

# 基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究\*

张青峰, 王健, 赵龙山, 宋向阳, 梁心蓝

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100;

2. 中科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 杨凌 712100;

3. 农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室 杨凌 712100)

**提 要:** 黄土人工锄耕坡面微地形是地表径流和土壤侵蚀过程的重要影响因素。文中在 1.0 mm/min 雨强的人工模拟降雨试验条件下, 采用微地形激光扫描测量方法获取 5° 人工锄耕坡面微地形相对高程, 并进行拟合模型参数验证, 进而构建了能反映真实地表情况的高精度 M-DEM, 并在 ArcGIS 中对其特征参量进行量化研究。结果表明: 黄土人工锄耕坡面微地形起伏较小, 整体属于凸形斜坡; 虽在某些区域容易形成地表径流, 但径流变化比较平缓, 不容易形成较大的水流; 微地形水系分维能较好地反映复杂微地形特征。论文可为在微地形层面进一步揭示黄土耕作坡面土壤侵蚀机理研究提供数据支持和方法参考。

**关键词:** 土壤侵蚀; M-DEM; 微地形; 耕作措施; ArcGIS

**中图分类号:** S157.1; P931

**文献标识码:** A

自上世纪 40 年代土壤侵蚀的概念被提出以来, 各国科学家所开展的对其形成的影响因素、测量方法及其与坡面水文过程的关系<sup>[1-4]</sup>等方面开展了深入研究, 但由于受到设备和技术等限制, 多集中在定性描述层面, 而对其定量化数值描述的研究甚少<sup>[5-6]</sup>。

从地理学的角度来看, 地形是指地球表面高低不同的起伏形态, 如平原、盆地、丘陵、高原、河谷等的总称, 此类地形地貌也被称之为大地形。相对于大地形而言, 微地形是指较小面积范围内, 地表相对高程变化不大(通常不超过 5~25cm)的一种起伏地表。它可简化为水平、斜坡和凹凸不平三种地形形态, 其所对应的一排探测点高程值在 XZ 面中可拟合为水平直线、斜线和曲线三种二维几何特征模式<sup>[7]</sup>。微地形作为反映地表起伏变化与侵蚀程度的指标, 会伴随着侵蚀过程的发生与演变, 通过自身的位置变化与消长影响着径流的产生、流向、汇流和径流量, 进而影响侵蚀类型的演变及侵蚀产沙量的大小。但由于受土壤表面条件的复杂性、影响因素间的相互作用以及进行理论分析、实际观测和室内试验存在诸多困难, 且受到以往计算机计算能力的限制, 以及降雨过程和坡面微地形参数选取的局限性<sup>[8]</sup>, 使得有关微地形与土壤侵蚀关系的研究资料较少, 特别是缺乏对微地形较为理想的描述与模拟, 限制了对土壤侵蚀过程的模拟<sup>[9]</sup>, 严重地影响了人们对水蚀形成与演化的认识。

黄土耕作坡面微地形由于人为管理所造成高低起伏的地形特征, 既是坡面侵蚀的直接结果, 又是导致坡面侵蚀进一步发展的主要原因。它是一个能够反映坡面侵蚀动力学各要素及其相互作用的综合因素<sup>[10-11]</sup>。通过必要的指标将其量化, 并对其与坡面侵蚀参量之间的关系进行分析, 将有助于了解坡面侵蚀过程, 并对构建坡面侵蚀模型提供数据支持。在黄土高原长期的耕作实践中, 形成的传统耕作措施主要包括人工锄耕、人工掏挖、等高耕作等。其中, 人工锄耕是指沿地表从坡底逐渐向坡顶锄耕, 深度 4~5 cm, 并形成凹凸相间的小丘和洼地。耕作形成的垄台和坑洼在空间不具有对称性。文中在人工模拟降雨试验和微地形激光扫描测量的基础上, 通过黄土人工锄耕坡面微地形特征参量的量化研究, 以期为进一步揭示黄土耕作坡面微地形土壤侵蚀机理研究提供数据支持。

## 1 实验设计与方法

### 1.1 实验设计

\* 收稿日期: 2011-9-7。

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2011JM5007); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(10501-283)资助。

