

格网 DEM 地形模拟的形态保真度研究

王 春^{1,2} 刘学军¹ 汤国安¹ 陶 畅¹

(1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京市文苑路 1 号,210046)
(2 滁州学院国土信息工程系,滁州市丰乐南路 80 号,239000)

摘 要:分析了现有格网 DEM 地形模拟的失真现象,研究 DEM 地形模拟失真的根源。提出了 DEM 地形形态保真度的概念,探讨了建设高保真 DEM 必须解决的问题。
关键词:DEM;质量;保真度;形态精度;GIS
中图法分类号:P208

格网 DEM 由于数据结构简单,其生成、计算、分析、显示等方面不仅易于计算机处理,而且与遥感影像具有天然的相合性,因此,得到最为广泛的应用,以至于一提到 DEM,人们往往认为就是格网 DEM。然而,大量应用实例表明,格网 DEM 虽能较好地反映山地和丘陵地区的地形自然起伏特征,但对于自然突变地形和受人类活动影响较大的地形,如梯田、平原微丘地形、陡崖、沟渠、塌陷等,地形形态模拟存在严重的区域性失真问题。失真问题的存在,不仅造成 DEM 无法满足用户对地形模拟保真性的要求,限制了 DEM 的深入发展和自身价值的充分发挥,而且给新一代 DEM 的建设和 DEM 产业化带来困难和压力。

1 现有 DEM 地形模拟的失真现象

分析黄土高原和江南丘陵的国家 1:10 000、1:50 000、1:250 000 和 1:1 000 000 DEM 数据可以看出,DEM 地形模拟存在显著的区域性失真,集中表现在空间位置失真、局地形态失真、地貌特征失真、空间关系失真和多尺度表达失真。

1) 空间位置失真。DEM 地形表达的空间位置精度包括平面位置精度和高程精度。国家 DEM 建设的相关标准明确规定了 DEM 高程及平面位置的精度,如 1:50 000 DEM 高程精度为高程中误差,其平地为 4 m,丘陵地为 7 m,山地为 11 m,高山地为 19 m。然而,实际 DEM 的高

程数值精度并不乐观。文献[1]根据所见大量实验数据提出,所建 DEM“最大误差为均方根差 4~8 倍”,指出“误差中含有明显的系统误差成分”;文献[2]对 1:250 000 DEM 高程数据精度进行比较研究后得出,DEM 高程的最大误差均为国家规定的中误差的 4~9 倍多,这种现象不仅在普通高程点上存在,而且同样存在于三角点和水准点中。文献[3]指出,即便 DEM 格网点高程误差等于零,由于 DEM 是地形的离散采样,DEM 地形表达不可避免地存在地形描述误差。

2) 局地形态失真。局地形态是指局部坡面的凸凹特征和坡面姿态(坡度和坡向)。局地形态的失真一般不会影响到 DEM 高程数值精度,但由于变更了实际地形的形态,会直接造成 DEM 数字地形解译分析错误。现有 1:10 000、1:50 000 DEM 对丘陵、山区等一些具有明显坡度的地形的局部形态具有较好的描述,但在河漫滩、梯田、稻田等缓坡区域、平原微丘等区域,地形坡向的描述显著失真,坡面形态中存在明显的三角网痕迹。此外,现有 DEM 均没有给出明确的地形形态重构模型,对 DEM 模拟地形的形态重构大多凭主观经验。例如,在进行粗格网 DEM 到细格网 DEM 的重采样变换中,用户大多随意选用 GIS 软件中提供的双线性内插模型或三次卷积内插模型。实际上,这两种内插模型均不能给出理想形态的模拟地形表面,本应连续光滑的模拟地形表面出现严重的“龙格”。

3) 地貌特征失真。地貌特征是指对地形总体地貌形态具有标识和控制意义的地形特征点、线和面。能否完整、准确地反映地貌特征,是 DEM 能否进行高保真地形分析或地学分析的决定性因素。此外,局部地貌特征(如局部陡坎、人工边坡等)对 DEM 在遥感影像纠正、遥感反演研究、军事、精细农业等领域的应用具有非常重要的意义。考察现有的 DEM 可以发现,地形特征失真现象普遍存在,主要的表现为地貌特征的缺失、地貌特征的变形、地貌特征的移位和伪地貌特征的产生。

