

DEM 点位地形信息量化模型研究*

董有福^{1,2}, 汤国安¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 南京工业大学测绘学院, 南京 210009)

摘要: 针对 DEM 点位, 首先应用微分几何法对其所负载的语法信息量进行测度, 其次根据地形特征点类型及地形结构特征确定其语义信息量, 然后基于信息学理论构建了 DEM 点位地形信息综合量化模型。在此基础上, 以黄土丘陵沟壑区作为实验样区, 对 DEM 点位地形信息量提取方法及其在地形简化中的初步实例应用进行了探讨和验证。实验结果显示, 所提出的 DEM 点位地形信息量化方案可行; 基于 DEM 地形信息量指数的多尺度 DEM 构建方案, 具有机理明确、易于实现的特点, 并通过优先保留地形骨架特征点, 可以有效减少地形失真, 从而满足不同层次的多尺度数字地形建模和表达要求。对 DEM 点位地形信息进行有效量化, 为认识 DEM 地形信息特征提供了一个新的切入点, 同时为多尺度数字地形建模提供理论依据与方法支持。

关键词: DEM; 地形信息; 地形建模; 数字地形分析

文章编号: 1000-0585(2012)10-1825-12

1 引言

数字高程模型 (DEM) 通过规则采样所构建的地面高程数字矩阵, 实现对地表起伏特征的定量模拟, 并为基于 GIS 的数字地形分析提供了基础数据源。但是, 在一个全矩阵的 DEM 数据阵列中, 不同数据点位所负载的地形信息特征则具有显著差异。如: 柯正谊等根据地面点在地形建模中作用将其定性地划分为明显地貌特征点、一般地貌特征点与非地貌特征点^[1]; 胡鹏等提出实现 DEM 保真主要在于保持地形结构线与高程特征点^[2]。从信息论的视角澄清这种差异性的成因、影响因素、存在条件与基本特征, 并实现对其科学的定量表达, 则具有重要的理论意义与应用价值。

DEM 点位载负的地形信息越多, 在重构多尺度 DEM 时适宜于得到优先保留。因此, 对 DEM 点位地形信息特征进行量化, 是各类 DEM 地形综合算法抽取“关键点”的基础。其中, 基于局部邻域的地形简化方法 (重要点法^[3]、高程差法^[4]、点面距法^[4]、空间夹角法^[4]、信息量法^[5]、容忍度法^[6]、地形熵法^[7,8]、小波变换法^[9,10]、分形法^[11,12]等), 这类方法主要依据局部地形形态特征对地面点载负的地形信息大小进行区分, 在此基础上对地面点进行取舍来实现 DEM 地形化简, 这类 DEM 点位地形信息量化方案具有对小范围的地形变化敏感的特点, 许多位于地形骨架线上的地形特征点, 由于局部地形变化幅度不大而被忽略掉, 因此, 地形简化结果缺乏全局精度控制, 结果易出现山峰削平、沟谷抬升的

收稿日期: 2011-10-15; 修订日期: 2012-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40930531、41101360); 江苏省高校自然科学基金项目 (11KJB420001); 江苏省优势学科建设工程资助项目

作者简介: 董有福 (1976-), 男, 汉族, 河南信阳人, 副教授, 主要从事 DEM 数字地形分析和空间数据挖掘研究。
E-mail: dongyoufu@163.com

现象,造成整体地貌骨架一定程度的失真;顾及地形全局地形结构的 DEM 地形简化算法,通过提取地形结构线^[13~15]或者不同层次地形特征要素点^[16~19],从而决定地面点取舍和综合程度,实现了地形简化所遵循的“取主舍次”原则,能够较好地保持地形结构特征,但对地形特征点层次性缺乏进一步有效量化区分,往往难以确定地形特征点与重构 DEM 目标尺度间的对应关系。

由此可见,国内外学者从不同视角提出了多种有效的 DEM 点位地形信息大小判别规则,但同时亦反映出对 DEM 点位地形信息特征缺乏系统性认识和理解,并且总体上表现为重形态轻语义、重局部轻全局的特点;此外,由于 DEM 多尺度建模过程中采样点取舍规则与方案多种多样,使得 DEM 地形建模结果差异明显但可比性差。因此,对 DEM 点位地形信息特征进行系统量化研究,从而有助于重构多尺度 DEM 时确定选点策略,对提高多尺度 DEM 地形建模效果与效率、继而提高 DEM 应用可靠性与适用性,都具有极其重要的意义。

2 DEM 点位地形信息及层次确定

DEM 是对地形特征的数字化模拟再现,它记录并表达了地表形态与地形结构等丰富的地形信息。DEM 点位作为 DEM 描述和刻画地形特征的基本单元,则载负的地形信息特征存在明显差异。DEM 点位地形信息,不仅仅是其所在的局域地形变化形式的反映,同时与其所在地形部位相联系,同样是局部地形起伏度较小的坡面点和平缓山脊点,其蕴含的地形信息具有显著差异,在地形综合时前者适宜于忽略而后者适宜于保留;进一步而言,所在地形部位类型相同的地形特征点,往往对应于不同的地形结构层次,譬如主沟和支沟上的沟谷点,其表达出的地形信息亦不尽相同。因此,有必要对 DEM 点位地形信息特征分类型分层次进行系统研究。