作者简介: 张青峰(1974-), 男, 山西孝义人, 副教授, 主要从事土地资源与空间信息技术方面的研究。Email: zhqf@nwsuaf.edu.cn

实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 16m,可以满足所有的雨滴达到终点速度。试验用土槽规格为 2.0m × 1.0m × 0.5m,坡度可在 0° ~ 30° 调节。

选择陕西省杨凌区坡耕地表层土(0 ~ 20cm)为实验用土,杨凌区位于黄土高原南缘,东经 108.72°,北纬 34.36°,属于温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量约 637.6mm,土壤为壤土,灰棕色,土体较疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主。土样采集并风干后过筛( $\phi = 0.5\text{cm}$ ),填装在侵蚀槽中(2.0 × 1.0 × 0.5m,土壤容重 1.30g/cm<sup>3</sup>,含水率 10% 左右)。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。实验雨强为 1.0mm/min,坡度为 5°,分别设置 3 个重复。

### 1.2 M - DEM 的建立

用激光测距仪<sup>[12]</sup>(徕卡,垂直误差小于 3mm)测量坡面高程信息,每个坡面在降雨前后各测 1 次,均可获得 3480 个高程点,每个点代表实际地面 2cm × 2cm 的范围,这些点为坡面微地形数字高程模型(M - DEM)的构建与应用提供了有力保证。M - DEM 是一种对地表微地形空间起伏变化的连续表示方法,能细致地反映微地形的起伏变化与破碎状况,且高精度的 M - DEM 已成为区域土壤侵蚀研究的重要数据<sup>[6]</sup>,其建立过程(图 1)。

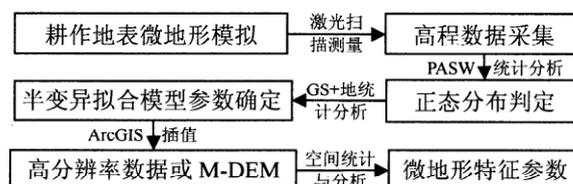


图 1 微地形高程数据获取与表达流程图  
Fig. 1 Flow chart of data collection and represent of M - DEM

## 2 结果与分析

### 2.1 半变异拟合模型参数确定

对激光扫描测量得到的人工锄耕(AB)耕作坡面微地形相对高程数据在 PASW 软件中采用单样本 K - S(柯尔莫哥洛夫 - 斯摩洛夫)法在  $\alpha = 0.05$  显著水平上进行正态分布特征值分析和检验,结果表明 AB 耕作坡面微地形相对高程分布符合正态分布特征,故可采用地统计学方法分析其相对高程空间变异性<sup>[13]</sup>。

借助 GS + 软件,通过半变异函数拟合曲线模型<sup>[14]</sup>来描述微地形相对高程的空间变异函数关系。同时,对所选定的 Spherical 模型参数进行交叉检验(表 1)。

表 1 1.0 mm/min 雨强下黄土人工锄耕坡面微地形相对高程半变异函数拟合参数与交叉检验

Tab. 1 AB slope parameters with its validation of the fitting semivariogram model in condition of 1.0 mm/min rainfall intensity

耕作坡面	判定系数 R <sup>2</sup>	基底效应 C/(C <sub>0</sub> + C) /%	块金值 (C <sub>0</sub> )	基台值 (C <sub>0</sub> + C)	变程 (A) /m	拟合曲线 模型	相关系数 r
人工锄耕 AB	0.95	80.7	0.000067	0.000347	1.843	Spherical	0.95

由表 1 可知,基底效应  $C/(C_0 + C) > 75\%$  表明相对高程值之间具有强烈的空间相关性<sup>[15]</sup>;拟合曲线模型的相关系数  $r \geq 0.5$ ,说明球形拟合曲线模型(Spherical)的高度相关性<sup>[16]</sup>,该模型能很好地反映 AB 微地形的空间变异特征。故可将上述特征参数在 ArcGIS 中进行空间插值,以生成高精度微地形数字高程模型(M - DEM)(分辨率为 1:100)。插值结果(图 2),拟合模型很好地模拟了人工锄耕的实际情况。