4) 空间关系失真。地形表面是一个严密的三维有序系统,地面点高程的高低变化造就了千姿百态的地形。对于一组确定的高程不同的地形采样点,改变它们的空间位置关系,就可以产生无穷尽的千姿百态的地形。然而,由于现有 DEM 精度评定中全然没有顾及地面点之间的空间关系,仅评价了它们的高程精度,导致 DEM 模拟地形出现许多地形空间关系的失真,主要体现在地形表面的点、线、面的高程序列关系(高程的大小次序及变化程度关系)的错误;导致伪特征地形的出现和地表水流动力、坡面姿态等失真,更严重的会造成地表局地空间拓扑关系的失真,给 DEM 应用的准确性带来很大影响。

5) 多尺度表达失真。不同尺度 DEM 描述了不同层次的地形信息。通过等高线套合、多层面叠加、断面图对比等分析可以发现,1 : 10 000 和 1 : 50 000 DEM 数据较好地保持了地形信息的等级嵌套性,而 1 : 250 000 和 1 : 1 000 000 DEM 地形信息的等级嵌套关系出现明显混乱。

2 DEM 地形模拟失真的根源

DEM 质量内涵的不明确、精度评定方法和量化指标的不完善是造成 DEM 地形模拟失真的根源。

2.1 DEM 地形模拟的对象问题

图 1 是 DEM 构建过程图。显然,实际地形仅是 DEM 地形模拟的逻辑对象,综合地形才是 DEM 地形模拟的实体对象。DEM 地形模拟的核心任务是客观准确地记录和恢复综合地形。DEM 模拟地形与综合地形之间是 DEM 地形形态保真度问题,影响二者精度的主要因素是 DEM 格网属性,尤其是格网大小的设置以及 DEM 的建立方法。综合地形与实际地形之间主要是 DEM 地形模拟的尺度关系问题,影响二者精度的主要因素是地形综合模型和地形复杂程度。

DEM 精度评定结果的差异,甚至矛盾结论的产生,一个关键原因就是混淆了 DEM 地形模拟的逻辑对象与实体对象。

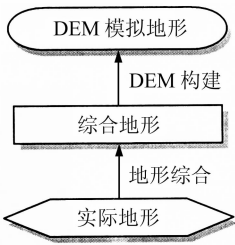


图 1 DEM 构建过程示意图
Fig. 1 Diagram of DEM Construction

2.2 精度评定的内容与量化指标问题

DEM 精度通常定义为 DEM 地形描述的准确性^[3]。在实际分析中,地形模拟准确性的具体内容伴随 DEM 概念的演化而不断变化。早期,DEM 主要应用在工程建设、三维可视化、简单地形因子提取等方面,高程精度是影响应用精度的主要因素,DEM 精度的研究也主要集中在这一领域。目前 DEM 高程数值精度的评定主要有以下 3 种途径。

1) 基于测量误差分析理论的精度评定。该方法的基本观点是 DEM 数据误差由系统误差、随机误差和粗差 3 部分构成,在假定数据不含人为粗差和系统误差时,DEM 数据误差由随机误差构成,满足统计学中的随机误差性质,可以基于有限的检查点用中误差(root mean square error, RMSE)来量化 DEM 数据的整体精度^[1,2,4]。

严格来讲,DEM 高程数值精度是指 DEM 模拟地形单点高程值的准确度,高程数值误差计算时, Z_k 的值应该来自实际地形。现代空间数据获取技术能够保证 Z_k 具有很高的数值采样精度,此时,地形综合程度是影响高程数值误差的主要因素。地形综合程度决定于地形复杂程度、DEM 尺度和地形综合模型,具有显著的空间相关性,直接造成 DEM 高程数值误差具有明显的空间相关性,在本质上已不属于随机误差范畴,不能简单地用 RMSE 来度量。如果 Z_k 的值来自综合地形,不引入系统误差是 DEM 生产方法的基本要求。因此, R_k 与 Z_k 的差值满足随机误差性质, RMSE 能够有效地量化 R_k 精度,但此时的 RMSE 描述的是 DEM 模拟地形和综合地形之间的高程接近程度,并不是 DEM 高程数值精度,除非有确凿的分析证实 Z_k 的值能有效代表实际地形的高程。

