

# 地形信息对确定DEM适宜分辨率的影响

呼雪梅<sup>1,2</sup>, 秦承志<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**分辨率会直接影响基于栅格数字高程模型(DEM)的数字地形分析结果,因此在实际应用中,需要选择适宜的DEM分辨率。目前采取的基本方法,基于某种地形信息定量刻画尺度效应曲线,从而确定DEM适宜分辨率,但对于采用不同地形信息时所产生的影响尚缺乏研究。本文针对该方法中通常采用的坡度、剖面曲率、水平曲率等3种地形信息,每种地形信息提取时,分别使用两种不同的常用算法,在3个不同地形特征的研究区中,逐一计算其在不同分辨率下的局部方差均值,以刻画尺度效应曲线,确定相应的DEM适宜分辨率,并进行对比分析。结果表明:①采用剖面曲率或水平曲率所得适宜分辨率结果基本相同,但采用坡度所得出的适宜分辨率结果则有明显差别,后者所得的适宜分辨率更粗;②采用不同地形信息时,越是在平缓地形为主的研究区,所得的适宜分辨率结果越相近,在复合地形特征的研究区所得到的适宜分辨率区间均明显较宽;③地形属性计算时所用的算法对适宜分辨率结果的影响不明显。

**关 键 词:**数字高程模型(DEM);数字地形分析(DTA);地形信息;适宜分辨率;尺度

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.01.006

中图分类号:P209;P218

文献标识码:A

## 1 引言

基于栅格数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的数字地形分析(Digital Terrain Analysis, DTA),作为定量提取各种地形信息的有效手段,已被广泛应用于水文学、地貌学、土壤学、生态学等诸多研究领域(Hengl et al, 2009; Wilson et al, 2000; 周启鸣等, 2006)。DEM分辨率的变化会直接影响DTA的结果及其相关应用(Deng et al, 2007; Drăguț et al, 2011; Smith et al, 2006; 包黎莉等, 2011, 2012; 宋晓猛等, 2013),表明DTA的尺度问题十分重要(汤国安等, 2006; 刘学军等, 2007),所以在实际应用中需要选择适宜的DEM分辨率。

目前定量选择适宜分辨率的基本方式是基于某种地形信息定量刻画尺度效应的曲线来确定适宜于具体应用的分辨率(Hutchinson, 1996; Yang et al, 2001; Smith et al, 2006; 秦承志等, 2014),其通用

步骤为:①多分辨率DEM数据准备。即由原始DEM生成多分辨率DEM数据;②尺度效应的定量刻画,即选择某一种地形信息(如坡度、曲率),由多分辨率DEM数据计算出多分辨率的地形属性,在每一分辨率上计算用于刻画尺度效应的定量指标(例如局部方差平均值),得到“分辨率—定量指标”曲线;③适宜分辨率的确定。即根据定量指标的地学意义从“分辨率—定量指标”曲线上判别出适宜分辨率,例如对“分辨率—局部方差平均值”的尺度效应曲线,由于局部方差平均值越大,表明地表的局部起伏越强烈,可将曲线中该指标最大值对应的分辨率选取为适宜分辨率。

在实现上述通用基本步骤时,不同具体方法之间的主要差别在于刻画尺度效应时所利用的地形信息不同(秦承志等, 2014),通常采用的地形信息有坡度(Drăguț, et al, 2011; Hutchinson, 1996; Smith et al, 2006)、剖面曲率(Drăguț et al, 2011; Schmidt et

收稿日期:2013-10; 修订日期:2013-12。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAC08B03-4);中科院地理资源所优秀青年人才基金项目(2011RC203)。

作者简介:呼雪梅(1989-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要研究方向为栅格数字地形分析中的尺度问题,

E-mail: huxm@lreis.ac.cn。

通讯作者:秦承志(1977-),男,山东蒙阴人,副研究员,主要从事数字地形分析研究, E-mail: qincz@lreis.ac.cn。

al, 2005; Smith et al, 2006)、平面曲率(Drăguț et al, 2011; Smith et al, 2006)等。当采用不同的地形信息时,由其刻画出的尺度效应曲线确定的适宜分辨率结果是否一致,对该问题尚缺乏研究。

