

# DEM 提取坡度信息的不确定性分析

刘 敏<sup>1,2</sup>, 汤国安<sup>1</sup>, 王 春<sup>1</sup>, 党维勤<sup>3</sup>

(1 南京师范大学地理虚拟环境教育部重点实验室, 南京 210097; 2 西北大学城市与资源学系, 西安 710069;

3 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站, 绥德 718000)

**摘要:** 以陕西省 671 幅 1 50 000 比例尺, 25m 分辨率的 DEM 数据为信息源, 分析 DEM 分辨率对提取坡度信息的不确定性影响。研究表明: 平均坡度随 DEM 分辨率的减小呈显著递减型二次曲线变化, 但当 DEM 分辨率减小到一定程度时, 平均坡度将趋于稳定; 并且, 随 DEM 分辨率变化, 坡度的不确定性呈现明显的空间结构性分布, DEM 栅格单元内部地形的复杂性和变异性越大, 坡度提取不确定性越大, 如沟坡地坡度提取误差明显大于沟间地。因此, 实际应用中要充分考虑研究区域 DEM 地形描述的尺度效应和不确定性问题, 选择合适尺度的 DEM 提取坡度信息, 保证提取结果的科学有效。

**关键词:** GIS; DEM; 坡度; 不确定性

## 1 引言

坡度 (Slope) 作为描述地形特征信息的重要指标, 不但能够间接表示地形的起伏形态和结构, 而且是水文模型、滑坡监测与分析、地表物质运动、土壤侵蚀、土地利用规划等地学分析模型的基础数据。在地理信息系统 (Geographical Information System, GIS) 中, 坡度一般在数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 上通过一定的计算模型得到。迄今为止, 在 DEM 上已提出和发展了多种坡度计算数学模型。尽管坡度的理论定义是明确的, 然而 DEM 是地形曲面的微分模拟, 算法设计必然存在各种各样的假设, 不同假设和前提导致不同的坡度计算模型和结果, 这虽然对地形特征的可视化和地形分类影响不大, 但对以数值计算为主的地学分析模型的影响却比较显著<sup>[1]</sup>。Skidmore、Hodgson、刘学军、汤国安等先后对坡度计算精度做过系列研究<sup>[2-7]</sup>, 由于地形表面本身的复杂性以及研究方法和手段上的不同, 现有研究未能充分顾及 DEM 地形描述的尺度效应, 尤其是 DEM 分辨率对地形描述的不确定性, 得出的结论虽然具有较好的局部适宜性, 但不同结论之间还很难给出一致的解释。实际中, DEM 分辨率的变化对坡度的影响不仅仅是数据精度问题, 而且

涉及地形描述尺度效应, 以及坡度计算模型的影响。本文以陕西省 1 50 000 比例尺, 25m 分辨率的共 671 幅 DEM 数据为信息源, 分析 DEM 分辨率对提取坡度信息的不确定性影响。

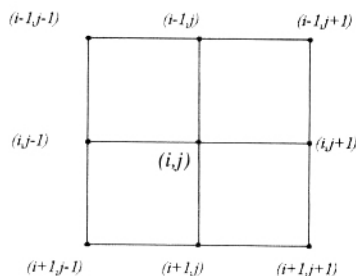


图 1 差分 DEM 计算示意图

Fig.1 The difference DEM calculation

## 2 基于 DEM 提取坡度的原理与方法

地面上某点的坡度是地形曲面函数  $z=f(x,y)$  在东西、南北方向上高程变化率的函数, 即

$$\text{Slope} = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (1)$$

式中,  $f_x$  是 X 方向高程变化率,  $f_y$  是 Y 方向高程变化率。由式 (1) 知, 求解地表某点的坡度, 关键是求解  $f_x$  和  $f_y$ 。格网 DEM 是以离散形式表示地形

收稿日期: 2006-08-25; 修回日期: 2007-01-07.

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671148) .