信息论将客观事物信息特征区分为语法(外在形式)、语义(内在含义)和语用(效用价值)等层次上进行研究^[20],为系统描述 DEM 点位地形信息特征提供了新思路^[21~24]。相应地,针对 DEM 点位表达的地形信息,亦可区分为由局部高程变化形式确定的语法层次、考虑所在地形部位类型和地形层次结构性的语义层次、地形特征相对于某一用户或特定应用目的的语用层次(具有主观性,难以有效量化)。譬如,DEM 点位语法层次的地形信息反映了对应地面点的凸起或凹陷形式,其语义层次地形信息描述了该点位是山脊点、山谷点还是斜坡点,其语用层次地形信息则是该点位对汇水性能或者辐射强度的实际影响程度。

3 DEM 点位地形信息量化方案

对目标对象不同层次的信息特征进行度量研究,已经在空间信息学相关领域获得了广泛应用^[25~29],同时为 DEM 点位地形信息量化提供了很好的理论支持和方法借鉴。本文基于信息学理论中语法信息和语义信息层次分析法,同时结合宏观地形结构和局部地形形态二元组合分析法,在建立语法地形信息量和语义地形信息量测度方法的基础上,构建 DEM 点位地形信息综合量化方案(图 1);地形信息量的计量单位采用信息量统一单位比特(bit)。

3.1 DEM 点位语法地形信息量测度方法

根据信息学理论,将 DEM 语法地形信息界定为 DEM 所表达的地形形态变化方式的

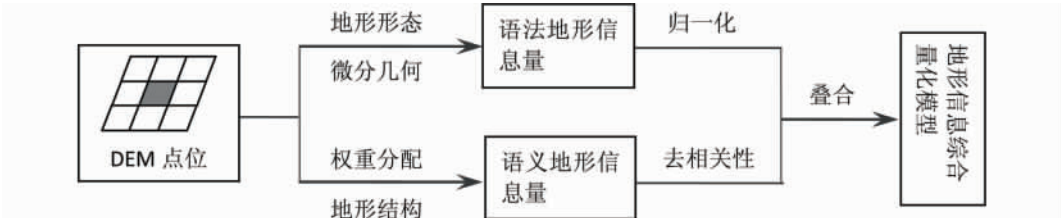


图 1 DEM 点位地形信息综合量化方案

Fig 1 Quantitative scheme of DEM cell's terrain information

外在形式；针对 DEM 点位而言，其语法地形信息则是其在局域范围内地形变化特征的反映。其中，局域范围的确定则是对 DEM 点位语法信息量进行测度的基础。考虑到格网 DEM 数据结构特点，DEM 点位对地形特征的描述主要是通过与其邻域栅格点位高程变化表达出来的，因此，本文暂且将 DEM 点位局部邻域内地形变化形式作为求解其语法地形信息量的主要依据。

根据用户对地形的认知方式和认知规律，空间上地形形态的变化是通过光谱颜色改变呈现出来的。由于颜色可以分为亮度和色度，而 DEM 只能提供地形表面间的亮度相对变化特征，这种亮度变化幅度则可以通过局部地形表面间的相对几何关系表达的^[30]。按照微分几何原理，局部地形曲面相对几何关系则可以通过其切平面夹角大小去刻画，并可进一步转换为其切平面法向夹角去度量（图 2）。

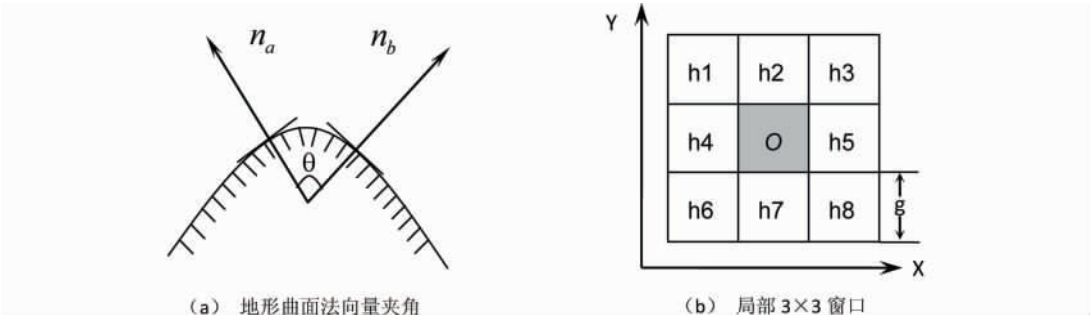


图 2 语法地形信息量计算方法示意图

Fig 2 Computational method schema of semantic terrain information index

两法向量 n_a 和 n_b 夹角 θ 计算公式为：

$$\theta = \arccos \frac{n_a \times n_b}{|n_a| |n_b|} = \arccos \left(\frac{x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}} \right) \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (1)$$

式中： x_a 、 y_a 、 z_a 、和 x_b 、 y_b 、 z_b 分别表示法向量 n_a 和 n_b 的法向量坐标分量。

针对栅格 DEM 数据组织形式，在求取中心目标栅格单元与周围 8 邻域栅格单元法向量夹角均值并加 1 的基础上，通过求以 2 为底的对数求算目标栅格单元所负载的语法地形信息量（Syntax Terrain Information Index， TII_{syntax} ）。即有：

$$TII_{syntax} = \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^8 \theta_i / 8 \right) \quad (2)$$