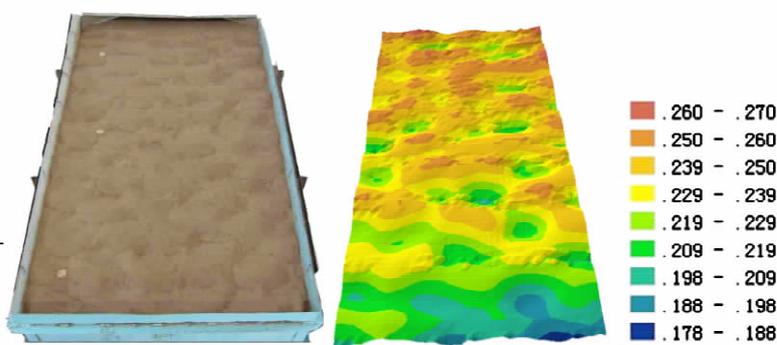


图 2 AB 坡面 Kriging 插值结果

Fig. 2 Kriging interpolation of AB slope

### 2.2 地形因子信息提取与分析

根据坡面因子所描述的空间区域范围,可将坡面地形因子划分为宏观坡面因子<sup>[17-20]</sup>和微观坡面因子<sup>[18-21]</sup>两种基本类型。

宏观因子包括相对高程、高程标准差、高程变异系数、地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、坡形、河网密度、畦洼汇水面积等,其描述的是一定区域内的地形特征。宏观坡面地形因子的提取是以 M-DEM 格网数据的空间矢量模型为基础,通过移动分析窗口的方法完成<sup>[22]</sup>。文中根据实验确定采用矩形 3×3 分析窗口,格网大小为 0.02m。

微观因子包括微坡度、微坡向、坡长、坡度变率、坡向变率、剖面曲率、表面曲率、地形指数、分形维数、流域形状系数等,其反映的是微观地表单元具体点位的形态、起伏或扭曲特征。微观坡面地形因子的提取是在 M-DEM 格网数据的基础上,通过空间向量的差分运算完成<sup>[17]</sup>。

黄土人工锄耕坡面微地形因子的提取在 ArcGIS 中进行,微地形因子统计分析(表 2)。

表 2 黄土人工锄耕坡面微地形因子统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of AB micro-topography loess slope

地形因子	最小值	最大值	平均值	Std dev.	地形因子	最小值	最大值	平均值	Std dev.
相对高程	0.178	0.270	0.236	0.015	微坡度	0.000	43.894	11.679	5.945
高程变异系数	0.002	0.069	0.017	0.008	微坡向	-1.000	360.000	183.060	98.350
地形起伏度	-0.010	0.010	0.001	0.005	坡度变率	66.918	89.929	89.444	0.932
地表粗糙度	1.000	1.388	1.027	0.030	坡向变率	85.887	89.989	89.923	0.143
地表切割深度	-0.009	0.012	0.001	0.004	平面曲率	85.888	89.994	89.932	0.140
坡形	-16336.955	11294.756	1.33E-06	2522.116	地面曲率	-22.842	-3.773	-0.488	0.936
汇流累积量	0.000	681.000	14.902	60.951	水流方向	1.000	198.000	26.501	36.560
水流(顺流)长度	0.000	1.099	0.353	0.247	无洼地水流方向	1.000	128.000	22.243	31.581
水流(逆流)长度	0.000	1.099	0.064	0.115	地形指数	-3.781	5.312	-0.839	1.582
河网 strahler 分级	1.000	3.000	1.500	0.645	流域长度	0.010	0.431	0.099	0.088
河网 shreve 分级	1.000	5.000	1.793	1.188	流域面积	0.001	0.086	0.024	0.017
河网密度	10.009	98.921	48.644	15.334					
畦洼汇水面积	0.000	0.272	0.006	0.024					

由表 2 可知,黄土人工锄耕坡面微地形平均高程值为 23.6mm,且相对高程变异较小,地形起伏也较小;坡形平均值 > 0,说明该微地形属于凸形斜坡;汇流累积量变异较大,说明此种微地形在某些区域容易形成地表径流;水流长度总计约为 11.04m,河网密度相对较大,说明该微地形水系较为发育且河流较为密集。

