网络出版时间:2015-04-13 12:59 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.027 网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.027.html

# 坡面微地形 DEM 最佳分辨率的选择方法

任 磊,李光录,杨晨辉,魏 舟,杨 娟

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究坡面微地形 DEM 最佳分辨率的选择方法。【方法】以 2 种不同复杂程度的坡面微地形 (微地形简单的裸坡小区、微地形复杂的翻耕小区)DEM 作为研究对象,分析不同微地形 DEM 分辨率下坡度中误差 (m<sub>s</sub>)、地表糙度(C<sub>r</sub>)和微地形 DEM 生成时间 3 个参数的变化,从而确定坡面微地形 DEM 的最佳分辨率。【结果】采 用坡度中误差法可以快速缩小分辨率的选择范围,增强了后续研究的目的性;随着分辨率的变化,2 种微地形 DEM 地 表糙度的变化趋势相似,并与分辨率呈幂函数关系;综合考量地表糙度和 DEM 生成时间,可以确定 2 种微地形 DEM 的最佳分辨率,且在源数据相同的情况下,最佳分辨率与微地形复杂程度并不相关。【结论】裸坡小区和翻耕小区 DEM 的最佳分辨率均为 4 mm,运用所建立方法选择微地形 DEM 的最佳分辨率是可行的。

[关键词] 微地形;DEM;最佳分辨率;坡度中误差;地表糙度 [中图分类号] P208;S159-3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2015)05-0129-06

# Selection method for optimum DEM resolution of slope micro-relief

REN Lei, LI Guang-lu, YANG Chen-hui, WEI Zhou, YANG Juan

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

Abstract: [Objective] This research aimed to find out the selection method for optimum DEM resolution of micro-relief. [Method] Slope micro-relief with two different complexities (the bared plot with low complexity and the ploughed plot with high complexity) were selected to analyze the changes in three quantitative parameters including slope root-mean-square error  $(m_s)$ , soil roughness  $(C_r)$  and time of generating the micro-relief DEM at different micro-relief DEM resolutions and select the optimum DEM resolution. [Result]  $m_s$  could quickly reduce the selection range of resolution and enhance the purpose of follow-up study. The trends of  $C_r$  of two micro-reliefs DEM were similar as the change of resolution with power function relationship. The optimum resolutions of 2 micro-reliefs DEM could be selected by analyzing  $C_r$  and time of generating DEM. There was no relationship between the optimum resolution and micro-relief complexity with same original data. [Conclusion] The optimum resolution of bared plot and ploughed plot was 4 mm. The selection method established in this study was feasible for selecting the optimum DEM resolution of micro-relief.

Key words: Micro-relief; DEM; optimum resolution; RMSE slope; surface roughness

DEM(Digital Elevation Model)的水平分辨率 (Horizontal Resolution)直接影响着 DEM 对地形

表面起伏的描述精度,体现着 DEM 所包含的信息 量,同时也是确定地形参数和应用尺度的重要指

[收稿日期] 2013-12-15

[作者简介] 任 磊(1987-),男,山东莱州人,硕士,主要从事地图学与地理信息系统研究。E-mail:rl2215233@gmail.com

E-mail:guangluli@nwsuaf.edu.cn

<sup>[</sup>基金项目] 陕西省水土保持局重点科技示范项目(20101003)

<sup>〔</sup>通信作者〕 李光录(1964-),男,甘肃永靖人,副教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与土地利用研究。