基于此,本文设计了相应的实验方案,旨在分析采用不同地形信息时对确定适宜分辨率的影响,以为栅格DTA应用中确定适宜分辨率的研究需求提供依据。

## 2 实验设计

本文的总体实验设计如图1所示,其中主要部分分别说明如下。

### 2.1 研究区及多分辨率DEM数据

在不同地形特征的研究区中,适宜分辨率的结果可能是不同的,因此本文选取3个具有不同地形特征的研究区(图2),用于分析不同地形特征条件下,所用地形信息对确定DEM适宜分辨率的影响。

(1) 开县研究区位于长江中上游的重庆市,面积约250 km<sup>2</sup>,具有复合地形特征,最大高程1070 m,高差约920 m,平均坡度约20°,DEM数据(5 m分辨率,2740行×3520列)由1:1万比例尺地形图数字化得到(图2a)。

(2) 宣城研究区位于安徽省东南部的宣城市,为皖南山区与长江沿江平原过渡地带的丘陵地区,面积约11 km<sup>2</sup>,地形特征平缓,最大高程83.6 m,高差约52 m,平均坡度约5°,DEM数据(5 m分辨率,566行×801列)由1:1万比例尺、2.5 m等高距的地形图数字化得到(图2b)。

(3) Coweeta研究区位于美国北卡罗来纳州山区,面积约43 km<sup>2</sup>,最大高程1598 m,高差约930 m,平均坡度约24°,DEM数据是分辨率约6.1 m(20 ft)的LiDAR DEM,为便于分析DEM分辨率与其他两个研究区相一致,采用双线性内插方法获得其5 m分辨率、1340行×1280列的栅格DEM,作为本实验的起始分辨率DEM(图2c)。

本文在起始的5 m分辨率DEM数据的基础上,通过局部平均方式,得到多分辨率DEM数据系列,该方法目前普遍用于DTA适宜尺度研究中多分辨率数据源的生成(Behrens et al, 2010; Liu et al, 2011; Smith et al, 2006)。三个研究区的实验中统一采用的分辨率包括5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、50 m、100 m,考虑到研究区面积的因素,开县研究区的实验还包括了150 m、200 m、300 m分辨率;Coweeta研究区的实验还包括了150 m、200 m分辨率。

### 2.2 采用的地形信息

目前,基于定量刻画尺度效应曲线来确定DEM适宜分辨率的方法通常采用的地形信息主要有坡度、剖面曲率、平面曲率。本实验相应地分别采用坡度、剖面曲率、水平曲率来确定DEM适宜分辨率,以进行结果对比,分析不同地形信息对确定适宜分辨率的影响。其中,选择水平曲率而非平面曲率,是因为两者的符号、作用相似,并且水平曲率可有效避免平面曲率的不合理极值问题(Shary, 2002)。

