

文章编号:1671-8860(2011)05-0568-07

文献标志码:A

数字高程模型误差及其评价的问题综述

吴艳兰¹ 胡海¹ 胡鹏¹ 庞小平¹

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要:从数字高程模型(DEM)传递误差、基于中误差的DEM误差模型及其主要问题、DEM误差分布实验和DEM内插误差新认识几个方面分析了当前DEM误差研究的主要进展,用“中误差”讨论DEM传递误差是建立在测量误差传递理论基础之上的,但沿用“中误差”来讨论DEM内插模型逼近误差和DEM整体误差却缺乏理论依据。DEM误差分布的空间相关性实验对DEM中误差评价法所应具备的随机误差性提出质疑,却可以用基于逼近理论的DEM内插模型来解释,说明用逼近误差理论研究DEM内插误差的途径是正确、可行的。

关键词:DEM误差;传递误差;函数逼近误差;DEM质量控制

中图法分类号:P208

随着新的高精度空间测量技术的出现,基于LiDAR、InSAR和SRTM等新的DEM生产技术得到迅速发展。然而,DEM精度研究却明显落后于人们对其应用的要求^[1]。DEM整体误差包括原始数据传递误差(即DEM传递误差)和DEM内插模型误差两部分^[2-7],并普遍将二者都视为随机误差,以中误差来描述,形成DEM中误差评价,在理论上,用“中误差”描述DEM传递误差、内插模型误差和DEM整体综合误差^[3, 6, 8-10];在生产实践中,用检查点“中误差”法来评价DEM整体误差^[11]。

纵观DEM误差的文献,已有诸多研究者^[5, 12-17]对检查点“中误差”评价法提出质疑。文献[14]指出,“中误差”评价法面临的一大挑战是该方法假设DEM误差传播为一平稳随机过程。因为实际的DEM误差分布具有明显的空间相关性,并不符合随机误差应具备的正态分布^[12, 13, 16, 18-20]。然而,正如文献[5]所指出的“DEM误差分布的形态没有受到太大重视,人们依旧习惯于使用‘中误差’来评价DEM质量”,这使得在原始测量数据已由各种规范保证其质量的情况下,实际DEM的误差却不容乐观,DEM地形模拟存在显著的区域性失真^[21]。

DEM误差问题的关键在于DEM内插模型

误差性质的判定,目前呈现出从中误差评价向内插模型误差逼近理论方向转化的趋势。文献[12, 18-20]严格区分了随机误差与逼近误差的本质,认为DEM内插模型误差属于逼近误差,应采用逼近误差来评价,从而提出基于逼近理论的DEM误差模型,并解释了DEM精度分析中用“中误差”概念无法解释的一些问题。文献[22]也明确指出,要区分用离散点逼近复杂曲线和曲面的逼近误差与离散点自身的量测误差及其传播;文献[23]认为,基于逼近理论的DEM误差模型^[20]可以从理论上解释经验观察中DEM精度与地形复杂性、取样密度之间的关系。分析DEM误差的研究成果有助于讨论和改进DEM精度标准及评定方法,对提高DEM这一基础地理信息产品的质量具有重大现实意义。

1 DEM传递误差研究

目前,获取DEM的手段有多种:传统的地面测量法、地形图等高线扫描数字化、航空摄影测量法、星载InSAR和机载激光LiDAR技术等。虽然后两种方法可直接测量生成DEM(此时,DEM误差就只有测量产生的随机误差),但由于测量点位与格网交点不一致^[14]、信息解译无效^[24]等原

因,仍然无法避免 DEM 内插。因此,无论采用什么方法,高程值内插是 DEM 生产的一个必需的流程。DEM 误差研究必须讨论内插过程所引起的误差,具体包括 DEM 传递误差和 DEM 内插模型误差。

DEM 传递误差即原始数据误差对 DEM 质量的影响,是依内插函数进行误差传播的,属于随机误差,用中误差来描述和评价是合理的(记为 σ_{nod})。目前,讨论 DEM 传递误差主要有三种途径。

1) 按照误差传播律和积分中值定理推导 DEM 传递误差的方差平均值,这是 DEM 传递误差研究的主流途径。文献[2, 8, 9]推导出两点间线性内插、双线性内插和由格网形成的等腰三角网线性内插下 DEM 传递误差的方差平均值分别为 $2\sigma_{\text{nod}}^2/3$ 、 $4\sigma_{\text{nod}}^2/9$ 和 $4\sigma_{\text{nod}}^2/9$;文献[4]得到不规则三角网(TIN)内插算法下的 DEM 传递误差的方差平均值为 $\sigma_{\text{nod}}^2/2$;而文献[3]进一步研究了基于格网的高次内插算法下的误差传播模型,得出原始节点误差在双二次、双三次内插下的传播误差与在双线性内插下的相同(均等于 $4\sigma_{\text{nod}}^2/9$)。同样按照误差传播和积分中值定理,文献[25]推导 4 个格网数据建立的规则格网样条函数 DEM 和 Coons 函数 DEM 的传递误差模型,得出其传递误差与双线性 DEM 模型的传递误差相同的结论,并对不完全双二次插值多项式、双三次插值多项式也利用 4 个格网数据进行验证,发现此时它也等同于双线性 DEM 模型。从而推断:在格网单元上构建 DEM 模型时,若只用到了 4 个格网数据,所得的 DEM 模型等同于双线性 DEM 模型,其传递误差也等于双线性 DEM 模型的传递误差。