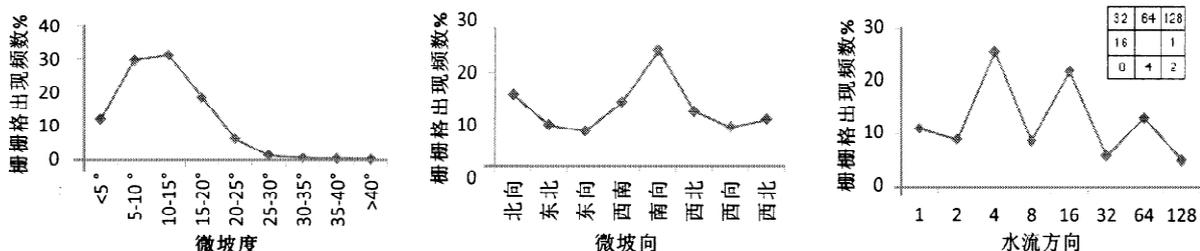


图 3 黄土 AB 坡面坡谱曲线  
Fig. 3 Spectrum curve of AB loess slope

由黄土 AB 坡面坡谱曲线(图 3)可知,AB 坡面微坡度主要以集中在 10-15°,且随着微坡度的增加,栅格所占面积逐步减小;微坡向主要以南向(157.5°-202.5°)为主;栅格尺度上的水流方向多向左侧和上方流动,但总体向下流动。

流域形状系数  $K_e$  是流域分水线的实际长度与流域同面积圆的周长之比。据计算,AB 微地形形状系数为 0.037,说明该微地形流域形状较为狭长,径流变化比较平缓,不容易形成较大的水流。

分形维数<sup>[23]</sup>是衡量一个几何集或自然物体不规则和破碎程度的数量化指标,用来刻画河网水系复杂、无规则的本质特征。AB 微地形分形维数计算结果(图 4),分形维数为 1.060,表明文中所计算的微地形水系分维能较好地反映复杂微地形特征。

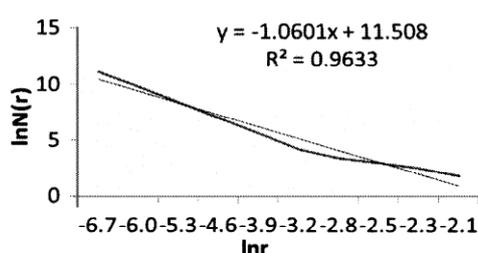


图 4 AB 微地形分形维数  
Fig. 4 Fractal dimension of AB micro-topography

### 3 讨论与结论

在水蚀过程中,作为反映地表起伏变化与侵蚀程度的微地形,会伴随着水蚀的发生与演变,通过自身空间各点相对高程的变化与消长影响着径流的产生、流向、汇流和径流量,进而影响侵蚀类型的演变及侵蚀产沙量的大小。它是一个能够反映坡面侵蚀动力学各要素及其相互作用的综合因素,通过必要的指标将其量化,并对其与坡面侵蚀的其他参量之间的关系进行分析,将有助于了解坡面侵蚀发生发展过程,并对构建反映坡面各类侵蚀形态转化关系的预测模型提供数据支持,因此,微地形土壤侵蚀的定量化数值描述研究逐渐成为学科研究的热点和前沿。在以往的研究中,由于微地形分布的随机性和复杂性,且受到传统的测针、链条法等测量设备精确性、既得数据的不连续性和精度等问题的限制,目前还未能真实准确地反映微地形特征,进一步影响了微地形指标对土壤侵蚀研究的贡献。采用微地形激光扫描测量方法,获取5°人工锄耕黄土坡面微地形相对高程,通过正态分布判定及半变异拟合模型参数的验证,表明用半变异拟合模型能很好地反映人工锄耕坡面的实际情况,进而构建了高精度M-DEM。在此基础上,对该微地形特征参量进行了分类研究,进一步说明了人工锄耕微地形与地表径流的关系,且微地形水系分维能较好地反映复杂的微地形特征。由此可知,文中的研究成果可为微地形层面上,构建黄土耕作坡面微地形模型提供方法参考,并为定量化研究土壤侵蚀机理提供较高精度的数据支持。