考虑到坡度、曲率数据在由DEM计算生成时受到算法的影响,本实验在计算地形属性时分别采用了ArcGIS中集成的算法和另一种常用算法,用

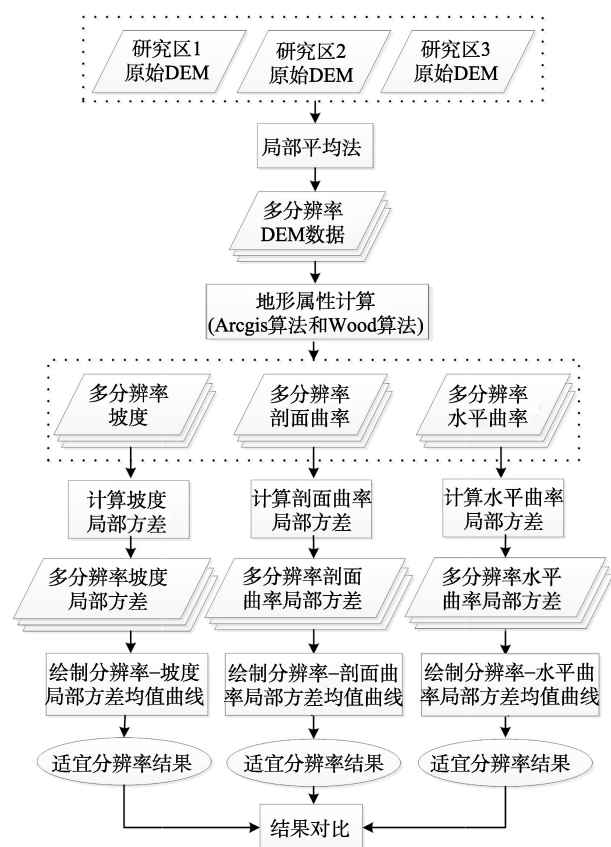


图1 实验设计流程

Fig.1 Workflow of the experiment

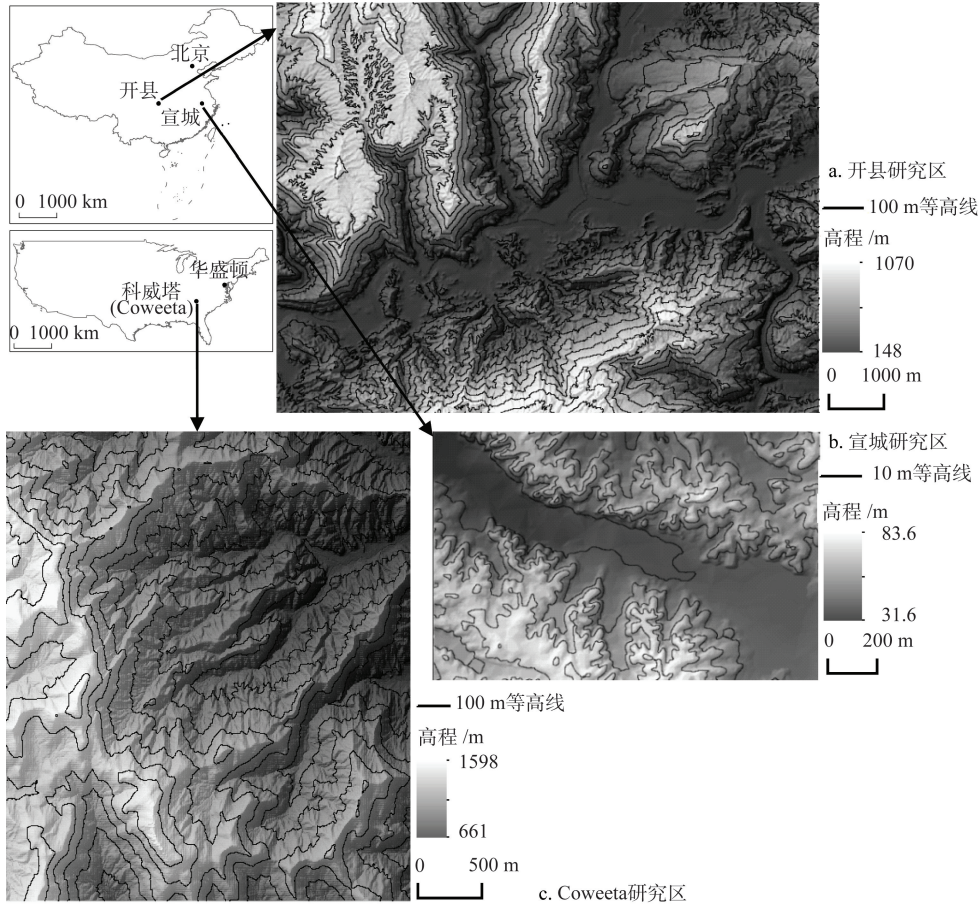


图2 不同研究区DEM  
Fig.2 DEMs of the three study areas

于讨论地形信息的不同算法对确定适宜分辨率的可能影响。其中,坡度计算分别采用了Wood(1996)不带权二次曲面拟合算法和ArcGIS中集成的三阶反距离平方权差分算法(Horn, 1981; Burrough et al, 1998);剖面曲率计算分别采用了Wood(1996)不带权二次曲面拟合算法和ArcGIS中集成的不完全四次曲面算法(Zevenbergen et al, 1987);由于ArcGIS中没有水平曲率算法,本实验以ArcGIS中的平面曲率与Wood(1996)水平曲率算法进行对比。

