

论 DEM 地形分析中的尺度问题

刘学军, 卢华兴, 仁 政, 任志峰

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: DEM 及其地形分析具有强烈的尺度依赖特征。本文以黄高原地区的研究为例, 结合地学建模和地学模拟的需求, 重点讨论 DEM 地形分析中的尺度问题。文中从 DEM 建立与应用出发, 首先建立了 DEM 地形分析中的尺度概念体系, 剖析了各类尺度之间的关系, 其次讨论了尺度所引起的各种地形分析效应问题, 最后探讨了 DEM 地形分析中的尺度转换类型和方法。

关键词: DEM; 数字地形分析; 尺度; 尺度效应; 尺度反演

文章编号: 1000-0585(2007)03-0433-10

1 引言

近年来, 随着人类活动对全球环境变化影响的加剧, 全球尺度和区域尺度的研究越来越受到重视, 尺度效应和尺度转换成为在局部、区域、全球环境分析和建模中的主要研究内容。而地形作为活跃的地理环境组成要素之一, 对其他要素和整体环境特征有着重要影响。地形表达和基于地形的各种地学分析与模拟具有很强的尺度依赖性, 数字高程模型 (DEM) 作为区域地形表面的主要数字化表达方式, 其尺度问题尤为重要。

长期以来, 对 DEM 及其地形分析中的尺度研究是 DEM 相关应用领域的研究重点。以往对 DEM 尺度特征的研究主要集中在数据组织和数据精度层面, 前者如多尺度 DEM 数据组织、表达及其应用, 包括用金字塔、四叉树等技术组织和管理多尺度 DEM 的数据^[1], 基于 LOD 模型的地形简化与可视化^[2,3], 运用小波变换、分形等等方法实现基于 DEM 的地形地貌自动综合和 DEM 的尺度转换^[4,5]、DEM 数据压缩^[6]等方面; 后者则重点研究 DEM 尺度所引起的不确定性问题, 包括 DEM 尺度对地形表达的精度影响研究^[7,8]和 DEM 分辨率对地形分析、地学模型的影响分析等^[9~15]。

在当今不同比例尺、不同分辨率、不同精度的 DEM 共同存在的格局下, 基于 DEM 的地学建模、地学过程模拟和分析成为 DEM 应用与研究的基本特征, 尺度问题是急需解决的核心问题, 这不但是 DEM 和地学模型在集成上的根本保证, 也是 DEM 数据推广和应用的关键。本文在作者长期从事数字高程模型、数字地形分析的研究基础上, 以黄土高原 DEM 构建与地形分析为例, 并考虑当前国内外的研究现状, 试图构建 DEM 及其地形分析中的尺度框架, 剖析 DEM 与地形分析中的尺度效应问题, 探索 DEM 地形分析中的尺度反演方法。旨在通过 DEM 尺度与尺度效应的分析与思考, 抛砖引玉, 进一步促进对

收稿日期: 2006-07-23; 修订日期: 2007-01-11

基金项目: 国家自然科学基金: DEM 地形分析尺度效应与机理 (40571120)

作者简介: 刘学军 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: DEM 及其地形分析, 空间分析, 空间数据不确定性等。E-mail: liuxuejun@njnu.edu.cn

DEM 及其地形分析尺度的研究, 为不同尺度 DEM 的应用研究奠定基础, 也希望为地学尺度问题的分析和研究提供可借鉴的理论和方法。

2 DEM 地形分析尺度体系

DEM 及其地形分析中尺度问题研究的前提是构筑尺度分类体系, 即在 DEM 及其地形分析中, 存在何种尺度, 这些尺度之间又存在何种关系。

作为基础地理数据的一类, DEM 尺度有地理尺度、观测尺度、操作尺度和制图尺度^[16]等类型。然而在 DEM 及其地形分析中, 需要对所涉及的尺度概念明确化, 这需从 DEM 的生产流程和应用角度进行分析和考察。本文将 DEM 及其地形分析中的尺度划分为地理尺度、采样尺度、DEM 结构尺度、分析尺度和表达尺度等五类(图 1)。

(1) 地理尺度(geographical scale)。DEM 是区域地形表面的数字化表达, 本身就具有地理尺度含义。DEM 所表示的区域范围具有很大的弹性, 小可以到仅覆盖几平方公里的直接服务于具体工程(如大坝、厂房建筑等)的范围, 大可以到覆盖全球范围。DEM 的地理尺度决定着的其他尺度和 DEM 应用目的。用于研究全球变化的 DEM, 一般采用较低的结构尺度(分辨率), 如美国地质测量局(USGS)生产的全球范围的 GTOPO30 DEM, 其水平分辨率为 30 弧秒(约 1km); 而区域性 DEM 由于直接服务于应用, 其结构尺度一般较为精细, 如我国黄土高原 1:1 万 DEM, 其水平分辨率为 5m。