式中： θ_i 是中心目标栅格单元与相邻某个栅格单元法向量夹角。

3.2 DEM 点位语义地形信息量测度方案

DEM 语义地形信息是 DEM 所表达地形特征的内在含义; DEM 点位语义信息量 (Semanteme Terrain Information Index, $TII_{\text{semanteme}}$) 大小是由其所属地形特征要素类型及其重要性程度决定的。地形特征要素可以区分为地形特征点、地形特征线、地形特征面三个要素类型; 地形面虽然是地形构成单元, 但它是地形突变线在空间上对地形剖分的结果。因此, 对地形形态与结构具有控制作用的地形线和地形点则是地形的骨架, 决定了地形地貌的几何形态和基本走势。所以, 对地形特征点线在地形数字化表达中重要性的确定是语义地形信息量测度的关键。考虑到本文的研究对象是 DEM 点位, 并且地形特征线是由地形特征点构成, 所以本文采用先确定地形特征线语义信息量的基础上, 再对地形特征线上的 DEM 点位进行语义信息量赋值。

对于 DEM 点位, 其语义信息量则是所属地形特征点线类型及其重要性程度的函数。因此, 在确定不同类型地形特征点线语义信息量时应主要考虑: (1) 每种类型地形特征点线都具有自身语义信息量; (2) 空间上不重合的不同类型地形特征点线语义信息量相对独立; (3) 空间位置上重合的不同类型地形特征点 (如山顶点和脊线点) 语义信息量, 则根据其地貌学特征及相互关系进一步确定; (4) 同一类型地形特征点线则根据其等级层次性特征赋予不同的语义信息量权值。

3.3 DEM 点位地形信息综合量化方案

针对 DEM 点位, 在确立了语法地形信息量和语义地形信息量测度方法的基础上, 可以通过设置合理的叠加方案, 构建地形信息综合测度模型, 从而全面反映其负载的地形信息量大小。其中, 需要解决的关键问题则是明确语法地形信息与语义地形信息的重要性层次关系。根据认识论层次模型^[20], 语法层次地形信息是最低的层次, 语义层次地形信息属于第二层次, 随着信息层次增加, 其重要性程度也不断升高; 从 DEM 地形表达而言, 这一点也是相对明显的, 地形特征点线决定了地形骨架特征, 并且地形特征点线等级层次越高, 其对地形的控制作用也越来越重要。因此, 构建 DEM 点位地形信息综合量化模型时, 首先对语法地形信息量指数进行归一化处理; 再与大于 1 的语义地形信息量值进行叠加 (非地形特征点语义地形信息量为 0), 从而实现对 DEM 点位在地形数字化表达中的重要性程度进行有效描述和区分, 具体量化方案如下:

(1) 在应用公式 (1) 和 (2) 求解 DEM 点位语法地形信息量的基础上, 按公式 (3) 对语法地形信息量指数进行归一化处理;

$$TII_{\text{syntax}} = (TII_{\text{syntax}} - TII_{\min}) / (TII_{\max} - TII_{\min}) \quad (3)$$

式中: TII_{syntax} 和 TII'_{syntax} 分别表示栅格单元标准化前后的语法地形信息量指数值; TII_{\max} 和 TII_{\min} 分别表示研究区域内最大和最小的语法地形信息量指数值; 归一化后 DEM 点位语法地形信息量取值为 0~1bit 之间。由于语法地形信息量指数主要反映了 DEM 点位在局域地形形态描述中的变异程度, 在地形综合过程中需要保留部分地形描述细节时, 则可以通过提取对应地形信息量指数值小于 1bit 的 DEM 点位重构相应尺度的 DEM。

(2) 对 DEM 点位, 如果为非地形特征要素点, 则确定语义地形信息量值为 0; 如果为地形特征要素点, 则根据其所属地形特征要素类型及其等级层次关系赋予 1 以上的信息量权值, 例如沟谷点语义地形信息量分别赋值为其等级数值。通过给语义信息量指数设定较高的数值, 从而有效突出 DEM 点位在维持地形骨架中的作用大小, 进而在地形综合过

程中,使得地形特征点能够得到优先保留,并且可以通过提取不同层次或级别的地形特征点,重构不同尺度的目标 DEM。

(3) 在前两步的基础上,对每个 DEM 点位进行语法信息量指数值 (TII_{syntax}) 和语义信息量指数值 ($TII_{semanteme}$) 叠加,获得其地形信息量综合指数值 (Terrain Information Composite Index, TICI), 即有:

$$TICI = TII'_{syntax} + TII_{semanteme} \quad (4)$$

$TICI$ 反映了 DEM 点位所负载的综合地形信息量值,从而可以有效表征不同点位在地形数字化描述中的作用大小。

4 DEM 点位地形信息量指数提取

本文以黄土丘陵沟壑区为例讨论 DEM 点位地形信息量指数求解方案和主要提取过程。实验区为陕北黄土高原绥德县韭园沟流域,总面积约 70km^2 ,海拔 $830\text{m} \sim 1200\text{m}$,为典型黄土丘陵沟壑地貌类型。基本实验数据采用国家测绘部门生产的 $1:10000$ (5 m 分辨率) DEM。

局部语法地形信息量计算方法明确,提取过程相对简单,这里重点对语法信息量提取结果进行对比分析。由于不同类型和不同层次的地形特征点语义信息量具有差异,因此地形信息量综合指数求解重点则是 DEM 点位语义地形信息量的确定,而地形特征点线提取及其等级层次性判定则是语义地形信息量计算的关键。目前,不同类型高精度 DEM 数据源建立以及不断完善的地形特征要素提取技术,为 DEM 特征点线语义地形信息量确定奠定了很好的数据保证和方法支持。与此同时,尽管地形特征要素含义比较明确,但在确定其边界条件时往往难以用数学表达式表达,具有较大模糊性,并且在提取过程中受算法和阈值影响,使得基于 DEM 数据源提取地形特征要素及其等级划分存在模糊性^[31],造成 DEM 点位语义地形信息量提取具有较大不确定性。