标<sup>[1-2]</sup>。研究表明,虽然高分辨率 DEM 对真实地表 的描述准确程度较高,但是会明显增加数据计算量, 而低分辨率 DEM 对地表的描述程度又不能满足应 用需求[3]。因此,选择既能最大限度地模拟真实地 面起伏,又能避免数据冗余的 DEM 分辨率成为 DEM 地形分析的前提。许多学者对 DEM 最佳分 辨率的确定进行了研究,一般归纳为3类方法:(1) 基于 DEM 精度分析,即通过计算 DEM 误差,评价 各分辨率下的 DEM 精度,从而选择出最佳的 DEM 分辨率。最常用的是 Hutchinson<sup>[4]</sup> 提出的信息含 量分析法,即以较大分辨率建立 DEM,并计算该 DEM 的坡度均方差,然后将分辨率逐步对半递减, 每递减一次,计算一次 DEM 坡度均方差,坡度均方 差变化平缓时的分辨率即为最佳分辨率。汤国安 等<sup>[5]</sup>提出了 DEM 地形描述误差的概念,在不考虑 DEM 数据采样误差的基础上,建立了地形描述误 差、DEM水平分辨率与地形起伏度之间的回归方 程,为确定 DEM 分辨率提供了依据。刘学军等<sup>[6]</sup> 分析了 DEM 分辨率对坡度计算精度的影响,在忽 略 DEM 离散模型地面描述误差的情况下,得到了 DEM 分辨率的计算公式。(2)基于 DEM 各地形因 子统计数据随 DEM 分辨率的变化趋势,选取统计 数据趋于稳定时的分辨率作为最佳分辨率。何政伟 等[7]通过计算地形粗糙度和剖面线长度 2 个定量指 标,分别点绘地形粗糙度、剖面线长度随 DEM 分辨 率的变化趋势曲线图,选定曲线出现明显拐点处所 对应的 DEM 分辨率作为最佳分辨率。杨勤科 等[8]、朱伟等[9]分别采用地形因子信息量分析法确 定 DEM 最佳分辨率。(3) 根据具体应用模型确定 最适宜某一领域的 DEM 分辨率。Thompson 等<sup>[10]</sup> 和郭澎涛等<sup>[11]</sup>探讨了 DEM 水平分辨率的改变对定 量土壤-景观模型各项参数及其预测精度的影响。 Florinsky 等<sup>[12]</sup>利用土壤湿度分布模型,分析了最 佳 DEM 分辨率的求解方法。

综合以上研究成果,现有研究主要针对的是大范围大尺度地形建立 DEM,而针对微地形尺度的 DEM 最佳分辨率的确定,目前尚无明确的研究方法。相对于宏观地形,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 5~25 cm)的 一种起伏地表<sup>[13]</sup>。微地形是描述较小范围内地表 起伏状态的重要指标,也是研究地表径流和土壤侵 蚀过程的重要影响因子<sup>[14]</sup>。地表糙度是研究微地 形的一个主要物理性状指标,其是由于人类活动或 其他因素而导致的地表高低起伏、凹凸不平的现象, 反映了地表的微地貌形态,是影响地表水文学和水 力学特性的一个重要特征值,对土壤侵蚀预报、变 化监测的研究有重要作用<sup>[15]</sup>。就水力侵蚀而言,对 微地形的描述即是对地表糙度空间分布的测定<sup>[16]</sup>。 微地形 DEM 是研究微地形的基础数据,具有范围 小、精度高的特点,分辨率通常能达到厘米级甚至毫 米级,分辨率的极小改变都会引起微地形地表糙度 的剧烈变化。因此,确定微地形 DEM 最佳分辨率 时,既要保证数字地面模型的描述精度,又要兼顾地 表糙度这一微地形重要特征指标的准确度。

本研究在总结宏观尺度 DEM 分辨率确定方法的基础上,结合地表糙度分析不同分辨率 DEM 对 坡度中误差、地表糙度以及微地形 DEM 生成时间 的影响,确定微地形 DEM 的最佳分辨率,旨在为微 地形 DEM 建立过程中分辨率的选择提供参考。

### 1 试验数据与研究方法

### 1.1 研究区概况

选取陕西杨凌北部的一处裸露坡面作为试验样 区,该区平均坡度15°,地理坐标为108°04′25″E、 34°18′40″N,试验样区地处黄土高原南缘,属于暖 温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量约637.6 mm;土壤为搂土,灰棕色,土体较疏松,呈粒状或团 块状结构,土壤颗粒以粉沙为主。沿坡向建立简易 径流小区,长2m,宽1m。小区内微地形采用2种 方式处理:一种是天然裸坡,模拟简单微地形,以下 简称为裸坡小区;一种模拟翻耕耕作方式,翻耕深度 为20 cm,模拟复杂微地形,以下简称为翻耕小区。

#### 1.2 数据采集与处理

坡面高程数据采集选用地面三维激光扫描技术,所采用的仪器为拓普康GLS-1500,坡面测量时设定扫描间距2mm,得到整个坡面点云数据。由于实际测量点云中存在大量的粗差点,因此需利用仪器配套数据处理软件TopconScanMaster对点云数据进行粗差点的剔除和过滤,并导出成文本文件格式,方便导入GIS软件进行下一步的处理。利用ArcGIS10.0软件对点云数据进行整体插值(采用TopotoRaster法),生成坡面微地形DEM,然后裁 剪出2种不同微地形径流小区的DEM(图1),为了 消除小区挡板对三维激光扫描数据的影响,实际研究小区面积为1.5m×0.8m。