(2) 采样尺度(sampling scale)。DEM 的建立源于对区域地形表面的抽样, 因此采样尺度包括原始数据尺度和样点尺度两类。

DEM 为再生数据, 其精度不可能高于原始数据, 因而 DEM 常常要强调原始数据的尺度和精度。在以地形图为主要数据源的 DEM 生产中, 地形图比例尺常为主要考虑因素, 例如我国 1:1 万 DEM、1:5 万 DEM、1:25 万 DEM 等, DEM 前的比例尺说明原始地图比例尺或与相应比例尺的地形图精度相当; 美国 USGS 的 7.5 分 DEM 和 15 分 DEM, 其精度分别与 1:2.4 万、1:6.4 万比例尺的地形图精度相当。

样点尺度包括采样时样点的分布和密度。一般要求样点尽可能分布在地形特征部位并具有足够的数量。不规则分布的采样方式具有可变尺度, 随地形复杂程度而变化; 规则分布的样点可直接形成结构各异的 DEM, 也可通过内插形成所需分辨率的 DEM, 但样点的间隔应以反映所需地形特征为前提。样点尺度对 DEM 的地形模拟精度有着重要的影响。

(3) DEM 结构尺度(structure scale)。DEM 属于镶嵌数据模型, 即用连续网格单元来逼近地形表面, 逼近程度取决于水平网格单元的精细程度和垂直方向上的接近程度, 前者称为水平分辨率(horizontal resolution), 后者称为垂直分辨率(vertical resolution)。

水平分辨率也称为水平抽样间距(horizontal sampling interval)、栅格单元(cell size)、格网间距(grid spacing grid)等。水平分辨率是 DEM 最基本的变量之一, 其大小

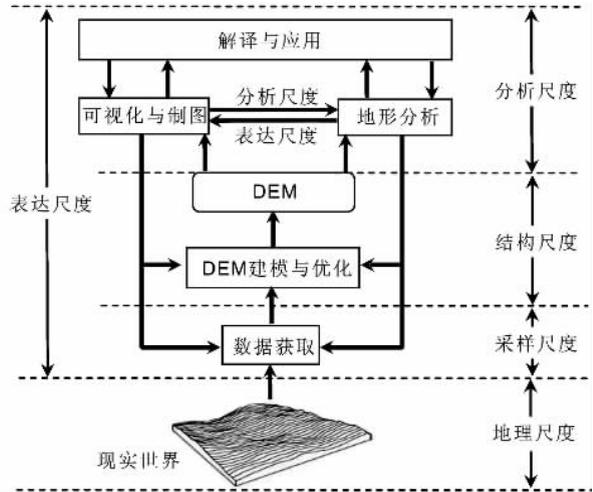


图 1 DEM 建模分析流程与相应尺度

Fig. 1 Processes of DEM modeling and corresponding scales

直接决定着 DEM 对地形曲面的精细程度。水平分辨率在东西方向和南北方向可以一致，也可不一致，其单位可通过 m 或（经纬）度来表达。

垂直分辨率是指 DEM 高程数据记录的增量范围，如 USGS 的 30mDEM，其高程数据一般凑整至 m，即高程以 1m 为增量，垂直分辨率为 m。我国 1:5 万数字高程模型生产技术中也规定，高程数据以 m 为单位，保留小数后一位，也就是说，高程数据的准确度为 dm，垂直分辨率为 dm。大范围的 DEM 数据也有以 5m 甚至 10m 为高程数据记录单位的，这时的垂直分辨率分别为 5m 和 10m。与高程数据精度(Accuracy)不同，垂直分辨率反映高程数据最小的增量范围，而高程数据精度则是采样和内插过程中误差的综合影响，如我国 1:5 万 DEM，其垂直分辨率为 dm，相邻两个单元的垂直分辨率可相差一个增量单位即 0.1m，但并不意味着这两个格网单元的数据精度也是 0.1m，其高程数据精度在 4~19m 范围内。垂直分辨率有时也称为垂直抽样间距(vertical sampling interval)。

(4)分析尺度 (analysis scale)。基于 DEM 的地形参数如坡度、坡向、曲率等的计算通常是在 DEM 上的局部范围中进行的 (图 2)，在形状上，可以是方形的、圆形的、扇形的等；在范围上，可以是单个格网单元，也可以是整个 DEM 范围。但不管怎样，该局部范围都是以格网单元的各种组合表示的，这些格网单元的范围称为分析窗口尺度，简称窗口尺度。