4.1 DEM 点位语法地形信息量提取结果与分析

在采用数值微分算法求解地表微分单元法向量坐标参数的基础上,应用式 (1) 和 (2) 实现 DEM 点位语法地形信息量指数的计算,并根据式 (3) 对语法地形信息量指数进行了归一化处理,图 3 是采用不同颜色对语法地形信息量指数进行分级表达的结果。从中可以看出,局部地形信息指数高值区主要位于两边相对陡峭的 V 形沟谷区,较高值出现在地形起伏变化幅度较大的脊线区、宽谷坡脚区以及坡面转折处,而占主体的斜坡面和沟谷面上的地形点值都相对较低。

为反映语法地形信息量指数描述地形形态变化的特点,本文将其与常用的地形形态描述参数作进一步对比分析。

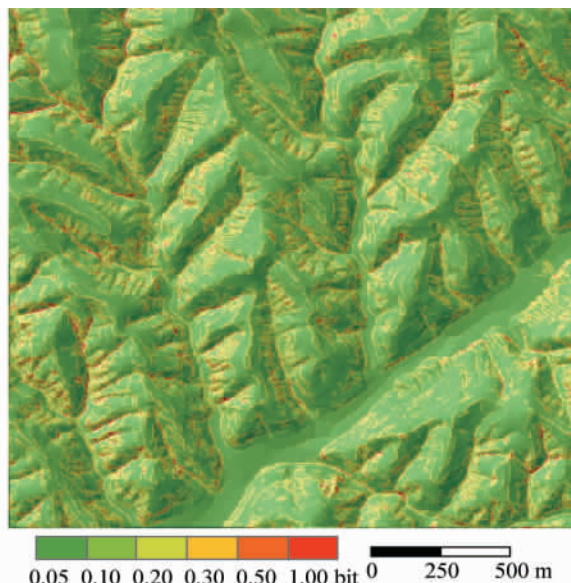


图 3 语法地形信息量指数空间分布图

Fig 3 Spatial distribution of syntax terrain information index

在描述地形形态特征的地形因子中,地形表面曲率是一种常用的地形参数。现有的曲率因子多达十几种,都是从某个特定方向刻画局部地形表面凹凸弯曲程度,结果使得特定方向上地形形态变化信息得到了放大,而其他的方向上的变化则被忽略。其中,如剖面曲率(profile curvature)和平面曲率(plane curvature)分别从水平和垂直方向来描述地形形态变化规律(图4)。图5给出了从一个从坡面顶部沿坡面倾斜方面到坡面底部不同地形部位处语法地形信息指数与剖面曲率和平面曲率对比结果(点位1到25为坡顶部到坡底部的空间顺序),为了便于比较,上述参数都做了归一化处理。从图5可以看出:在山脊线部位(左1点)具有较高的平面曲率而剖面曲率值较低,在坡脚线位置(右2点)具有较高的剖面曲率而平面曲率较低,第5点具有类似坡脚线点处的平面曲率与剖面曲率特征,此处为黄土高原地貌类型区坡形变化非常显著的沟沿线部位。在以上三个重要的地形特征点处,语法地形信息量指数都具有相对高的数值。此外,在坡面的其他位置处,三种参数值都相对较低;上述分析结果表明:语法地形信息量指数的几何含义能够反映局域范围内地形表面的整体弯曲程度,在物理含义上能够表征在局域范围内人眼获得的地形信息量多少。

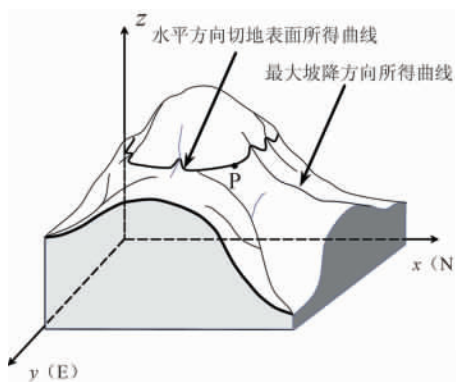


图4 剖面曲率与平面曲率示意图

Fig. 4 Plane curvature and profile curvature

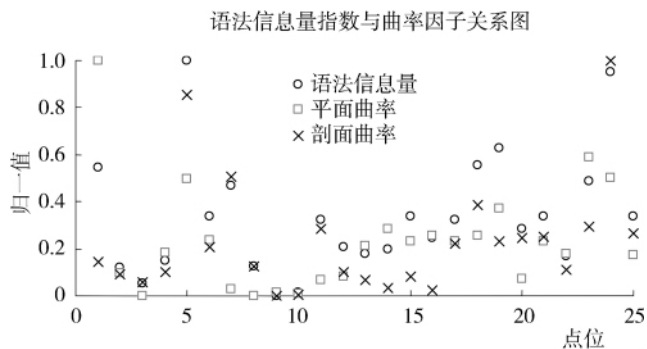


图5 语法信息量指数与曲率因子对比图

Fig. 5 Contrast of syntax terrain information index and curvature index

目前许多地形简化算法,如重要点(Very Important Points, VIP)法、点面距法、夹角法等,对DEM点位重要性评价也主要根据目标点位在局部邻域地形形态描述中作用大小进行判别。图6是VIP法计算中心目标点位重要度的原理示意图,即在中心目标点O的邻域 3×3 窗口中,连接成4组相对方向的直线(AE、BF、GC和HD),计算中心点到每组直线的垂直距离(d),然后利用4个垂直距离的均值大小对点O的重要性进行测度。图7给出了对应上述25个地形部位处语法地形信息指数与VIP重要度指数的对比结果,为了便于比较,同样对两个指数进行了归一化处理。从图中可以看出:不同点位处语法信息量指数与VIP重要度指数数值大小总体一致性程度高,但部分点位上数值具有一定差异,这主要是二者在算法原理上的不同导致。通过对比发现,语法信息量指数不仅具有几何和物理意义明确的特点,同时能够有效刻画DEM点位在局部地形形态描述中的作用大小。