2.3 尺度效应的定量刻画和适宜分辨率的确定

常用的定量指标有局部方差均值、半方差、小波方差,指标值越大表明地表的局部起伏越强烈,定量指标最大值对应的分辨率可作为适宜分辨率。其中,局部方差均值计算简便,结果易于分析(Woodcock et al, 1987; 秦承志等, 2014);地统计方法中的半方差与局部方差均值在用于确定适宜分辨率时结果相似(Atkinson, 1997),但计算更复杂;小波方差计算中采用不同的小波核函数时会产生

不同的结果,难以解释(李双成, 2006)。因此,本文选择将局部方差均值( $\overline{LV}$ )作为定量指标,其计算公式如下:

$$\overline{LV} = \frac{\sum_i \sum_j LV_{i,j}}{N}, LV_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}{n} \quad (1)$$

式中:  $LV_{i,j}$  为栅格( $i,j$ )的地形属性局部方差;  $X_k$  为分析窗口内第  $k$  个栅格的地形属性值;  $\bar{X}$  为分析窗口内所有栅格的地形属性均值;  $n$  为分析窗口内的栅格个数;  $N$  为整个DEM的栅格数。实验中分别取坡度局部方差均值、剖面曲率局部方差均值和水平曲率局部方差均值的最大值对应的分辨率作为适宜分辨率(秦承志等, 2014)。

3 结果与分析

在不同研究区中,根据不同算法计算的坡度、剖面曲率和水平曲率计算得出“分辨率—局部方差



均值”尺度效应曲线图(图3),从中可获得对应的适宜分辨率结果。根据图3,当对一个地形属性分别采用不同算法计算时,所得的“分辨率—局部方差均值”尺度效应曲线十分接近,所得的适宜分辨率结果一致,即地形属性计算时所用的算法对适宜分辨率结果的影响不明显。

对于开县研究区,坡度局部方差均值在50 m分辨率处达到最大值,并在较宽的分辨率区间(25~150 m)上对应着坡度局部方差均值高值区(或称适宜分辨率区间),剖面曲率及水平曲率的局部方差均值分别在10 m、15 m分辨率处达到最大值,且高值区对应的分辨率区间很窄(10~15 m);对于宣城研究区,坡度的局部方差均值在15 m分辨率处达到最大值(仅在较窄的15 m~20 m分辨率区间上对应着高值区间),剖面曲率及水平曲率的局部方差均值都在5 m分辨率处达到最大值,之后迅速降低;对于Coweeta研究区,坡度局部方差均值在100 m分辨率处达到最大值(两侧的分率率所得的局部方差均值明显低于最大值),剖面曲率及水平曲率的局部方差均值都在5 m处达到最大值,之后迅速降低。适宜分辨率结果汇总在表1中。

由图3及表1可见,采用不同的地形属性时,所得到的适宜分辨率结果有明显区别。对同一个研

究区,采用剖面曲率或水平曲率时,所得的适宜分辨率单一值及区间的结果几乎完全相同(仅在复合地形特征的开县研究区适宜分辨率单一值上略有区别);与采用坡度的情况相比,采用曲率所得的适宜分辨率明显更细,且适宜分辨率区间明显更窄。总体而言,越是在平缓地形为主的研究区中(如宣城研究区),采用不同地形信息所得的适宜分辨率结果越相近,且较细。

进一步比较不同研究区之间的实验结果可见(图3),当采用坡度信息时,不同研究区所得到的“分辨率—局部方差均值”尺度效应曲线形态有明显差别,所得的适宜分辨率也有明显差别(表1):越是以山区地形条件为主的研究区(如Coweeta研究区),采用坡度信息所得的适宜分辨率越粗;在复合地形特征的开县研究区,所得到的适宜分辨率区间明显宽于地形条件相对单一的研究区(平缓地形条