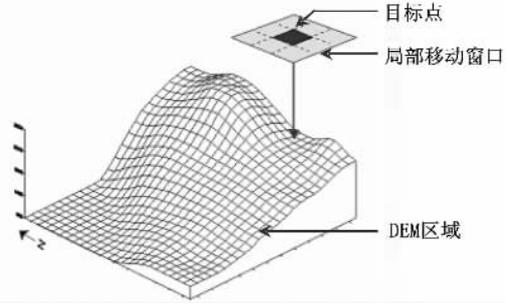


图 2 DEM 窗口分析尺度

Fig. 2 Windows scale of DEM analysis

DEM 地形分析的另一个尺度是阈值尺度。由于地形的非解析性，基于 DEM 的地形特征提取常常采用模拟法，如水流模拟法等。这时对地形特征部位的判断，就需要一个阈值^[17]，即某一点上的水流累积量大于给定的值，则为特征点，反之不是。所给的值称为阈值，其大小直接影响着所提取的地形特征形状和数量。图 3 是在黄土高原地区的局部 DEM 上所提取的流域网络，从图中可看出在不同的阈值尺度下，所提取的流域网络和沟壑密度是不同的。

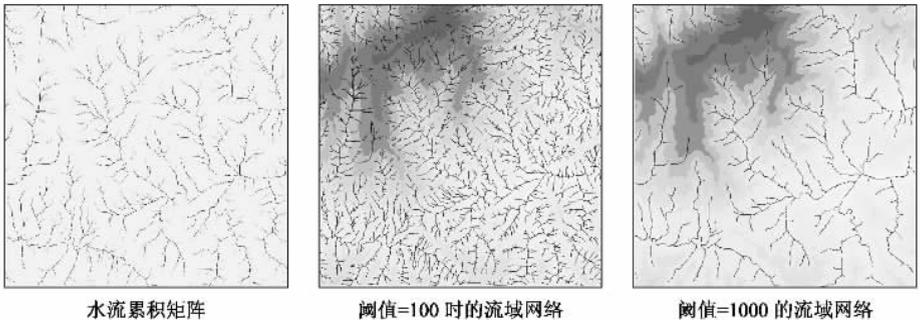


图 3 DEM 阈值尺度 (DEM 格网分辨率 25m, 阈值为格网单元数)

Fig. 3 DEM threshold scale for watershed analysis

DEM 地形分析的窗口尺度和阈值尺度是水平分辨率和垂直分辨率的函数，间接反映 DEM 结构尺度对地形分析的影响。

(5)表达尺度(cartographic scale)。DEM 作为数字产品，本身并无比例概念，若将数

字产品转换为模拟产品, 则要按一定的比例输出。因此表达尺度一般指制图时的比例尺。

3 DEM 地形分析的尺度效应

尺度效应是指由尺度所引起的对象表达和分析结果上的变化。DEM 作为数字化的地形模型, 试图通过离散的方式表达连续变化的地形表面, 必然受到各种尺度的约束, 因而 DEM 及其地形分析具有明显的尺度依赖特征。

DEM 及其地形分析中的尺度特征, 纵向上看有地理尺度、采样尺度、结构尺度、分析尺度等, 之间成级联状态, 层层制约; 从横向上看, 则各种分析尺度的相互交叉, 既相互制约又相辅相成。因此 DEM 及其地形分析尺度效应研究的目的就是认识各种尺度行为发生的条件, 评价尺度行为产生的后果, 从而提高对尺度影响的分析和理解能力。

3.1 地形分析的不确定性

由 DEM 尺度所引起地形分析效应一般包括单尺度效应、边界效应和交叉尺度效应。

(1) 单尺度效应。是指在单一尺度下的地形分析结果随尺度的变化规律, 主要是指 DEM 结构尺度和分析尺度, 包括 DEM 水平分辨率和垂直分辨率、DEM 分析窗口尺度和阈值尺度。