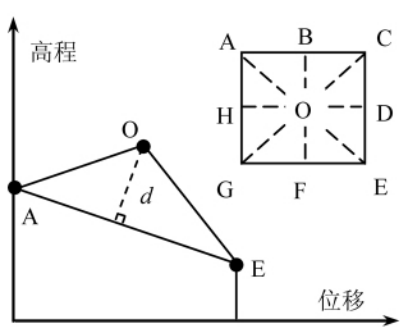


图 6 VIP 计算方法示意图
Fig 6 Calculation schema of VIP algorithm

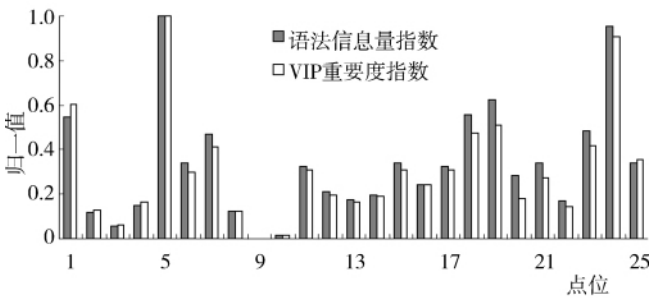


图 7 语法信息量指数与 VIP 重要度指数对比图
Fig. 7 Contrast of syntax terrain information index and VIP index

4.2 DEM 点位语义地形信息量确定方案及提取

不同地貌类型区具有不同的地形特征要素类型，则 DEM 点位语义地形信息量确定方案和提取流程存在一定差异。因此，需要针对特定地貌类型的研究区域，在分析其地形结构组成要素类型、层次结构特征及其相互间依赖约束关系的基础上，通过地形特征点分类提取、分级编码以及语义信息量赋权值，实现 DEM 点位语义信息量的提取。本文的黄土丘陵沟壑实验区，不仅包括丘陵山区的脊线点、沟谷点、山顶点、鞍部点、脊线结点、径流结点等基本类型的地形特征点，同时坡脚点分布于宽广沟谷区坡面下部边缘，另外还具有黄土丘陵沟壑区特有的沟沿线点；这些不同类型的地形特征点共同构成了该区域的地形骨架。表 1 是该实验区采用的语义地形信息量确定方案及提取结果。

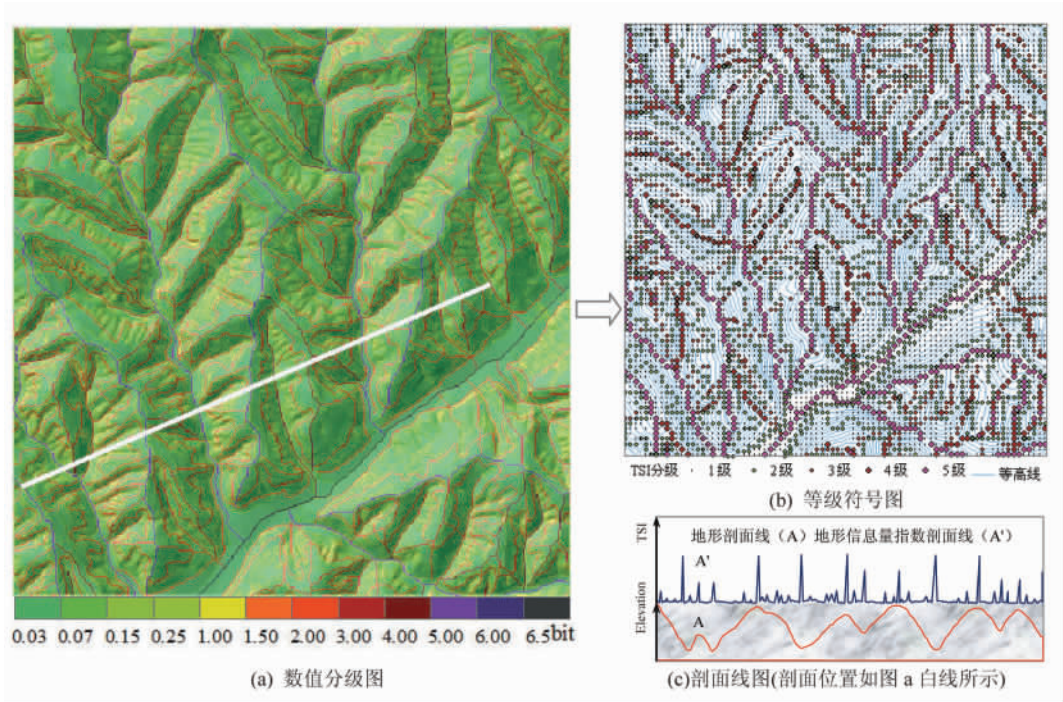


图 8 DEM 点位地形信息量综合指数提取结果
Fig 8 The extraction results of DEM cell's Terrain Information Composite Index (TICI)

表 1 实验区地形特征要素语义信息量提取

Tab 1 The extraction of semanteme information content of terrain features in test area