表1 DEM适宜分辨率结果

Tab.1 Results of the appropriate DEM resolution

研究区	采用坡度 信息/m	采用剖面 曲率信息/m	采用水平 曲率信息/m
开县研究区	50	10	15
宣城研究区	15	5	5
Coweeta研究区	100	5	5

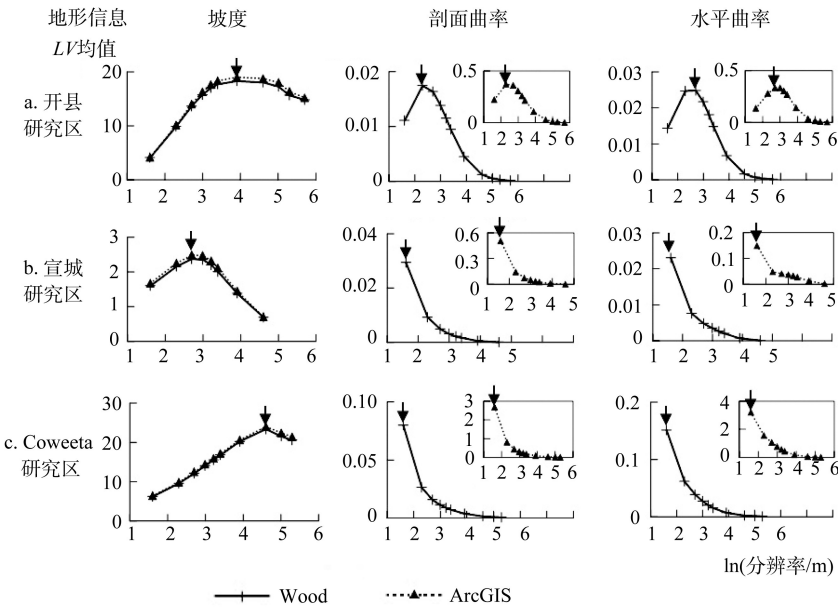


图3 基于不同研究区地形信息得到的“分辨率—局部方差均值”尺度效应曲线  
(图中“Wood”表示 Wood算法,“ArcGIS”表示 ArcGIS 中集成的算法;横坐标采用了自然对数坐标以便区分分辨率数据点;箭头指示了局部方差均值最大值处,对应分辨率取为适宜分辨率)

Fig.3 "Resolution-Mean LV" curves for quantifying resolution effects based on different topographic attributes

件的宣城研究区和山区地形条件的Coweeta研究区)。上述差异是由于复合地形特征研究区中,不同地形条件的区域对确定适宜分辨率所用的全局定量指标(局部方差平均值)计算结果的影响相互混合所致。

当采用曲率信息时,所得到的“分辨率—局部方差均值”尺度效应曲线,在地形条件相对单一的研究区中形态十分相似,对应的适宜分辨率都是最细的5 m分辨率;而在复合地形特征的开县研究区,所得到的“分辨率—局部方差均值”尺度效应曲线则明显形态不同,具有突出的峰形,对应的适宜分辨率也略粗(10 m或15 m,见表1)。

这种现象同样是由于复合地形特征研究区中,不同地形条件的区域对确定适宜分辨率所用的全局定量指标计算结果的影响相互混合所致。使用曲率信息时,复合地形特征研究区中所得的最大局部方差平均值所反映的地表强烈起伏主要体现在不同地形条件的区域之间的转变,因此最大局部方差平均值对应的适宜分辨率结果较大;而地形条件相对单一的研究区所得的最大局部方差平均值主要反映更细微的地表局部起伏。

由上述分析可见,在地形条件较复杂的研究区,采用全局固定的适宜分辨率可能并不合理,一个随空间变化的适宜分辨率分布图更符合实际、能够更合理地指导实际应用(秦承志等, 2014),对这方面的研究还有待深入。

在对方法的研究更趋完善之前,当前的实际应用中,对整个应用区采用固定的适宜分辨率将仍然因其简便而通行。面对这种实际需求时,若应用所关注的是局部地表的起伏及其影响(例如坡面尺度上的地形信息提取、水文参数计算,或是精细尺度上的数字土壤制图),则应选取较细的DEM分辨率(如本文采用曲率信息在地形条件相对单一的研究区所得的5 m适宜分辨率结果);若应用关注的是较大尺度上的地表特征(如数字地貌制图等),则可选取较粗的DEM分辨率(如本文中采用坡度信息对复合地形特征研究区所得的适宜分辨率结果)。