作者简介: 刘 敏 (1982-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事 DEM 及数字地形分析研究。E-mail: mimibear1024@126.com

曲面且曲面函数未知,因此在格网 DEM 上对  $f_x$  和  $f_y$  的求解,是在局部  $3 \times 3$  移动窗口中(如图 1 所示),通过数值微分方法或局部曲面拟合方法进行。本文 ArcGIS 中坡度计算运用三阶差分算法(3<sup>rd</sup> order finite difference,3FD):

$$f_x = \frac{(z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j} + z_{i+1,j+1} - z_{i-1,j-1} - 2z_{i,j} - z_{i+1,j+1})}{8d} \quad (2)$$

$$f_y = \frac{(z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j} + z_{i+1,j+1} - z_{i-1,j-1} - 2z_{i,j} - z_{i+1,j+1})}{8d} \quad (3)$$

其中  $d$  为格网间距(图 1 所示)。当 DEM 数据具有良好的精度时,即数据误差可以忽略不计, $f_x$  和  $f_y$  的结果主要受栅格分辨率  $d$  的影响。此时,DEM 地形描述的尺度效应直接决定了坡度计算精度。在起伏变化比较剧烈区域,DEM 对地形描述的精确度受空间分辨率影响很大<sup>[9]</sup>,直接导致基于不同分辨率 DEM 提取的坡度也各不相同<sup>[9]</sup>。

### 3 DEM 提取坡度信息的不确定性分析

#### 3.1 DEM 提取坡度的流程

(1) 在 Arc/info 中,用 AML 语言对 1 50 000 比例尺的全陕西省 671 个样区 DEM 进行重采样(样区分布见图 2),分辨率分别为 25m, 75m, 125m, 175m, 225m, 275m, 325m, 375m, 425m, 475m, 525m, 575m, 625m, 675m, 725m, 共 15 个,对每种分辨率 DEM 数据分别提取其坡度值,并计算平均坡度。

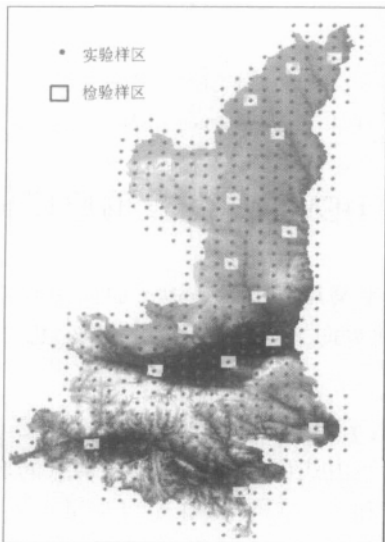


图 2 样区分布图

Fig.2 Distribution of test areas

(2) 对每个样区 15 种分辨率 DEM 的平均坡度在 excel 中做散点图,横坐标为分辨率,纵坐标为平均坡度,用二次曲线进行拟合,并在每个样区共 671 个曲线方程中提取方程系数  $a, b, c$  和相关系数  $R^2$ 。

(3) 在 ArcGIS 中将  $a, b, c$  三组数据按其原对应 DEM 图幅位置展布于全陕西省。并用克里格插值方法对其进行空间插值,得到分布于全陕西省的  $a, b, c$  值。

(4) 在 ArcGIS 中计算每个样区 75m 分辨率下提取的坡度值与 225m 分辨率下提取坡度值对应位置之差的绝对值,分析坡度计算尺度效应分布的空间结构。

#### 3.2 平均坡度的变异特征分析

以 DEM 分辨率为自变量,对应的平均坡度值为因变量,对 671 个样区的平均坡度进行回归分析(图 3 所示为其中六个样区回归模型)。671 个样区的回归分析结果显示,平均坡度随 DEM 分辨率的减小呈显著递减型二次曲线变化,通用变化曲线方程为:

$$y = ax^2 - bx + c \quad (4)$$

式中,  $x$  为 DEM 分辨率,  $y$  为坡度均值,  $a, b, c$  为回归方程系数。

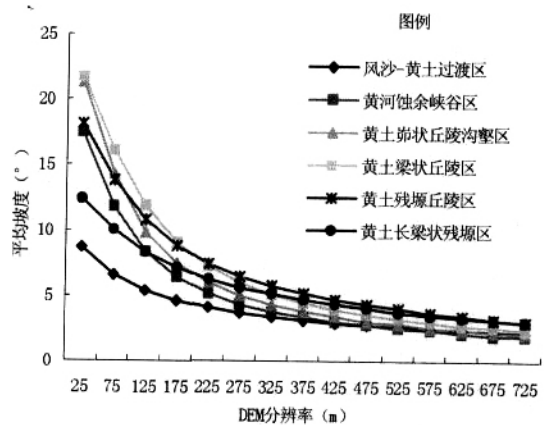


图 3 不同样区及分辨率的平均坡度回归模型

Fig.3 Regression model of average slope from different test areas and resolutions