图 2 为 Z_k 取值不同时,DEM 格网点高程数

值误差图。原始地形是数学模拟地形,综合地形为基于原始地形采用最小可视元法获取的 1 : 100 000 地形,DEM 通过综合地形的 TIN 模型内插得到。如果 Z_k 是实际地形的高程值, Z_R 与 Z_k 的差值主要取决于地形综合单元内地形起伏变化

的复杂程度,呈现出很强的空间结构性分布;如果 Z_k 是综合地形的高程值, Z_R 与 Z_k 的差值很小,也表现出一定的空间结构性分布特征,这主要是 DEM 规则格网数据结构和 TIN 高程插值模型误差的影响。

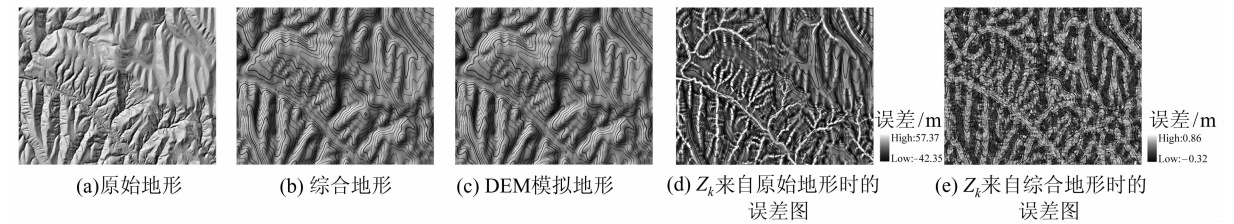


图 2 Z_k 取值不同时,DEM 高程数值误差图,等高线等高距 25 m
Fig. 2 Error Map of DEM Elevation with Z_k Evaluated Differently

2) 基于数学逼近原理的量化分析。在这一方面,文献[2]提出用逼近误差的概念衡量 DEM 数据精度,文献[3]提出地形模拟误差的概念。数学逼近观点将 DEM 看作一个整体曲面加以考虑,而不是局限在独立采样点的层面,更加符合 DEM 地形模拟的本质,是对 DEM 精度评定理论的发展。但由于 DEM 模拟地形逼近的实际对象通常是基于一定的假设进行构造,而构造本身却难以给出有效的精度分析结果,导致基于数学逼近原理的 DEM 精度评定的实际应用还有待于进一步的研究。

3) 基于地形信息量的量化分析。DEM 是地形信息的载体,从 DEM 所蕴含的地形信息角度衡量 DEM 精度也是近年来比较常用的方法,这类量化模型通常结合了 DEM 的具体应用需求。文献[5]基于信息论观点,通过对比不同比例尺 DEM 提取坡度、坡面曲率、平面曲率等地形参数信息容量的变化,以及地形信息熵来反映和评价 DEM 数据的精度。文献[6]基于数据独立方法,分析研究了地形曲面参数计算对 DEM 精度的要求。这类模型的分析结果不仅与应用需求有关,而且依赖于具体分析模型,分析结果的可比性较差。

总体上讲,当前关于 DEM 精度的研究主要存在两方面问题:① 研究内容不够完整,完全忽视了形态保真度问题,导致 DEM 地形模拟的实际精度并不理想;② 精度分析方法不严密,量化指标不完善,精度评定结果自身也难以给出准确的可信度解释。

3 DEM 地形形态保真度的基本概念

DEM 地形形态精度是指 DEM 模拟综合地

形的形态准确性。由于参考基准的不同,高程数值精度与地形形态保真度是完全不同的概念。DEM 高程数值精度在一定程度上是 DEM 地形综合度的反映,地形形态保真度在地形信息层面对 DEM 模拟综合地形的精确程度作出评判。

文献[2]提出,DEM 高保真强调 DEM 对原有对象高程序列的维护,强调 DEM 模拟地形是否保持了由实际三维空间或原始三维数据所具有的在其相邻区域的无冲突的三维特征和高程逻辑。这一论述首次在形态层面构建了高保真 DEM 的基本概念,具有重要的实际意义。但作为高保真 DEM 的精度评定基准,这一定义还存在一些值得商榷的问题。

首先,高程序列关系正确并不意味着地形形态相似。如图 3(a)所示, AB_1C 和 AB_2C 的高程序列关系完全一样,但形态特征截然不同。其次,如果用特征地形对坡面分区,只要坡面点高程与地形特征的高程不发生冲突,跨区坡面点高程序列改变并不会造成对 DEM 地形形态信息的曲解。在图 3(b)中,虽然点 C_2 、 D_2 与点 C_1 、 D_1 的高程序列关系倒置了,但并没有影响地形形态的描述与应用。此外,保真性量化分析的内容是什么,如何进行量化分析,这是问题的关键。