2) 依照随机变量的方差定义及期望运算来讨论 DEM 传递误差的方差期望^[10]。由于数学期望本质上反映了离散变量的平均值,2)是将内插点传播误差作为离散随机变量来处理,1)则是将传播误差按连续函数进行积分运算,两个途径推导的结果一致。

3) 文献[19]提出,依照误差定义和绝对值运算的途径从理论上推导 DEM 传递误差的最大值,得出两点间线性内插、TIN 内插和双线性内插下的 DEM 传递误差均不大于原始数据误差 σ_{nod} 。

通过以上三种途径,已基本了解了原始数据误差对 DEM 质量的影响。然而,DEM 产品所呈现的实际误差却不容忽视。文献[26]以 3 个 1:100 万图幅范围内的所有三角点和水准点的高程为参照,分析了由地形图数字化内插生成的 1:25 万 DEM

的精度。结果显示,三角点位置上的高程误差的最大值高达 212.9 m,中误差为 21.4~35.43 m。这说明对于 DEM 实际误差,DEM 传递误差只占一小部分。由此可见,DEM 内插模型误差是 DEM 误差的主要成分,DEM 产品质量提高的关键在于对 DEM 内插模型误差的认知和研究。

2 DEM 误差模型研究及相关问题

2.1 经验法

早期的 DEM 精度研究因无法知晓 DEM 误差机理,主要用经验公式来表达原始数据、内插方法、地形特性和地形表达方法引起的 DEM 误差^[27, 28]。通常,经验模型只适于某特定条件,难以得到普遍适用的模型。后期的经验法往往与其他方法结合,用于估算误差模型中一些无法计算的常数(即经验系数),或根据 DEM 实际误差分布对误差模型进行修正。如文献[2]用经验法估算格网线性内插误差模型中表示地形表面特性的常数 K。文献[6]在文献[8]的误差模型基础上,采用经验法探讨有限格网表达连续地表和 DEM 内插带来的误差,建立 DEM 误差与取样密度、地形粗糙度的经验式,得到 TIN 内插法的 DEM 误差修正模型。

2.2 基于“中误差”的 DEM 误差模型及存在的问题

DEM 误差模型的主要文献[3, 6, 8, 11]普遍将 DEM 整体综合误差表达为:

$$\sigma_{\text{dem}}^2 = k_1 \sigma_{\text{nod}}^2 + k_2 \sigma_{\text{IL}}^2 \quad (1)$$

式中, σ_{dem} 、 σ_{nod} 、 σ_{IL} 分别为 DEM 整体误差、DEM 原始数据误差和 DEM 内插模型误差,它们均以中误差表示; k_1 、 k_2 为系数。

由式(1)可见,DEM 误差模型研究的主流思路可概括为“中误差”法,即除 DEM 传递误差外,DEM 内插模型误差和 DEM 整体综合误差均被认为是由随机误差引起,并沿用测量学中广泛使用的“中误差”来描述,且将 DEM 整体误差表达为 DEM 传递误差和内插模型误差这两类误差的中误差平方和。

采用“中误差”进行 DEM 误差模型研究,有三个问题值得注意。

1) “中误差”的使用与 DEM 内插模型误差的性质存在不协调。各种方法生成的 DEM 都不可避免地受 DEM 内插误差的影响^[14]。DEM 内插的数学基础是二元函数逼近^[2],由于函数逼近所产生的内插值与真函数之间的差异(即 DEM 内插模型误差)在数学上应属于截断误差范畴,它具

有系统性,是与随机误差完全不同的概念,其评价标准是全定义域上的最大误差。因此,沿用“中误差”讨论 DEM 内插模型误差未遵循函数逼近误差理论,在理论方法上存在不协调^[12, 18, 19, 29],导致了实际 DEM 误差分布与“中误差”特性不相符的矛盾。

2) 假设 DEM 误差传播为一平稳随机过程的前提已受到各国学者的质疑。文献[5, 14, 29]等通过研究 DEM 误差的实际分布,指出 DEM 误差分布不符合随机正态分布。文献[30-32]也提出了类似的观点,可以确定,这种与正态分布不相符的情况是一般现象。文献[33]呼吁,DEM 精度研究必须考虑误差的空间变化特性。