Fig. 1 Photos and DEMs of micro-reliefs with different complexities (Resolution=1 mm)

#### 1.3 研究指标及计算方法

1.3.1 坡度中误差 坡度中误差(*m<sub>s</sub>*)的一般表达 式为<sup>[17]</sup>:

$$m_{\rm S} = \sqrt{a^2 g^2 M^2 + b^2 g^{-2} m^2} \cos^2 S_{\circ} \qquad (1)$$

式中: $m_s$ 为坡度中误差;M为地形描述误差,是由于 DEM 模型离散采样所造成的误差;m为 DEM 源数据采集误差,是 DEM 源数据采集获取过程中产生的误差;g为 DEM 分辨率;S为平均坡度;a、b分别为M和m的系数。

本研究暂不考虑 DEM 源数据采集误差 m,只 研究地形描述误差 M,即用 DEM 描述真实地面起 伏的精度,可以由地形描述误差 m 和 DEM 分辨率 g 求得坡度中误差 ms,具体计算公式为:

$$m_{\rm S} = a \times g \times M \times \cos^2 S_{\circ} \tag{2}$$

式中:系数 a=1/6。

图 2 显示, $H_1$ , $H_2$ , $H_3$ ,…, $H_n$ 为由地面三维激 光扫描仪获取的实际地面点高程, $h_1$ , $h_2$ , $h_3$ ,…, $h_n$ 为 DEM 模拟地面与实际地面对应点的高程,这两 者的差值为  $M_1$ , $M_2$ , $M_3$ ,…, $M_n$ ,由此即可确定地形 描述误差 M。具体计算公式为:

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (H_i - h_i)^2} \,. \tag{3}$$

式中:n为样点个数。



图 2 地形描述误差分布示意图 Fig. 2 Distribution diagram of *M* 

1.3.2 地表糙度 链条法<sup>[18]</sup>是量测地表糙度的常 用简单方法之一,该方法认为当给定长度的链条置 于地表时,其水平长度随着地表糙度的增加而减小, 通过计算链条长度的减小值,可得出衡量地表粗糙 程度的参数即地表糙度(*C<sub>r</sub>*)。*C<sub>r</sub>* 的计算公式为:

 $C_r = (1 - L_2/L_1) \times 100$ 。 (4) 式中: $C_r$ 为地表糙度; $L_1$ 、 $L_2$ 分别为实际链条长度 和放置地面后链条的水平长度。

赵龙山等<sup>[19]</sup>结合链条法原理,利用 GIS 技术, 提出了基于微地形 DEM 的地表糙度测定方法即表 面线法。本研究对地表糙度的提取采用表面线法, 以裸坡小区微地形 DEM 为例,如图 3 所示,*L*1、*L*2、 *L*3、*L*4 是坡面微地形沿径流方向上的 4 条采样表面 线,*L*1′、*L*2′、*L*3′、*L*4′为与其对应的水平投影面上的 4 条直线,长度为固定值,利用 ArcGIS 软件"Surface Length"命令,可以得到表面线的长度,利用链 条法原理,*L*1、*L*2、*L*3、*L*4 的长度可替换上式中的 *L*1、*L*1′、*L*2′、*L*3′、*L*4′可替换上式中的*L*2,从而可以 求得 4 条采样线上的地表糙度。



#### 图 3 表面线法计算地表糙度的示意图

Fig. 3 Diagram of Cr calculation by surface curve method 1.3.3 微地形 DEM 生成时间 点云数据是大量 的离散数据,DEM 的建立是通过空间内插将这些离 散的点拟合出一个连续的曲面。实际运用中,当使 用单台计算机对高密度采集的离散点进行内插时, 分辨率大小的设置决定了插值算法的复杂性,分辨 率越高对计算机内存的消耗越大,生成 DEM 所需 时间将呈阶数增长。因此,在保证 DEM 精度的同 时,DEM 生成时间也是选择 DEM 最佳分辨率的一 个重要因素。