DEM 水平分辨率是 DEM 对地形表面逼近和地形分析的决定性变量, 因此成为目前 DEM 及其地学分析研究的焦点。目前有关这方面研究成果相当丰富, 限于篇幅不再赘述。需要说明的是: 1) DEM 水平分辨率所引起的不确定性研究应考虑 DEM 误差的空间相关性。DEM 误差在空间上是自相关的, DEM 水平分辨率的增大, 表面上看是地形和数据误差的平滑, 实际上是自相关性的减弱。因此不考虑 DEM 误差的空间相关性未必能得出合理的结论^[18]。目前大部分的研究并未涉及这一点; 2) DEM 误差相关性模型及其参数。目前常用的 DEM 误差相关性模型有 Gaussian 模型、指数模型等, 问题的关键不是选用何种模型, 而是如何来确定模型的参数及其效应^[19]; 3) DEM 分辨率所引起的不确定性, 不仅仅局限于 DEM 本身, 更多地应考虑地形分析的不确定性。目前的研究结果均表明地形参数对 DEM 分辨率非常敏感, 但并未揭示地形属性的有效尺度范围。例如 2002 年, 陕西省水土保持部门在黄土高原山川秀美工程规划中, 曾利用 1:5 万比例尺 DEM 进行大于 25 度以上可退耕耕地的面积详查, 实测检验误差竟高达百分之十三^[20]; 2003 年, 在利用“七大江河”1:1 万比例尺 DEM 进行陕西渭河洪水淹没面积的估算中, 也遇到类似的难题^[21]。其中, DEM 数据本身的高程采样精度完全符合生产精度标准要求, 而正是 DEM 水平分辨率与垂直分辨率的尺度效应, 造成了分析结果的误差与不确定性。

DEM 垂直分辨率实际上是一种高程数据的舍入误差, 无论高程数据准确与否, 垂直分辨率的存在将使 DEM 误差增加, 从而导致地形分析结果不确定性的增加。例如垂直分辨率为 1m、水平分辨率为 30m 的 DEM, 当相邻两格网单元高程无变化时, 其坡度为 0; 高程相差 1m 时, 坡度变化为 $1/30=3.3\%$; 相差 2m 时, 坡度变化 6.6% , 等等。如此增量变化对山区的坡度计算问题可能不大, 但对平原地区的影响却是显著的。也就是说在平原地区, 有限的垂直分辨率将不能准确进行地形特征、流域网络、水文参数等的提取。因此在具体应用时, 要考虑垂直分辨率与水平分辨率的比值。而对于特定的应用, 则需进行 DEM 数据定制。垂直分辨率所引起的另一个问题是增加了洼地和平坦区域出现的几率。洼地是当前格网单元低于其周围所有的栅格单元, 它没有物质(如水)的流出路径; 平坦区域是指具有相同高程的相邻格网单元所形成的区域, 在该区域上水流方向是任意的。注

地和平坦区域主要存在于平原微丘区 DEM 中，致使流域网络和地形结构线间断和不正确连通，形成应用 DEM 进行水文和地貌特征分析的障碍。因此在应用 DEM 进行水文、地貌分析中，首先要进行洼地探测和填平处理。

合理的分析窗口尺度有助于提高地形分析结果的精度，既不能过大也不能过小。较小的分析窗口易受 DEM 数据误差和内插方式的影响，特别是当 DEM 误差的空间相关性较小时^[18,22,23]；而较大的窗口尺度则导致用来进行分析的模拟数学曲面不能很好地逼近实际局部地形，从而影响地形分析结果，同时在较大分析窗口中还需建立基于距离的权函数。初步的研究结果表明^①，流行的 3×3 窗口并不是最佳的，较为合适的窗口分析尺度为 7×7 。在实际应用中，选用何种分析窗口，需要对 DEM 数据误差进行必要的相关性分析。

(2) 边界效应。DEM 地形分析的边界效应一般由分析尺度引起。不论采用何种分析窗口，总是以牺牲边界 DEM 单元为代价的，并且随着分析尺度的扩大，外围 DEM 单元损失越多。例如常用的矩形分析窗口中， 3×3 分析窗口时 DEM 区域最外一层单元将不满足分析尺度要求，而 5×5 时则最外两层不满足。另一特例是可视域分析，当视点位于 DEM 边界时，在当前 DEM 区域所计算的可视域和与周围 DEM 区域共同计算的可视域将不一样。DEM 边界效应问题在应用商用 DEM 数据时应予以特别关注。

(3) 交叉尺度效应。由于不同尺度所引起的不确定性并不相同，DEM 尺度之间既相互制约又相互关联，前者如垂直分辨率和窗口分辨率，后者如窗口分辨率和水平分辨率。交叉尺度效应分析就是综合地考虑水平分辨率、垂直分辨率和窗口分辨率中的两者或三者同时发生变化时对地形分析的影响，分析其间联系与差异、相互影响和制约、三者如何交叉影响地形分析结果等。交叉尺度效应研究有望提高平原微丘区的地形分析精度^②。

3.2 DEM 格网单元异质性效应

异质性概念来源于生态学。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，其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。由此 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 水平分辨率和分析窗口尺度。

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地形分析和应用产生影响。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、与实际不符的分析结果，特别是对于复合地形因子（如地貌湿度因子、水力强度因子等）。例如在基于水力强度因子（Stream power index，定义为 $SPI = A_s \times \tan\beta$ ，式中 A_s 为单位汇水面积， β 为坡度）的土壤侵蚀预测中， A_s 和 β 的计算一般是基于格网单元的，而自然状态下的水流聚合于比格网单元更为精细的沟谷，同时沟谷的坡度一般也比两侧山坡的坡度平缓，在这种状态下的土壤侵蚀预测一般与实际相差较大^[24]。