## 4 结论

本文通过实验,比较分析了在分别采用坡度、

剖面曲率、水平曲率等不同地形信息来定量刻画尺度效应曲线时,对确定DEM适宜分辨率结果的影响。结果表明:

(1) 对同一研究区,在本文所描述的确定DEM适宜分辨率的过程中,采用剖面曲率或水平曲率所得适宜分辨率(单一值或区间)结果基本相同,但采用坡度所得出的适宜分辨率结果较前者有明显差别(采用坡度信息所得的适宜分辨率更粗)。

(2) 采用坡度信息时,研究区越是以山区地形条件为主,所得的适宜分辨率越粗;而采用曲率信息时,则是在复合地形特征的研究区所得到的适宜分辨率会比在地形相对单一的研究区所得的适宜分辨率略粗。

(3) 采用不同地形属性时的相似之处在于,复合地形特征的研究区所得到的适宜分辨率区间均明显宽于地形相对单一的研究区所得结果。总体而言,越是在平缓地形为主的研究区中,采用不同地形信息所得的适宜分辨率结果越相近。

(4) 对同一种地形属性,采用不同算法计算该地形属性时,对适宜分辨率结果的影响不明显。

## 参考文献(References)

- 包黎莉, 秦承志, 朱阿兴. 2011. 地形湿度指数算法误差的定量评价. 地理科学进展, 30(1): 57-64. [Bao L L, Qin C Z, Zhu A X. 2011. Quantitative error assessment of topographic wetness index algorithms. Progress in Geography, 30(1): 57-64.]
- 包黎莉, 秦承志, 朱阿兴, 等. 2012. DEM误差对滑坡危险性评价模型的影响. 地理科学进展, 31(10): 1326-1333. [Bao L L, Qin C Z, Zhu A X, et al. 2012. Effect of DEM error on landslide susceptibility mapping models. Progress in Geography, 31(10): 1326-1333.]
- 李双成, 高伟明, 周巧富, 等. 2006. 基于小波变换的NDVI与地形因子多尺度空间相关分析. 生态学报, 26(12): 4198-4203. [Li S C, Gao W M, Zhou Q F, et al. 2006. Multi-scale spatial analysis on NVDI and topographical factors using wavelet transform. Acta Ecologica Sinica, 26(12): 4198-4203.]
- 刘学军, 卢华兴, 仁政, 等. 2007. 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 26(3): 433-442. [Liu X J, Lu H X, Ren Z, et al. 2007. Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling. Geographical Research, 26(3): 433-442.]