# 2 结果与分析

### 2.1 坡度中误差与分辨率的关系

由于 2 种不同复杂程度的微地形 DEM 的源数 据相同,因此坡度中误差的计算针对整个原始点云 数据,采用随机点采样法,在 ArcGIS 软件中利用 "Create Random Points"命令,随机从点云数据中选 择 300 个采样点,然后运行"Add Surface Information"命令,可以得到各点在微地形 DEM 模拟地面 上的点高程。代入公式(2)和(3)进行计算,即可得 到不同分辨率 DEM 的坡度中误差(*m*<sub>s</sub>)值,并以 DEM 分辨率为横轴,*m*<sub>s</sub> 为纵轴,绘制出二者的变化 趋势如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着 DEM 分辨率的减小(即 DEM 栅格尺寸的减小),坡度中误差(m<sub>s</sub>)随之减 小,说明 DEM 对微地形的描述精度有所上升。当 分辨率为 256~16 mm 时,其 m<sub>s</sub> 值较大,对微地形 模拟的准确程度较低;当分辨率为 16~1 mm 时,m<sub>s</sub> 值逐渐趋于稳定,说明此区间内 DEM 模拟的微地 形已经基本接近于实际地形,但由于此分辨率区间 跨度较大,尚无法确定最佳分辨率,故还需借助地表 糙度进一步确定,但是此方法可以快速确定最佳分 辨率的选择区间,避免了选择上的盲目性,很大程度 上减少了工作量。





#### 2.2 地表糙度与分辨率的关系

通过坡度中误差(m<sub>s</sub>)分析,得到了最佳分辨率 选择区间为1~16 mm,因此在进行地表糙度与分 辨率关系分析时,只需在此分辨率区间内进行即可。 在2种微地形的 DEM 上各自布设4 条表面采样 线,利用基于 GIS 技术的表面线法,提取出 L<sub>1</sub>和 L<sub>2</sub> 指标,代入公式(4)计算各表面线上的地表糙度,结 果如表1 所示。

表 1 不同分辨率下 2 种微地形 DEM 的地表糙度

Table 1	Statistics	of	$C_r$	of	2	micro-reliefs	at	different	resolutions
---------	------------	----	-------	----	---	---------------	----	-----------	-------------

微地形小区种类	采样线	分辨率/mm Resolution								
Micro-relief plot	Sampling line	1	2	3	4	5	6	7	8	
	L1	12.29	9.69	7.78	6.98	6.54	6.26	5.87	5.74	
裸坡小区	L2	11.82	9.78	8.63	7.60	7.03	6.72	6.43	6.28	
Bared plot	L3	19.73	14.30	10.93	8.92	8.29	7.72	7.03	6.81	
	L4	10.10	9.05	7.71	7.33	6.61	6.19	5.97	5.84	
	L1	36.24	29.00	25.25	22.48	17.15	15.40	14.21	13.26	
翻耕小区	L2	31.49	27.55	25.19	22.42	19.98	18.19	17.23	16.17	
Ploughed plot	L3	26.22	21.82	19.39	16.70	15.27	13.17	12.95	12.90	
	L4	25.38	18.44	17.23	14.23	13.18	12.60	12.06	12.32	
微地形小区种类	炎 采样线	分辨率/mm Resolution								
Micro-relief plot	Sampling line	9	10	11	12	13	14	15	16	
	L1	5.66	5.57	5.54	5.50	5.45	5.46	5.51	5.42	
裸坡小区 Bared plot	L2	6.14	6.06	5.97	5.89	5.89	5.82	5.79	5.78	
	L3	6.66	6.51	6.34	6.22	6.13	6.10	6.04	5.99	
	L4	5.66	5.63	5.56	5.45	5.43	5.37	5.31	5.29	
	L1	12.59	11.82	11.34	11.19	10.92	10.67	10.33	10.13	
翻耕小区	L2	15.20	14.13	13.56	13.32	12.87	12.04	11.60	11.27	
Ploughed plot	L3	12.18	12.11	11.72	11.45	11.28	10.99	10.84	10.65	
	L4	11.45	11.72	11.07	10.85	10.49	10.48	10.38	10.02	

利用表1数据,绘制出不同分辨率(1~16 mm)

时的地表糙度散点图,通过回归分析,可得到不同分

辨率时地表糙度(C<sub>r</sub>)的变化趋势如图 5 所示。



图 5 不同分辨率下地表糙度的变化趋势

Fig. 5 Changing trend of  $C_r$  along with the resolution at different resolutions