DEM 格网单元异质性研究的难点是异质性的定量表达和与地学模型的耦合。借助于生态学的研究，尽管异质性可通过变异函数、分数维、信息指数等定量表达，但缺少对这些模型的地形解释。异质性的定量信息描述与地学模型的结合，可帮助改进有关的地学模型，并理解这些地学过程及其反馈机制。DEM 格网单元异质性的定量研究、与地学模型

① 刘学军等，DEM 地形分析窗口尺度效应分析，待发。

② 刘学军等，DEM 地形分析联合尺度效应研究，待发。

的耦合以及对相关地学模型的影响分析是 DEM 地形分析需要深入研究的课题。

3.3 DEM 及其地形分析的尺度域和尺度门限

尺度域是指随尺度变化的特定的现象或结构不变或单调变化的区域, 尺度门限是在连续空间尺度上的一些剧烈变化的过渡区, 尺度域由尺度门限分割开来^[25]。

由于目前大多数的应用中, 对 DEM 的理解都是基于格网观点的, 即 DEM 栅格点代表一个栅格单元, 而大部分地形参数如坡度、坡向、曲率、地形湿度因子等都是点位函数, 即定义在点上的值, 这就导致了如下的几个问题: (1) 当前栅格点的高程是否反映了当前栅格单元的高程, 如果不是, 该高程值的有效范围是多大? (2) 基于 DEM 所提取的各个地形参数 (如坡度、坡向、曲率、地形湿度因子等) 是否也具有和 DEM 一致的分辨率? 若不一致, 所计算的地形参数代表多大范围? (3) 在地形特征提取中, 如何设置合理的阈值尺度? 其地形学意义又如何解释?

Hodgson^[26]曾通过数学曲面 DEM 研究了坡度和坡向的所具有的尺度域, 他认为在 3×3 窗口中计算的单元单元的坡度和坡向的有效范围是 1.6~2 倍的 DEM 格网间距, 这里要注意的是他的研究中并没有考虑 DEM 的空间相关性。分析确定地形参数的尺度域和尺度门限, 可揭示地形属性的有效范围和地形含义, 从而防止对 DEM 数据的误用。

DEM 及其地形分析尺度域和尺度门限的确定与 DEM 格网单元异质性效应研究密切相关, 这也是目前 DEM 地形分析研究的薄弱环节。加强这方面的研究, 可在 DEM 产品上加注具体的应用适宜性及限制性标签。即对于现有的 DEM 数据, 能够做什么和不能做什么? 例如用 1km 水平分辨率的 DEM 进行坡度、坡向的运算, 其计算过程的数学意义与 1m 分辨率时的 DEM 没有什么两样, 但所得到的坡度和坡向可能已经不具备地学意义。

4 DEM 地形分析的尺度变换模型

实际应用中, 按照一定尺度生产的 DEM 不一定能够满足需求, 即使可用也不一定是最优的, 因而需要多尺度的方法来组织数据和进行分析, 这也意味着可以采用尺度变换的方式来演绎出多个尺度的地形数据。DEM 地形分析的尺度变换就是实现不同尺度之间的信息转移, 其研究内容包括尺度推绎、尺度反演以及多尺度地形分析模型。

4.1 尺度推绎模型

DEM 地形分析的尺度推绎一般是指不同水平分辨率之间的 DEM 及其地形参数的转移。按照推绎方向, 有尺度上推和尺度下推两类^[27]。尺度上推是从高分辨率到低分辨率的转换过程, 反映地形信息的综合过程和聚集; 尺度下推是从低分辨率到高分辨率的转换, 实质是地形信息的再次分配和配置。

按照转换内容, DEM 地形分析的尺度推绎有直接推绎和间接推绎。直接推绎是基于推绎对象本身, 在充分认识 DEM 地形分析尺度效应机理上, 通过某种数学函数实现在不同分辨率 DEM 之间的信息转换, 这类函数一般有回归分析法、变异函数、自相关分析、频谱分析、小波变换等; 间接推绎不对推绎对象直接进行推绎, 而是对 DEM 本身进行推绎, 即将 DEM 高程数据通过某种变换处理, 形成所需分辨率的 DEM, 然后在变换后的 DEM 进行地形信息提取, 这种变换方式称为重采样, 常用方法有最邻近采样、线性插值、双线性插值、三次样条插值等。间接推绎简单易行, 但结果受重采样方式的制约; 由于尺度变换的非线性以及 DEM 格网单元的异质性影响, 直接推绎往往较为困难^[27]。