当分辨率在局部较小范围内变化时,坡度均值呈现很强线性变化规律<sup>[9]</sup>。随着 DEM 分辨率变化范围的增大,坡度均值呈现显著的递减型二次曲线变化。并且,当 DEM 分辨率减小到一定数值时(不同地貌形态,该值有所不同),坡度均值不再随 DEM

分辨率的降低而变化,平均坡度趋于稳定。此外,不同的地貌类型区,回归方程的系数有所不同。

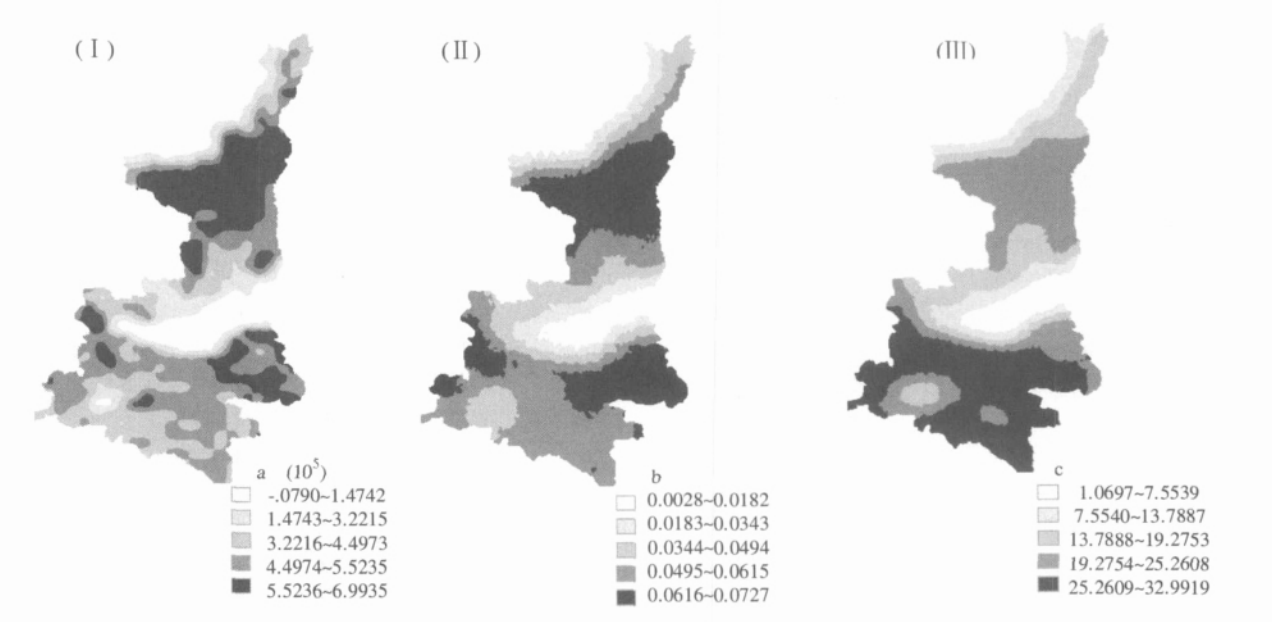


图 4 系数  $a, b, c$  分布图  
Fig.4 Distribution of coefficients  $a, b$  and  $c$

图 4( ) 为系数  $a$  的空间分布图, ( ) 为系数  $b$  的空间分布图, ( ) 为系数  $c$  的空间分布图。  $a, b, c$  的空间分布图是在 ArcGIS 9.1 中采用克里格空间内插方法获得。图 5 为回归方程可决系数  $R^2$  散点图。

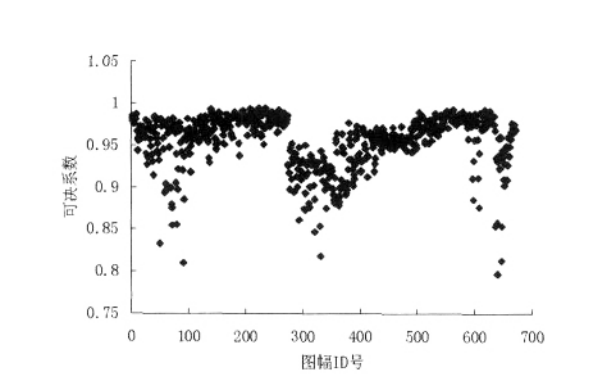


图 5 回归方程可决系数  $R^2$  散点图  
Fig.5 Scattering points of  $R^2$

图中可看出:  $a, b, c$  值在全陕西省的分布与陕西省地貌形态特征密切相关。基于图 4 资料, 利用公式 (4) 可计算陕西省任一地区 1 50 000 比例尺, 5m~725m 任意分辨率 DEM 的平均坡度。为检验公式模拟计算的精度, 随机选取陕西省 18 个检验样