更为重要的是,如果取 $P_1\{x_1,y_1,z_1\}$ 、 P_2

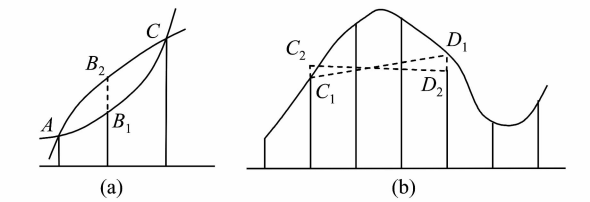


图 3 地形高程序列与形态保真性的关系
Fig. 3 Relation of Elevation Value's Sequence and Morphologic Fidelity

$\{x_2, y_2, z_2\} \in S, \bar{P}_1\{x_1, y_1, \bar{z}_1\}, \bar{P}_2\{x_2, y_2, \bar{z}_2\} \in \bar{S}$ (S 是实际地形, \bar{S} 是 DEM 模拟地形), 由于地形综合的影响, 不存在 $z_1 \geq z_2$ 就必然有 $\bar{z}_1 \geq \bar{z}_2$ 的理论基础。基于这一关系, 高保真 DEM 应该包含两方面内容: ① 客观合理的地形综合。如果确定了地形模拟的尺度, 综合地形必须能够客观、完整、稳定地描述实际地形的地形信息。② 准确稳定的 DEM 地形模拟。也就是说, DEM 地形模拟不仅具有理想的精度(高程数值精度和地形形态精度), 而且地形模拟结果与 DEM 格网的具体布设位置无关。

因此, 顾及地形形态精度的高保真 DEM 的基本标准应该为: 是否完整、准确地记录和描述了地形的宏观地貌特征、局地位置与形态信息, 是否有效维护了地形的三维有序系统, 能否正确、高效地恢复原始地形的三维形态。

4 结 语

DEM 从最初的地表高程值的简单描述, 开始步入高保真数字地形模拟分析时代。实现高保真 DEM 的建设, 必须重点解决好 3 方面的问题: ① 理论基础的完善。DEM 地形数字化描述的基础理论问题的研究严重滞后于技术研究。② 数据模型的优化。规则格网结构是当今 DEM 的主

流数据结构。针对其在地形精细表达上的局限性, 研究者提出了多种数据模型^[7,8]。③ 构建方法的改进。

参 考 文 献

[1] 柯正谊, 何建邦, 池天河. 数字地面模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993

[2] 胡鹏, 杨传勇, 吴艳兰, 等. 新数字高程模型理论、方法、标准和应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007

[3] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形模拟精度量化模拟研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365

[4] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003

[5] 汤国安, 赵牡丹. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830

[6] 刘学军. 基于规则格网数字高程模型解译算法误差分析与评价[D]. 武汉: 武汉大学, 2002

[7] 龚健雅. 整体 SIS 的数据组织与处理[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1993

[8] 朱庆, 李逢春, 张叶廷. 一种改进的三维点集表面重建的区域生长算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(8): 667-670

第一作者简介: 王春, 博士, 副教授, 主要从事 DEM 数字地形分析与应用的不确定性研究。
E-mail: wangchun93@126.com

Morphologic Fidelity of Grid Digital Elevation Model

WANG Chun^{1,2} LIU Xuejun¹ TANG Guoan¹ TAO Yang¹

(1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, 1 Wenyuan Road, Nanjing 210046, China)

(2 Land Information Engineering Department, Chuzhou University, 80 South Fengle Road, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Many factors cause incorrect terrain modeling. The vital reason is the ambiguity of DEM quality concept. It causes the faulty for DEM accuracy assessment and the imprecise altitude interpolate model. Hence, perfecting fundamental theory of digital tertian modeling, improving on DEM processing technology and optimization of DEM data structure are key problems of high fidelity DEM establishment. An important basis is provided for high fidelity DEM establishment.

Key words: DEM; quality; fidelity; morphology accuracy; GIS

About the first author: WANG Chun, Ph. D, associate professor, majors in uncertainty of digital terrain analysis and application of digital elevation models.
E-mail: wangchun93@126.com