DEM 地形分析的尺度推绎要考虑 DEM 格网单元异质性和尺度推绎范围。格网单元

地形变化复杂且各向异性的，是尺度推绎非线性的根本原因。尺度推绎不能无限度地进行，需要考虑地形参数的地学意义，例如将 5m 分辨率上的坡度值推绎至 1km 分辨率上，此时的坡度值意义已经不大，尺度推绎只具有数学意义而不再具有物理意义。

4.2 多尺度地形分析模型

DEM 地形分析是尺度依赖的，多尺度地形分析模型就是建立各类地形参数提取模型与尺度关系，这里尺度的含义是 DEM 水平分辨率。多尺度地形分析模型可在不改变 DEM 水平分辨率环境下通过分析窗口的变化来建立，也可通过动态地形简化而建立^[28]。由于动态地形简化下的多尺度地形分析模型涉及 DEM 数据组织、基于 TIN 的地形分析方法等内容，限于篇幅，这里仅给出作者对前一种方式的部分研究结论。

分析窗口是 DEM 水平分辨率的间接反映。如图 4，设 DEM 水平分辨率为 g ，以当前格网 C 为局部坐标原点，分析窗口采用矩形窗口， C 周围的矩形分析窗口大小为 $k \times k$ (k 为奇数，最小值为 3，最大为 DEM 区域东西方向和南北方向格网数的最小值)，则各个格网点的坐标值可通过 g 来表达，即 $(x_i, y_j) = (ig, jg)$ ，同时各个格网点的高程值也归化到 C 所在的平面格网点高程值减去 C 的高程值。

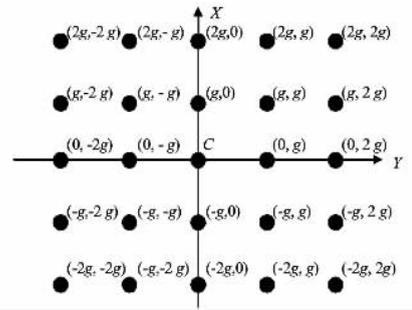


图 4 当前格网 C 的局部窗口坐标系 ($k=5$)

设该局部窗口中的地形区面函数为：

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (1)$$

式中的系数可通过最小二乘原理求解，其法方程为：

Fig. 4 Local coordinator of cell $C(k=5)$

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^4 & \sum x_i^2 y_i^2 & 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 \\ \sum x_i^2 y_i^2 & \sum y_i^4 & 0 & 0 & 0 & \sum y_i^2 \\ 0 & 0 & \sum x_i^2 y_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sum y_i^2 & 0 \\ \sum x_i^2 & \sum y_i^2 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum (z_i - z_s) x_i^2 \\ \sum (z_i - z_s) y_i^2 \\ \sum (z_i - z_s) x_i y_i \\ \sum (z_i - z_s) x_i \\ \sum (z_i - z_s) y_i \\ \sum (z_i - z_s) \end{pmatrix} \quad (2)$$

通过 (2) 式可求出 (1) 式中的各个系数。

借助于 (1) 式可以计算 C 处的坡度、坡向、曲率等地形参数。由于坐标值 (x_i, y_i) 是 DEM 水平分辨率 g 的函数，故 (2) 式中的系数也是 g 的函数，从而通过 (1) 式所建立的地形参数也具有多尺度特征。图 5 是在黄土高原地区的局部 DEM 上通过 (1)、(2) 式