(1) 脊线点	语义信息量提取结果	(2) 沟谷点	语义信息量提取结果
<p>特征描述：由鞍部点沿着最陡坡度上行到山顶点的轨迹线点。</p> <p>语义信息量确定方案：应用 Horton 方案^[32]对山脊线进行分级的基础上，位于等级为 1 的山脊线上的点位语义信息量设为 1，然后山脊等级每增加 1，其语义信息量值同时增加 1。</p>		<p>特征描述：由鞍部点沿着最陡坡度下行至洼地点的轨迹线点。</p> <p>语义信息量确定方案：应用 Horton 方案对沟谷线进行分级的基础上，位于等级为 1 的沟谷线上的点位语义信息量设为 1，然后沟谷等级每增加 1，其语义信息量值同时增加 1。</p>	
(3) 山顶点	语义信息量提取结果	(4) 鞍部点	语义信息量提取结果
<p>特征描述：在局部区域内海拔高程的极大值点。</p> <p>语义信息量确定方案：考虑到山顶点与山脊线间位置重合关系，在其所属的脊线点语义信息量值基础上加 1；至于同一条脊线上的山顶点语义信息量值差异，在未来研究中可以作进一步区分。</p>		<p>特征描述：位于成正交的凸凹线的交点处。</p> <p>语义信息量确定方案：考虑到鞍部点与山脊线间位置重合关系，在其所属的脊线点语义信息量值基础上加 1；至于同一条脊线上的鞍部点语义信息量值差异，在未来研究中可以作进一步区分。</p>	
(5) 沟沿线点	语义信息量提取结果	(6) 坡脚点	语义信息量提取结果
<p>特征描述：黄土丘陵沟壑区上部沟坡地和下部沟间地的分界线点。</p> <p>语义信息量确定方案：目前关于沟沿线数量化分级的研究尚没有正式报到，本文在应用数学形态学方法提取沟沿线的基础上，将所有沟沿线点语义信息量值均设为 1。</p>		<p>特征描述：坡脚是坡面最下端由倾斜过渡为平缓的部位。</p> <p>语义信息量确定方案：目前关于坡脚线数量化分级的研究尚没有正式报到，本文在应用坡脚线坡度变化特征^[33]提取坡脚线的基础上，将所有坡脚线点语义信息量值均设为 1。</p>	
(7) 径流结点	语义信息量提取结果	(8) 脊线结点	语义信息量提取结果
<p>特征描述：流域中不同沟谷或水系的交汇点。</p> <p>语义信息量确定方案：考虑到径流结点位于沟谷点上并且其重要性高于同级别的其它沟谷点，本文将径流结点语义信息量设定为其所在的沟谷点等级值加上所连接的次级沟谷点等级数值的十分之一。</p>		<p>特征描述：流域中不同山脊线的交汇点。</p> <p>语义信息量确定方案：考虑到脊线结点位于脊线点上并且其重要性高于同级别的其它脊线点，本文将脊线结点语义信息量设定为其所在的脊线点等级值加上所连接的次级脊线点等级数值的十分之一。</p>	

4.3 DEM 点位地形信息综合指数提取结果

针对 DEM 点位, 根据 (4) 式将其归一化处理后的语法信息量与语义信息量值进行叠加, 得到地形信息量综合指数值。图 8 是实验样区地形信息量综合指数空间分布图, 其中 (a) 采用不同颜色对地形信息量综合指数值进行区分 (单位为 bit); (b) 采用不同大小和颜色的点状符号对地形信息量综合指数进行分级显示; (c) 为 (a) 中白线所示剖面位置处地形剖面与地形信息量综合指数剖面特征的对比结果。从图中可以看出: 位于地形骨架线上地形点地形信息量综合指数值高并较好的表现出了地形要素的等级层次性; 在局域地形变化比较剧烈的地方整体地形信息量综合指数具有相对较高的数值; 对绝大多数地面点, 其整体地形信息量综合指数值很低说明其在地形建模中的作用是不显著的。

5 DEM 点位地形信息量应用实例

地形信息量综合指数是 DEM 点位所负载的语法地形信息量和语义信息量之和, 它同时考虑了 DEM 点位在局域地形形态描述和宏观地形结构控制中的作用。DEM 点位地形信息量综合指数值越大, 表示其负载的地形信息越多, 在 DEM 重构过程中适宜于优先保留。因此, DEM 点位地形信息量综合指数, 可以作为重构多尺度 DEM 有效的选点判别依据。图 9 是基于地形信息量综合指数的地形简化方案: 首先提取大比例尺 DEM 点位地形信息量综合指数值, 通过设置不同大小的地形信息综合指数阈值, 选择一定数量的候选地形点, 当阈值较小时对候选地形点进行疏化, 在此基础上, 加入地形特征线构建约束 TIN, 从而得到不同尺度级别的简化结果 DEM (图 10)。