区, 比较直接在 DEM 上提取的 75m 和 225m 分辨率平均坡度值与用公式计算而得的 75m 与 225m 分辨率平均坡度值。检验点分布见图 2 中检验样区, 检验结果见表 1。

结果表明:

(1) 公式 (4) 具有很好的模拟计算精度。75m 分辨率的误差绝对值最小值为 0.012, 最大值为 0.5774, 平均值为 0.1625; 225m 分辨率的误差绝对值最小值为 0.0205, 最大值为 1.0657, 平均值为 0.5127。

(2) 模拟计算精度与 DEM 分辨率相关, 分辨率越大, 计算精度越高。

3.3 坡度不确定性变化的空间结构分析

对每个样区不同分辨率 DEM 中提取的坡度值做差值运算。结果显示, DEM 分辨率对提取坡度精度的影响不仅在均值上具有一定的规律性, 而且其空间分布具有明显的结构性。图 6 为在宜君样区 75m 分辨率 DEM 和 25m 分辨率 DEM 提取坡度值差值绝对值的空间分布图。

基于 DEM 计算坡度的精度取决于 DEM 所代表单元的地形异质性。在生态学中, 异质性定义为系统或系统属性在空间上的复杂性和变异性, 这里

表 1 检验值与计算值对照表  
Tab.1 A comparison of validation value and calculated value

图幅名	75m			225m		
	检验值	计算值	误差绝对值	检验值	计算值	误差绝对值
j49e006012	11.4381	11.9025	0.4644	5.6892	6.5175	0.8283
j49e007009	1.6958	1.8224	0.1266	1.1420	1.2674	0.1254
j49e010006	0.7135	0.7827	0.0692	0.3569	0.4227	0.0658
j49e013008	10.1106	10.6880	0.5774	4.5988	5.5580	0.9592
j48e016024	5.6650	5.9210	0.2560	3.6906	4.3310	0.6405
j49e019005	18.2888	18.3060	0.0172	9.1485	10.1910	1.0425
j49e022009	17.9216	18.2265	0.3049	9.2108	10.2765	1.0657
i49e001005	14.0231	14.1545	0.1314	7.5483	8.2895	0.7412
i49e004007	9.4826	9.7458	0.2632	5.4113	6.0858	0.6744
i49e007002	10.0384	10.0530	0.0146	6.2528	6.5580	0.3052
i48e007020	11.0828	11.2063	0.1235	6.4893	7.0813	0.5920
i49e008008	0.4589	0.5345	0.0756	0.2771	0.3245	0.0474
i49e010005	1.6964	1.7147	0.0183	1.2363	1.2647	0.0284
i48e011024	1.7438	1.7558	0.0120	1.4401	1.4708	0.0307
i49e016003	25.5147	25.4365	0.0782	18.2358	18.8515	0.6157
i49e016011	22.6101	22.5023	0.1078	13.9653	14.8223	0.8569
i48e018020	6.6387	6.5543	0.0845	4.3137	4.3343	0.0205
i49e022005	23.5875	23.7883	0.2008	15.5292	16.1180	0.5888

的系统属性是涉及任何生态学中的变量，如地形、植被类型、土壤类型等。DEM 格网单元异质性可理解为栅格单元内部地形的复杂性和变异性，它依赖于尺度，即 DEM 水平分辨率和比例尺。在平坦或变化一致(如斜坡)的地形区域，或 DEM 具有非常高的水平分辨率，格网单元异质性不会对坡度提取和应用产生太大影响。然而实际地形千变万化，景观各异，且 DEM 水平分辨率也不可能太精细，因而实际应用中忽视格网单元异质性将会产生难以预料的不确定性。从陕西 671 个样区不同分辨率 DEM

中提取的坡度计算精度的空间分布图中，可以很清楚的看到颜色较深，差值较大的地方主要分布在沟坡地和部分起伏较大的沟底处，这是由于该区域地形复杂，DEM 分辨率的变化对地貌形态的描述误差影响最大；相应的，沟间地中坡度值的变化较上述区域小得多。这也表明，DEM 分辨率对提取地面坡度的影响与 DEM 所表达地区的地形复杂度密切相关。地形复杂，则坡度值对 DEM 分辨率的变化响应敏感。地形变化均匀或一致，则 DEM 分辨率对坡度提取有比较小的影响。