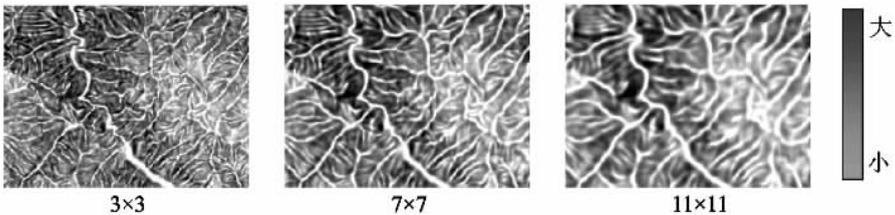


图 5 黄土高原多尺度地形参数 (坡度) 计算示例

Fig. 5 Slope derived from DEM based on multi-scale terrain analysis model

所计算的不同窗口的坡度示意图,从中可看出随着分析窗口的增大,坡度趋于平缓,这将给该地区的退耕还林、水土保持等应用带来不确定性。

4.3 尺度反演模型

实际地形表面上的地形参数如坡度、坡向、曲率等是连续变化的,而通过 DEM 或实地测量所获得这些参数是一定区域的平均值,这个区域大小即观测尺度。各种地学模型、过程和格局都是在一定的地域尺度上发生、观测和建立的,因而保持参数和模型的尺度一致是正确解释地学过程、景观格局的基本前提,否则将无法得到正确结论。例如由于尺度的不匹配^[29], Speight 未能发现土壤湿度和水平曲率之间的关系, Sinai 也没有观测到土壤盐化与高程的关系;又如在基于地形湿度因子(Topographic wetness index, 定义为 $\ln(A_s/\tan\beta)$, 式中 A_s 为单位汇水面积, β 为坡度)的水文模型中,由于平均地下水位深度与 DEM 格网大小成反比,坡面径流与 DEM 格网成正比,在格网间距为 4m 的 DEM 上通过该因子可正确预测地下水位深度,而 16m 的 DEM 上计算出来的因子则完全无效。DEM 尺度反演模型的建立就是为与之相关的各类地学模型选择正确的 DEM 尺度,其内容包括 DEM 结构尺度(水平分辨率、垂直分辨率)和分析尺度(窗口尺度、阈值尺度)。

DEM 尺度反演模型的建立需要结合具体的地学应用,一般有正推法和反推法两种途径。正推法就是先建立各种分辨率的 DEM,并在不同尺度 DEM 进行相应的地学模型建立和分析,然后将所得结果与实测结果进行统计分析和比较,最接近的值所在 DEM 即为最佳分辨率;反推法通过理论推导或实验数据的统计分析,建立 DEM 分辨率与地学模型或参数的关系,从而给出 DEM 分辨率与相关参数的表达式。正推法由于简单而较多被采用。例如 Florinsky 等^[29]通过实验统计方法研究了微尺度上进行土壤湿度分布所需的 DEM 分辨率,并给出具体的实验步骤和方案;在 Florinsky 的基础上, Milbani 等^[19]通过误差传播定律和误差自相关模型研究了基于 DEM 的地形参数的最佳分析窗口; Gyasi-Agyei 等^[30]分析了垂直分辨率和水平分辨率对水文模型的影响后认为,当相邻两格网的高程差与垂直分辨率的比率大于 1 时,DEM 可用来进行流域网络的提取。

5 结语

本文系统地研究了 DEM 及其地形分析中的尺度问题,主要结论如下:1) 提出了 DEM 及其地形分析中的尺度架构,并将其划分为地理尺度、采样尺度、结构尺度、分析尺度和制图尺度等 5 类;2) 在尺度层面分析讨论了 DEM 尺度所引起地形分析效应问题,指出 DEM 地形分析的不确定性、异质性效应及其尺度域和尺度门限是 DEM 尺度研究中需进一步研究的内容;3) 提出 DEM 尺度变换模型的概念体系。

当今,DEM 生产技术逐步成熟和应用范围的日益扩大,使其在国民经济、国防建设和科学研究中发挥越来越重要的作用。值得注意的是,虽然对 DEM 数据的基本特性的研究(包括数据的采集、组织、可视化、精度等)取得了重要的研究成果,并成功地应用在标准化的 DEM 数据的生产中。但是,基于 DEM 的地形分析受到 DEM 数据组织尺度与采样尺度、分析尺度等的制约,目前的应用和研究并未引起足够的重视,集中表现在对 DEM 尺度分类上的不完整性、语义上的易混淆性、研究上的非系统性,以至于经常出现对 DEM 的误用。加强 DEM 地形分析的尺度研究,可对 DEM 地形分析结果的可靠性进行有效判断,为 DEM 产品的应用提供一个标尺,是正确应用 DEM 数据的基本保证;同时这方面的研究也可为相关学科的尺度研究提供可以借鉴的理论和方法。

参考文献:

- [1] Li Zhilin, Zhu Qing, Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Florida: CRC Press, 2005.
- [2] Floriani L D, Magillo P, Puppo E. VARIANT: A system for terrain modeling at variable resolution. *Geoinformatica*, 2000, 4(3): 287~315.
- [3] 李霖, 吴凡. 空间数据的多尺度表达模型及其可视化. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 刘春, 王家林, 刘大杰. 多尺度小波分析用于 DEM 网格数据综合. *中国图象图形学报*, 2004, 9(3): 340~345.
- [5] 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.
- [6] 万刚, 宋长青. 多进制小波及其在 DEM 数据有损压缩中的应用. *测绘学报*, 1999, 28(1): 36~40.
- [7] 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. *测绘学报*, 2001, 30(4): 361~365.
- [8] 王光霞, 朱长青, 史文中, 等. 数字高程模型地形描述精度的研究. *测绘学报*, 2004, 33(2): 169~173.
- [9] Gao J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(2): 199~212.
- [10] Hunter G J, Goodchild M F. Modelling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis*, 1997, 29(1): 35~49.
- [11] Baishawa A, Arvind C. Digital terrain model: Elevation extraction and accuracy assessment. *Journal of Surveying Engineering*, 1997, (5): 71~76.
- [12] Oksanen J, Sarjakoski T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences*, 2005, 31: 1015~1027.
- [13] Wilson J P, Repetto P L, Snyder R D. Effect of data source, grid resolution, and flow routing method on computed topographic attributes. In: Wilson J P, Gannant J C. (eds.) *Terrain Analysis: Principles and Applications*. UK: John Wiley & Sons, 2000. 133~161.
- [14] Zhou Qiming, Liu Xuejun. Analysis on errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computer and Geoscience*, 2004, (30): 369~378.
- [15] Zhou Qiming, Liu Xuejun. Error analysis on grid-based slope and aspect algorithm. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(8): 957~962.
- [16] Lam N S-N. Fractals and scale in environmental assessment and monitoring. In: Sheppard R, McMaster R B. (eds.) *Scale Geographic Inquiry, Nature, Society, and Method*. Blackwell Publishing Ltd., 2003.
- [17] 谢顺平, 都金康, 罗维佳, 邓敏. 基于 DEM 的复杂地形流域特征提取. *地理研究*, 2006, 25(1): 96~102.
- [18] Fisher P F. Improved modeling of elevation error with geostatistics. *Geoinformatica*, 1998, 2(3): 215~233.
- [19] Mlbani M, Klinkenberg B, Andison D W, *et al.* The choice of window size in approximating topographic surfaces from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(6): 577~593.
- [20] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. 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.
- [21] 彭兵. DEM 在渭河洪水淹没面积估算中的应用研究. 西安理工大学硕士论文, 2004.
- [22] Heuvelink G B M. *Error Propagation in Environmental Modeling with GIS*. London: Taylor & Francis, 1998.
- [23] Florinsk I V. Error of signal processing in digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16: 475~501.
- [24] Wilson J P, Gallant J C. *Terrain Analysis Principle and Applications*. New York: Wiley Press, 2000.
- [25] 柏延臣. 遥感信息提取的不确定性和尺度效应研究. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文. 2002.
- [26] Hodgson M E. What cell size does the computed slope/aspect angle represent? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61: 513~517.
- [27] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. *地理研究*, 2005, 24(1): 11~18.
- [28] 周启鸣, 刘学军. *数字地形分析*. 北京: 科学出版社, 2006.
- [29] Florinsky I V, Kuryakova G A. Determination of grid size for digital terrain modeling in landscape investigations: Exemplified by soil moisture distribution at a mirco-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(8): 815~832.
- [30] Gyasi-Agyei Y, Willgoose G, De Troch F. Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology. *Hydrological Processes*, 1995, 9: 363~382.

Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling

LIU Xue-jun, LU Hua-xing, REN Zheng, REN Zhi-feng

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University,
Ministry of Education, Nanjing 210046, China)

Abstract: Digital elevation model (DEM) and terrain analysis based on DEM is scale-dependant. With the view of geoscience analysis and modeling, the paper mainly discusses scale and scale effect of terrain analysis based on grid DEM.

Firstly, the paper outlines five common uses of the term "scale" within DEM and terrain analysis which are geographical scale, sampling scale, DEM structure scale, analysis scale and cartographic scale. The geographical scale means the spatial extent of the DEM or the area of coverage; the sampling scale refers to sampling intervals in DEM data collection; the DEM structure scale refers to the resolution of DEM which includes DEM horizontal resolution and vertical resolution; the analysis scale refers to the analysis extent of local windows including window size and threshold value; and the cartographic scale which is used for map reflects the ration between the measurements on a map and the actual measurement on the ground.

Secondly, the paper's focus is put on the scale effect of terrain analysis based on DEM. In this section, the uncertainty of DEM and terrain analysis caused by the above scales is classified into single scale effect, cross scale effect and boundary effect. One area of terrain analysis that has been largely ignored is the effect of variability of terrain within the bounds of single grid cell that is referred to the heterogeneity effect of DEM grid size in the paper. We pointed out those and discussed the effect on terrain analysis. At the end of this section, the scale threshold which can be used to indicate the effective extend of terrain attributes is discussed.

It is known that the existing DEM with fixed resolution does not always meet the requirement of application. This means that one can deduct more scale terrain models from a fixed resolution DEM. In fact, scaling model can realize the terrain information allocation and aggregation in terrain analysis based on DEM. In this paper, three scaling models including scale deduce model, scale inversion model and multi-scale terrain analysis model are discussed.

Key words: DEM; digital terrain analysis; scale; scale effect; scale inversion