从图 5 可以看出,代表简单微地形的裸坡小区 与代表复杂微地形的翻耕小区 DEM 的地表糙度变 化趋势相似,均与分辨率呈幂函数关系。在裸坡小 区,当分辨率为 16~6 mm 时,地表糙度值变化平 稳,证明在此分辨率范围内,DEM 对裸坡小区微地 形的描述精度基本相同;当分辨率为 6~1 mm 时, 随着分辨率的减小,地表糙度逐渐增大,且变化比较 明显,说明在此分辨率范围内,DEM 对裸坡小区微 地形的描述精度随分辨率的减小而增加。在翻耕小 区,当分辨率为 16~10 mm 时,地表糙度值变化比 较平稳,证明在此分辨率范围内,DEM 对裸坡小区 微地形的描述精度基本相同;当分辨率为 10~1 mm 时,随着分辨率的减小地表糙度逐渐增大,且变 化比较明显,说明此分辨率范围内,DEM 对裸坡小 区微地形的描述精度随分辨率的减小而增加。通过 以上分析可知,为了达到较高的微地形描述精度,应 从地表糙度较大时的分辨率范围内选择最佳分辨 率,进一步缩小最佳分辨率的选择区间,其中裸坡小 区 DEM 分辨率的选择区间为 1~6 mm,翻耕小区 DEM 分辨率的选择区间为 1~10 mm。

2.3 不同分辨率下微地形 DEM 的生成时间

本试验采用单台计算机环境对点云数据进行插 值生成微地形 DEM,计算机的 CPU 主频为 3.40 GHz,内存4GB;软件环境为 ArcGIS 10.0。不同分 辨率下微地形 DEM 生成时间的统计结果如表 2 所 示。

表 2 不同分辨率下微地形 DEM 生成时间的统计

	Table 2	Time of	generating	micro-relief	DEMs at	different	resolutions
--	---------	---------	------------	--------------	---------	-----------	-------------

分辨率/mm Resolution	时间/s Time	分辨率/mm Resolution	时间/s Time	分辨率/mm Resolution	时间/s Time	分辨率/mm Resolution	时间/s Time
1	400	5	183	9	176	13	175
2	270	6	180	10	176	14	176
3	230	7	176	11	176	15	175
4	192	8	175	12	175	16	174

从表 2 可以看出,当 DEM 分辨率从 16 mm 减 小到 4 mm 时, DEM 生成时间基本相同,为 174~ 192 s,当 DEM 分辨率从 4 mm 减小至 1 mm 时, DEM 生成时间明显增加,如果单独从时间消耗最小 化的角度考虑,最佳 DEM 分辨率应在 4~16 mm 区 间选择,结合 2.2 节分析得出的选择区间,即裸坡小 区 DEM 分辨率的选择区间为 1~6 mm,翻耕小区 DEM 分辨率的选择区间为 1~10 mm,经过综合对 比,选择重叠区间内地表糙度值最大时的分辨率作 为微地形 DEM 的最佳分辨率均为 4 mm,此时微地形 DEM 的地表糙度能够达到较高值,可以相对准确地 表达微地形的起伏,而且耗时较少,明显减少了数据 处理的工作量并降低了对软件和硬件条件的要求。

## 3 结 论

本研究分析了坡度中误差、地表糙度和 DEM 生成时间 3 个参数与微地形 DEM 分辨率的关系, 结果表明:

1)随着 DEM 分辨率的减小,坡度中误差逐渐 减小,当分辨率为 1~16 mm 时,坡度中误差变化较 小, DEM 模拟微地形已接近实际情况。采用坡度 中误差法虽然不能准确确定微地形 DEM 的最佳分 辨率,但可以快速缩小分辨率的选择范围,缩短大量 的数据处理过程,增强后续研究的目的性。

2)随着 DEM 分辨率的变化,裸坡小区 DEM 的 地表糙度和翻耕小区 DEM 的地表糙度变化趋势相 似,并且与分辨率呈幂函数关系。

3)综合考量地表糙度和 DEM 生成时间,确定 裸坡小区和翻耕小区 2 种微地形 DEM 的最佳分辨 率均为 4 mm,说明对于同一源数据生成的相同数 据结构的微地形 DEM,最佳分辨率与微地形复杂程 度并不相关。

本研究提出的 DEM 最佳分辨率的选择方法, 既避免了微地形 DEM 最佳分辨率确定过程的盲目 性和随意性,又能够在保证相关应用参数准确度前 提下压缩数据计算处理量,降低计算成本,节省计算 时间。

### [参考文献]

 [1] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].北京:科学 出版社,2010.