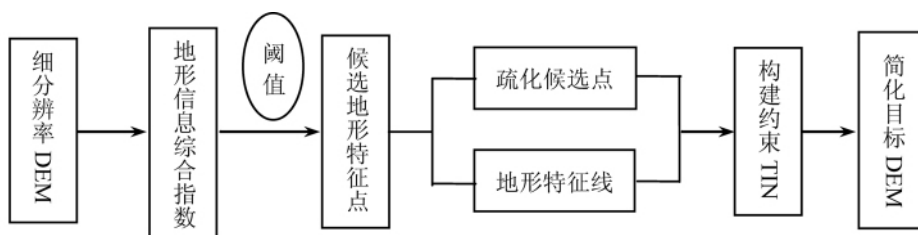


图 9 基于 DEM 地形信息综合指数的地形简化步骤

Fig. 9 Terrain generalization procedure of DEMs based on TICl

为了对比不同尺度结果 DEM 间的差异, 图 10 中重构 DEM 都采用了与原始大比例尺 DEM 相同的栅格分辨率 (5m)。从初步实验结果可以看出, 当地形信息综合指数为 0.8bit 时, 选定用于重构结果 DEM 的点位不仅包含所有地形特征点, 同时还有一部分局域地形形态变异点, 对应的重构 DEM 中能够显示出一定的地形细节特征; 相应地, 随着地形信息综合指数阈值增大, 用于重构 DEM 的特征点主要位于不同层次的地形骨架部位, 低等级的沟谷和山脊逐渐被综合, 从而得到不同简化尺度要求的结果 DEM。由此可见, 基于地形信息综合指数的 DEM 地形简化方案, 通过优先保留不同级别的地形骨架特征点, 可以有效维护 DEM 地形结构特征的一致性, 从而满足不同层次的多尺度数字地形建模要求。

需要说明的是, 在上述地形信息综合指数应用实验中, 仅对基于地形信息综合指数重

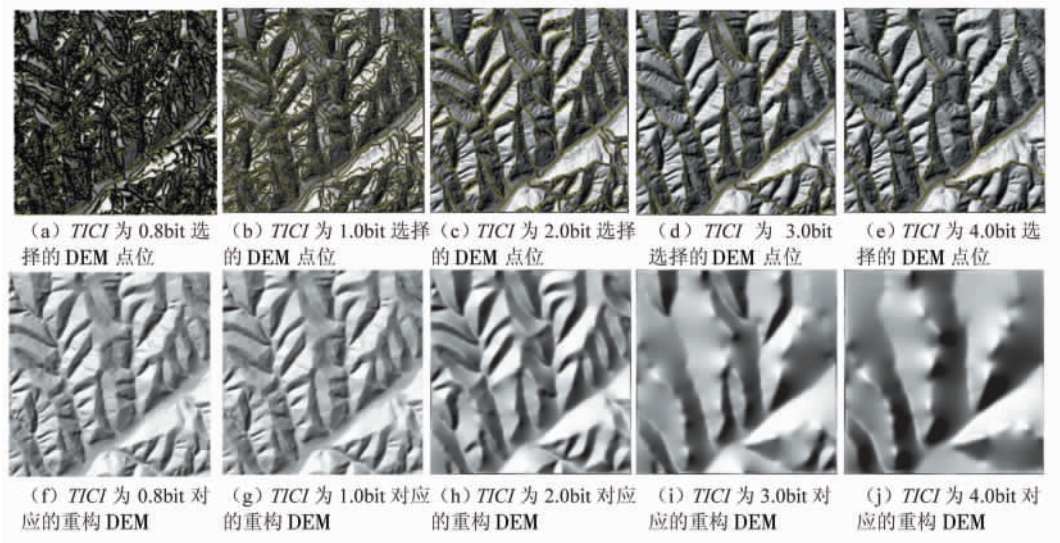


图 10 不同地形信息综合指数 $TICI$ 阈值得到的简化结果 DEM

Fig. 10 The results of the generalized DEMs with different $TICI$ tolerances

构不同尺度 DEM 的可行性给出了初步实验结果。由于在该 DEM 地形简化方案中，其关键问题就是根据 DEM 点位地形信息综合指数值大小，确定不同 DEM 点位适用于重构何种尺度的结果 DEM，为此则需建立地形信息综合指数阈值综合判定标准，构建地形信息综合指数阈值与重构目标 DEM 比例尺大小间的对应量化关系；另外，初步应用实验中对重构多尺度 DEM 的效果也仅仅从视觉方面进行了展示，还需要对重构 DEM 从数据精度和应用效果等方面作进一步探讨。针对上述问题进行详细讨论。

6 结论与讨论

本文基于信息学认知层次模型的理论与方法，构建了 DEM 点位地形信息综合量化模型，它既将 DEM 地形局域变化形式进行逐点位定量描述，又反映了 DEM 点位对宏观地形表达的控制性作用，具有信息内涵的综合性及其对地形多层次表达的映射性，可望在 DEM 地形简化与多尺度地形表达中发挥重要作用。

通过在黄土丘陵沟壑区的实验结果显示，基于微分几何的语法信息量测度方法能够有效表明 DEM 点位在局域地形形态描述中的作用；通过赋予合理的语义信息量权值，能够定量区分地形特征点在地形结构控制中的层次性特点；在此基础上构建的地形信息综合指数能够系统反映 DEM 点位在数字地形建模中作用大小；基于地形信息综合指数的 DEM 地形简化方案，通过优先保留相应尺度层次的地形骨架特征，从而满足多尺度地形建模和表达要求。

今后研究将从以下方面对 DEM 点位地形信息量作进一步探讨。DEM 点位语法信息量测度与 DEM 地形描述尺度间依赖关系如何，其大小随 DEM 分辨率不同呈现出何种变化规律？受提取算法和阈值等因素的影响，地形特征点语义信息量建立结果具有什么样的不确定性特征？DEM 地形信息综合指数提取方法与多尺度地形建模效果在不同地貌类型

区存在哪些差异,适用性如何?则需构建与地貌类型区相适应的 DEM 地形信息综合指数建立方法与应用体系。

参考文献:

- [1] 柯正谊,何建邦. 池天河数字地面模型. 北京:中国科学技术出版社,1993.
- [2] 胡鹏,杨传勇,吴艳兰. 新数字高程模型理论 方法 标准和应用. 北京:科学出版社,2007.
- [3] Chen Zitan, Guevara Armando J A. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. In: Chrisman N. Proceedings of AUTO-CARTO 8, Baltimore, MO, U. S. A. 1987. 50~56.
- [4] 蔡先华,郑天栋. 数字高程模型数据压缩及算法研究. 测绘通报,2003,(12):16~18.
- [5] Weber W. Automationsgestützte generalisierung. Nachrichten aus dem Karten-und Vermessungswesen, 1982,88(1):77~109.
- [6] Chang K. Introduction to Geographic Information Systems, Boston:McGraw Hill Higher Education,2004.
- [7] 马洪波,刘建辉,杨健. 基于地形熵差和高程绝对差度量的地形匹配算法. 指挥技术学院学报,2000,11(5):59~63.
- [8] 明德烈,尤克非,田金文,等. 基于局部熵的高度场三角格网化研究. 电子学报,2002,30(7):1009~1012.
- [9] 吴凡,祝国瑞. 基于小波分析的地貌多尺度表达与自动综合. 武汉大学学报:信息科学版,2001,26(2):170~176.
- [10] 李含璞. 基于小波变换的 DEM 多尺度综合研究. 兰州:兰州大学硕士学位论文,2006.
- [11] 王桥,胡毓钜. 基于分形分析的自动化制图综合研究. 测绘学报,1995,24(3):211~216.
- [12] 胡育彬. 基于分形的三维地形生成和多分辨率 LOD 简化. 南京:南京航空航天大学硕士学位论文,2008.
- [13] 黄培之. 提取山脊线和山谷线的一种新方法. 武汉大学学报:信息科学版,2001,26(3):247~252.
- [14] 姚慧敏. 基于地形特征建立高质量 DEM. 郑州:中国人民解放军信息工程大学硕士学位论文,2002.
- [15] 杨族桥,郭庆胜,牛冀平,等. DEM 多尺度表达与地形结构线提取研究. 测绘学报,2005,34(2):134~137.
- [16] Fowler Robert J, Little James J. Automatic extraction of irregular network digital terrain models. Computer Graphics (SIGGRAPH'79 Proc.), 1979,13(2):199~207.
- [17] De Floriani L, Falcidieno B, Pienovi C. Delaunay-based representation of surface defined over arbitrarily shaped domains. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, (32):127~140.
- [18] Fei lifan, He Jin. A three-dimensional Douglas-Peucker algorithm and its application to automated generalization of DEMs. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(6):703~718.
- [19] 费立凡,何津,马晨燕,等. 3 维 Douglas-Peucker 算法及其在 DEM 自动综合中的应用研究. 测绘学报,2006,35(3):278~284.
- [20] 钟义信. 信息科学原理(第三版). 北京:北京邮电大学出版社,2002.
- [21] Bjork J T, Myklebust I. Map generalization: Information theoretic approach to feature elimination. In: Proceedings of Scangis, 2001. 203~211.
- [22] Li Zhilin. Algorithmic Foundation of Multi-scale Spatial Representation. Hong Kong: CRC Press, 2007.
- [23] 王昭,费立凡. 基于语法层的地图综合信息量原则. 测绘科学,2007,32(6):21~24.
- [24] 余英林,田菁,蔡志峰. 图像视觉感知信息的初步研究. 电子学报,2001,29(10):1373~1375.
- [25] Li Zhilin, Huang Peizhi. Quantitative measures for spatial information of maps, INT. Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(7):699~709.
- [26] Wu Huayi, Zhu Haijun, Liu Yi. A raster-based map information measurement for Qos. Proceedings of ISPRS, 2004, 365~370.
- [27] 王郑耀,程正兴,汤少杰. 基于视觉特征的尺度空间信息量度量. 中国图象图形学报,2005,10(7):922~928.
- [28] 邓敏,陈杰,李志林,等. 曲线简化中节点重要性度量方法比较及垂比弦法的改进. 地理与地理信息科学,2009,25(1):40~43.

- [29] 肖强,孙群,安晓亚. 点位信息度量模型及其在曲线化简中的应用. 测绘通报,2010,(9):57~59.
- [30] Marr David. Vision. San Francisco:Freeman Publishers,1982.
- [31] 刘学军,卢华兴,仁政,等. 论 DEM 地形分析中的尺度问题. 地理研究,2007,26(3):433~442.
- [32] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins:Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin,1945,56(3):275~370.
- [33] 肖飞,张百平,凌峰,等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法. 地理研究,2008,27(2):459~466.

Research on quantification model for elevation points terrain information based on DEMs

DONG You-fu^{1,2}, TANG Guo-an¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education,
Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. College of Geomatics Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: For a given point embedded in grid DEMs, its comprehensive quantification model of terrain information content representing its significance in approximating the true terrain surface is constructed on the basis of information theory after its terrain syntactic information content is measured with differential geometry algorithm, and its terrain semantic information content is determined according to the terrain feature type and the global terrain structure. Then, choosing a study area of 70 km² in the loess gully region with a resolution of 5 m, the paper discusses the extraction procedure of the terrain information content for a grid point based on grid DEMs and an application in multi-scale terrain generalization based on grid point's terrain information content. Experimental results show that the terrain information measurement model for a grid point is feasible and the multi-scale DEMs reconstruction method is not only easy to implement but also effective in reducing terrain distortion by preferentially keeping a set of "surface-specific" structural points located in global terrain skeletons. The application example proved that the multi-scale DEMs constructed by selecting critical points based on their terrain information content values could meet the demands of digital terrain modeling in different terrain scales. Therefore, the research could be helpful in deepening our understanding of DEM terrain information characteristics and offering a theoretical and methodological support for multi-scale digital terrain modeling.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); terrain information; terrain modelling; digital terrain analysis