报, 2003, 1(6): 675-680.
- [2] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 49-54.
- [3] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 86-89, 229.
- [4] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient [J]. Catena, 2000, 38(3): 211-222.
- [5] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145-153.
- [6] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
- [7] Fu S, Liu B, Liu H, et al. The effect of slope on interrill

erosion at short slopes[J]. Catena, 2011, 84(1): 29-34.

- [8] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. part I: A discussion of principles[J]. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [9] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神东煤田原地地面侵蚀产沙规律野外降雨试验[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2): 195-201.
- [10] 于国强, 李占斌, 李霞, 等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [11] 罗斌, 陈强, 黄少强. 南方花岗岩地区坡面侵蚀临界坡度探讨[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 67-70.
- [12] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [13] 田凯, 姚文艺, 李小青. 坡面沟道水力侵蚀及黄土坡沟耦合系统径流输沙能力试验研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [14] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 刘力. 紫色土和黄土坡耕地土壤侵蚀过程对比研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

(上接第 10 页)

- [17] 李小昱, 雷延武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及分形特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 61-65.
- [18] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1455-1458.
- [19] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 53-56.
- [20] Vieira, S R Hatfield J L, Nielsen D R. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties[J]. Hilgardia, 1982, 51(3): 74-75.
- [21] 陈玉福, 于飞海, 董鸣. 毛乌素沙地沙生半灌木群落的空间异质性[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 568-572.
- [22] 王存国, 韩士杰, 张军辉, 等. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计分析[J]. 应用生态学

报, 2010, 21(4): 849-855.

- [23] 刘春利, 胡伟, 贾宏福, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1211-1219.
- [24] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [25] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4): 177-183.
- [26] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨对地表糙度影响的研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 151-154.
- [27] 张霞, 贾莲莲, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下地表糙度动态变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 16-20.