Tang G A, Li F Y, Liu X J. Digital elevation model tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)

- [2] 周启鸣,刘学军.数字地形分析 [M].北京:科学出版社,2006.
   Zhou Q M, Liu X J. Digital terrain analysis [M]. Beijing: Science Press,2006. (in Chinese)
- [3] 刘学军,王彦芳,晋 蓓,等.顾及数据特性的格网 DEM 分辨率计算[J].地理研究,2010,29(5):852-862.
  Liu X J, Wang Y F, Jin B, et al. Resolution analysis of grid digital elevation model based on data property [J]. Geographical Research,2010,29(5):852-862. (in Chinese)
- [4] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models [C]//Third International Conference/Workshop on Integrating GIS an Environmental Modeling. California: University of Calfornia, 1996;21-25.
- [5] 汤国安,龚健雅,陈正江,等.数字高程模型地形描述精度量化 模拟研究[J].测绘学报,2001,30(4):361-365.
   Tang G A,Gong J Y,Chen Z J,et al. A simulation on the accuracy of DEM terrain in representation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2001,30(4):361-365. (in Chinese)
- [6] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响 分析 [J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):1-5,39.
  Liu X J,Gong J Y,Zhou Q M, et al. Research on error of derived slope and aspect related to DEM data properties [J]. Geography and Geo-Information Science,2004,20(6):1-5,39. (in Chinese)
- [7] 何政伟,许辉熙,张东辉,等. 最佳 DEM 分辨率的确定及其验证分析 [J]. 测绘科学,2010,35(2):114-116.
   He Z W, Xu H X, Zhang D H, et al. Identifying the optimal

DEM resolutions and analyses of simulation results [J]. Science

of Surveying and Mapping, 2010, 35(2):114-116. (in Chinese)

[8] 杨勤科,张彩霞,李领涛,等.基于信息含量分析法确定 DEM 分辨率的方法研究 [J].长江科学院院报,2006,23(5):21-23, 28.

Yang Q K,Zhang C X,Li L T,et al. Optimizing DEM resolution with information content analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2006,23(5):21-23,28. (in Chinese)

- [9] 朱 伟,王东华,周晓光.基于信息熵的 DEM 最佳分辨率确定 方法研究 [J]. 遥感信息,2008(5):79-82.
   Zhu W, Wang D H, Zhou X G. The research of optimizing DEM resolution based on information entropy [J]. Remote Sensing Information,2008(5):79-82. (in Chinese)
- [10] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling [J]. Geoderma, 2001, 100: 67-89.
- [11] 郭澎涛,武 伟,刘洪斌,等.DEM 栅格分辨率对丘陵山地区 定量土壤-景观模型的影响[J].农业工程学报,2010,26(12): 330-336.

Guo P T, Wu W, Liu H B, et al. Effects of DEM grid resolution on quantitative soil-landscape model at hilly and mountain area [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 330-336. (in Chinese)

- [12] Florinsky I V, Kuyakova G A. Determination of grid size for digital terrain modeling in landscape investigations exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(8): 815-832.
- [13] 张青峰,王 健,赵龙山,等.基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面 微地形特征研究 [J].干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.

Zhang Q F, Wang J, Zhao L S, et al. M-DEM-based micro-topography characteristics of artificial tillage loess slope [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26 (9):149-153. (in Chinese)

- [14] 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.
  Zhao L S,Zhang Q F,Liang X L, et al. Establishment and application of DEM for loess slope land based on GIS [J].
  Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 317-322. (in Chinese)
- [15] 吕悦来,李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀[J]. 土壤学进展, 1983(2):38-41.
  Lü Y L,Li G Y. The surface roughness and soil wind erosion [J]. Progress in Soil Science, 1983(2):38-41. (in Chinese)
- [16] 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;58-60.
  Wu F Q,Zhao X G,Liu B Z. The gentle slope cultivated land erosion environment and the analysis of dynamic mechanism
  [M]. Xi'an;Shaanxi Science and Technology Press,2000;58-60. (下转第 142 页)