黄土耕作坡面微地形是理解由水力引起的土壤侵蚀机理的一个重要参数,文中仅对人工锄耕坡面微地形特征进行了研究,而如何将其提出的方法在其它耕作坡面进行应用,进而构建黄土微地形土壤侵蚀模型,系统地揭示微地形与坡面水蚀的关系,将有待于今后深入探讨与研究。

#### 参考文献

- [1] Allmaras R R, Nelson W W, Hallauer E A. Fall versus spring plowing and related soil heat balance in the western corn belt[J]. Minnesota Agricultural Experiment Station Technical Bulletin, 1972, 283: 22.
- [2] Huang C H, White I, Thwaite E G et al. A non-contact laser system for measuring soil surface topography[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1989, 52(3): 350-355.
- [3] 沈冰, 李怀恩, 沈晋. 坡面降雨漫流过程中有效糙度的实验研究[J]. 水利学报, 1994, 25(10): 61-68.
- [4] 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.
- [5] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 415-421.
- [6] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面水蚀动力与侵蚀产沙临界关系试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3): 435-441.
- [7] 罗柏文, 卜英勇, 杨勃. 基于二维几何特征的微地形快速识别算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3320-3326.
- [8] David Favis - Mortlock. A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes[J]. Geocomputation, 1998, 24(4): 353-372.
- [9] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230-235.
- [10] 薛海, 孔纯胜, 熊秋晓, 等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 90-92.
- [11] 闫业超, 张树文, 岳书平. 东北黑土区土壤侵蚀模拟中的地形因子尺度分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 180-184.
- [12] 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.
- [13] Playan E, Faci J M, Serreta A. Modeling microtopography in basin irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1996, 122(6): 339-346.
- [14] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 沙地退化植被恢复过程中植被的空间异质性[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1513-1518.
- [15] 白美健, 许迪, 李益农, 等. 畦面微地形空间变异性分析[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 813-819.
- [16] Playan E, Faci J M, Serreta A. Modeling microtopography in basin irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1996, 122(6): 339-346.
- [17] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] 潘少奇, 田丰. 三维激光扫描提取DEM的地形及流域特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 102-105.
- [19] 王博, 张培松, 罗微. 基于DEM的阳江农场地形特征信息提取与分析[J]. 西南农业学报, 2010, 23(3): 796-800.
- [20] 殷昊, 胡伏生, 隋松宇, 等. 基于统计和数值模拟的黄土滑坡地形因子敏感性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 138-144.
- [21] 原立峰, 李发源, 张海涛. 基于栅格DEM的地形特征提取与分析[J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 86-88.
- [22] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 欧阳晓, 赵牡丹, 秦慧杰. 基于ArcGIS的DEM水系盒维数的计算[J]. 地下水, 2010, 32(6): 184-185.

## M - DEM - based micro - topography characteristics of artificial tillage loess slope

ZHANG Qingfeng , WANG Jian , ZHAO Longshan , SONG Xiangyang , LIANG Xinlan

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

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau of China , Institute of Soil and Water Conservation , CAS & MWR , Yangling 712100 , P. R. China;

3. Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China , Yangling 712100 , P. R. China)

**Abstract:** Artificial backhoe ( AB ) cultivated loess slope micro - topography is an important indicator to reflect the surface runoff and soil erosion. In this paper , 1.0 mm / min rainfall intensity was selected for the artificial rainfall experiment; The laser scanning technique was adopted to collect surface relative elevation data. Simultaneously , the parameters of fitted simivariogram model were validated , and M - DEM was constructed. Then characteristics factors of artificial backhoe surface with the slope of 5° were conducted. The results showed that: AB micro - topographic slope is belonging to a " convex - type " slope with slight fluctuations of relative elevation. Also , it was easy to form surface runoff in some specific areas , but the runoff of AB slope was relatively flat , and hard to form larger flow. The fractal dimension of flow system could better reflect the complex character of micro - topography. In conclusion , this work has established a novel methodological framework and data support for revealing the erosion mechanism about loess tillage slope at micro - topographic level.

**Key words:** soil erosion; M - DEM; micro - topography; tillage measure; ArcGIS