- 秦承志, 呼雪梅. 2014. 栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法. 地理研究, 待出版. [Qin C Z, Hu X M. 2014. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis. *Geographical Research*, in press.]
- 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 2013. 基于DEM的数字流域特征提取研究进展. 地理科学进展, 32(1): 31-40. [Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. 2013. Advances in digital watershed features extracting based on DEM. *Progress in Geography*, 32(1): 31-40.]
- 汤国安, 刘学军, 房亮, 等. 2006. DEM及数字地形分析中尺度问题研究综述. 武汉大学学报: 信息科学版, 31(12): 1059-1066. [Tang G A, Liu X J, Fang L, et al. 2006. A review on the scale issue in DEMs and digital terrain analysis. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31(12): 1059-1066.]
- 周启鸣, 刘学军. 2006. 数字地形分析. 北京: 科学出版社. [Zhou Q M, Liu X J. 2006. *Digital terrain analysis*. Beijing, China: Science Press.]
- Atkinson P M, Curran P J. 1997. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(12): 1345-1351.
- Behrens T, Zhu A X, Schmidt K, et al. 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155(3): 175-185.
- Burrough P A, McDonell R A. 1998. *Principles of geographical information systems*. New York: Oxford University Press.
- Deng Y, Wilson J P, Bauer B O. 2007. DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(1-2): 187-213.
- Drăguț L, Eisank C, Strasser T. 2011. Local variance for multi-scale analysis in geomorphometry. *Geomorphology*, 130(3-4): 162-172.
- Hengl T, Reuter H I. 2009. *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Amsterdam: Elsevier.
- Horn B K P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of IEEE*, 69(1): 14-47.
- Hutchinson M F. 1996. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. *The Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, NM: January 21-25.
- Liu H H, Kiesel J, Hömann G, et al. 2011. Effects of DEM horizontal resolution and methods on calculating the slope length factor in gently rolling landscapes. *CATENA*, 87(3): 368-375.
- Schmidt J, Andrew R. 2005. Multi-scale landform characterization. *Area*, 37(3): 341-350.
- Shary P A, Sharaya L S, Mitusov A V. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107(1): 1-32.
- Smith M P, Zhu A X, Burt J E, et al. 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma*, 137(1): 58-69.
- Wilson J P, Gallant J C. 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. Chichester, UK: Wiley.
- Wilson J P. 2012. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1): 107-121.
- Wood J. 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models[D]*. Leicester, UK: University of Leicester.
- Woodcock C E, Strahler A H. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21(3): 311-332.
- Yang D W, Herath S, Musiak K. 2001. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. *Hydrological Processes*, 15(11): 2085-2099.
- Zevenbergen L W, Thorne C R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1): 47-56.

## Effects of different topographic attributes on determining appropriate DEM resolution

HU Xuemei<sup>1,2</sup>, QIN Chengzhi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Due to the scale effect of changing resolution for grid-based digital terrain analysis, it is important to determine an appropriate resolution (or a range of appropriate resolutions) for gridded digital elevation model (DEM) in practice. The commonly-used approach to determining appropriate resolutions is based on a scale effect curve characterized by certain types of statistics (the mean of local variance is commonly used), which is calculated on the multi-resolution dataset of a specific topographic attribute derived from the gridded DEMs with a series of spatial resolutions. The resolution with the highest value of the mean of local variance is considered to be an appropriate DEM resolution. Although several topographic attributes (such as slope gradient and curvature) have been used in this approach, there are few researches on the effects of different topographic attributes on the results from this approach. In this paper, we used an experiment to compare the effects of three types of topographic attributes (i.e., slope gradient, profile curvature, and horizontal curvature) applied to determining appropriate DEM resolutions. The experiment was conducted in three study areas with different terrain conditions, i.e. Xuancheng area with low relief, Coweeta area with high relief, and Kaixian area with more complex terrain conditions. The tested topographic attributes were calculated from the DEMs with a series of spatial resolutions (i.e., 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100, 150, 200, 300 m). For each topographic attribute, two widely-used algorithms were tested. One is proposed by Wood (1996), and the other is the one implemented in ArcGIS software. The appropriate DEM resolution for a study area had the highest value of the mean of local variance derived from each tested topographic attribute, respectively. Experimental results showed that the effects of slope gradient and curvature are different on the results of the appropriate DEM resolution, while there is little difference between the results from profile curvature and horizontal curvature. The appropriate resolutions based on slope gradient information (i.e., 15, 50, and 100 m for Xuancheng area, Kaixian area, and Coweeta area, respectively) are coarser than those based on curvature information (i.e., 5, 10~15, and 5 m for Xuancheng area, Kaixian area, and Coweeta area, respectively), while the difference between them is less for the study areas with low relief. When slope gradient information was used, the appropriate resolution results for the study area with high relief are coarser than those for the area with low relief. When curvature information was used, the appropriate resolution results for the study areas with simple terrain conditions (such as Xuancheng area with low relief, and Coweeta area with high relief) are finer than those for the study area with complex terrain conditions. The range of appropriate resolutions from each topographic attribute for the study areas with simple terrain conditions is much wider than that for the study areas with complex terrain conditions. For each specific topographic attribute there is no difference between the effects of the tested algorithms of topographic attribute on the results of appropriate resolutions.

**Key words:** digital elevation models (DEM); digital terrain analysis (DTA); topographic attribute; appropriate resolution; scale