4 结论与讨论

- (1) 随着现代数据获取技术的完善，控制 DEM 数据精度已不存在太大的困难，因此基于 DEM 提取坡度信息的不确定性主要受 DEM 分辨率的影响。实际应用中要充分考虑研究区域 DEM 地形描述的尺度效应不确定性问题，选择合适尺度的 DEM 提取坡度信息，保证提取结果的科学有效。
- (2) 基于 DEM 提取地形因子，均存在类似坡度的不确定性问题，这里面不仅仅只是 DEM 数据精

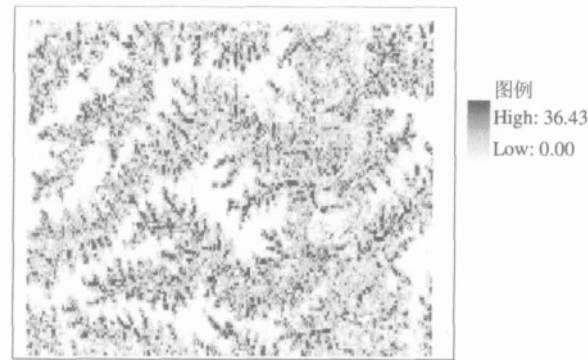


图 6 不同分辨率 DEM 提取坡度的误差分布空间结构图  
Fig.6 Slope error distribution from different DEM resolutions



度的问题, 还包括 DEM 地形描述的尺度效应与地形因子计算模型之间的匹配问题, 但这方面的研究目前还非常薄弱, 有待进一步地加强。

## 参考文献

- [1] LIU Xuejun. On the accuracy of the algorithms for interpreting grid-based digital terrain model.
- [2] Skidmore A K. A comparison of techniques for the calculation of gradient and aspect from a grided digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1989, (3): 323~334.
- [3] Florinsky I V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *Int J Geographical Information Science*, 1998, 12(1):47261.
- [4] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 汤国安. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究. *测绘学报*, 2004, 33(3).
- [5] 刘学军, 王叶飞, 曹志东, 李军锋, 汤国安. 基于 DEM 的坡度坡向误差空间分布特征研究. *测绘通报*, 2004, 12: 11~13.
- [6] 汤国安, 张 勇, 刘咏梅, 刘新华. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度研究. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 53~56.
- [7] 赵牡丹, 陈正江, 晋 锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模拟. *水土保持通报*, 2002, 22(3): 55~57.
- [8] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 成燕辉, 王占宏. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究. *测绘学报*, 2001, 30(4): 361~365.
- [9] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 刘咏梅, 谢元礼. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性. *地理学报*, 2003, 58 (6):824~830.
- [10] Bolstad P V, Stowe T. An evaluation of DEM accuracy: Elevation, slope, and aspect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1994, 60(11):1327~1332.
- [11] Kang-tsung Chang, Bor-wen Tsai. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1991, 18(1):69~77.
- [12] TANG Guoan, YANG Qinke, ZHANG Yong et al. A research on the accuracy of slope derived from DEMs of different map scales. *Bulletin*, 2001.
- [13] TANG G. A research on the accuracy of digital elevation models. Beijing: Science Press, 2000.

## Analysis of the Slope Uncertainty Derived from DEMs

LIU Min<sup>1,2</sup>, TANG Guoan<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>2</sup>, DANG Weiqing<sup>3</sup>

(1 Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2 Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3 Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE), CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Slope is one of the crucial terrain variables in spatial analysis and land use planning. DEM based slope extracting method has been widely used in practice. However, the slope data uncertainty which is very important to the applications has always been neglected. This paper focuses on how resolution affects the uncertainty of the slope extracted from DEMs in Shaanxi Province. Taking 1 50 000 DEM with a resolution of 25m with a total of 671 sheets of Shaanxi as source data. The research shows that the average slope reduction along with the DEM resolution assumes a conic trend, but when the DEM resolution reduces to a certain degree, the average slope would tend to be stable; and from the result of the comparison of the slopes derived from different resolutions, we can see that the slope uncertainty presents an obvious spatial constitutive distribution.

**Key words:** GIS; DEM; slope; uncertainty