3) 难以有效验证 DEM 误差模型。目前,各种研究或根据误差传播理论推导,或将理论推导与实验结合,有时甚至采用相同的研究途径,所得到的 DEM 误差模型存在不同。因此,DEM 误差理论推导的关键是验证假设条件的合理性和误差模型的有效性,但目前很少见到相关研究。正如文献[5]指出的:许多研究单纯致力于误差传播现象,而没有提供 DEM 误差的验证。

2.3 检查点“中误差”评价法

目前,生产中普遍采用检查点“中误差”法来评估 DEM 的精度。每幅 DEM 至少选 28 个检查点,用检查点垂直方向的中误差来描述 DEM 精度。在此基础上,USGS 定义了 DEM 质量的三个等级^[11],我国在 DEM 生产中采用类似方案。

检查点“中误差”法的计算简单,被广泛使用。但是,它的理论依据是式(1),即假设 DEM 整体误差分布为一随机正态分布。这一假设的前提受到怀疑,实际 DEM 误差超过 3 倍标准偏差的观测量出现的频率远远大于正态分布的频率值^[5, 12]。另外,用孤立的很少量(如 28 个)的检查点来评估整个 DEM 质量,其取样的有效性和代表性值得怀疑^[17]。文献[34]通过实验说明,尽管整体上 DEM 平均误差较小,但局部误差可能较大。文献[21]分析了部分国家的 DEM 数据,指出“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、局部地形态失真、地貌特征失真、空间关系失真和多尺度表达失真。”可见,用中误差控制 DEM 整体误差的能力有限,不能描述 DEM 误差分布的空间相关性和分布形状^[5, 15, 32],不能反映最大误差发生的位置^[35]。为此,文献[5]建议增加最小、最大值、中值四分位差等更有效的描述 DEM 误差分布的指标。文献[36, 37]则从地形信息角度提出新的 DEM 精度

量化分析方法。

2.4 等高线回放评价法

应用中,除检查点“中误差”法以外,等高线回放法也是一常用方法。如我国 DEM 生产技术规范规定在计算检查点中误差的同时,还需要用等高线回放法来检验 DEM 质量。另外,文献[38]提出一套 DEM 质量评定标准,具体包括 5 点:
① 原始等高线周围的高程必须等于或约等于原始等高线的高程值(如误差应小于 5% 等高距);
② 两等高线带内的高程值必须介于两等高线的高程之间;
③ 高程带内的 DEM 高程应为两根等高线间高程的线性变化;
④ 具有低地形信息、宽阔的山谷底部或山的平顶特征的区域,其 DEM 高程模式必须反映合理或现实的地貌形态;
⑤ 不合理地貌形态(伪地形)的 DEM 高程分布应控制在整个数据集的一个小比例范围(如小于 0.1% 或 0.2%)。其中,①和⑤是高程误差控制指标,本质上,它们是等高线回放法的体现;②、③、④则是针对内插算法的要求。这套质量评定标准实质上反映了 DEM 应达到的高保真要求。这说明在 DEM 质量控制能力方面,等高线回放法优于检查点“中误差”法。对于等高线回放法的理论依据,文献[12]认为,等高线回放法实质上是采用逼近误差概念来衡量全域出现的最大误差,因此,它能全面地评价 DEM 精度的总体状况和 DEM 与实际地形的吻合情况。

等高线回放法的原理简单、理论依据清晰,但是存在难以量化的问题。原始等高线与回放等高线之间的重合程度是通过检查同名等高线间的平面变形量来反映的。由于不利于计算不规则的两条曲线之间的垂直偏移距离,在等高线回放法量化研究中,一般用同名等高线所围区域的面积来代替。文献[38, 39]提出用同名等高线所围区域的面积(以格网数表示)之差来量化同名等高线的偏离程度;文献[40]基于等高线所围区域的面积计算,创建等高线回放的级差变形总量法;文献[41]在高程面积曲线计算中采用了 Strahler 积分算法,提出 DEM 的 Strahler 积分精度评价模型。此外,不同于等高线面积计算的途径,文献[42]将等高线回放法全部评估的优点与缓冲叠加法的定量方法相结合,实现 DEM 精度的定量评估。这些研究对等高线回放法的量化问题进行了有益的探讨,但具体方法还没有得到普遍应用。生产中,等高线回放法仍主要作为一种定性方法,以人工方式进行操作,通过目视检查逐条对比同名等高线图形的偏差,人工判断其误差分布或手工量测

等高线变形值。

此外,进行 DEM 误差估算方法还有三维图、坡度图等可视化观察法^[17]、误差曲面^[32]、邻域高程比较法^[43]和高程柱状图分析法^[38]等。

3 DEM 误差分布的空间相关性

基于“中误差”的 DEM 误差模型无法满足应用的需要。文献[33]认为,了解误差特性(包含误差分布及其空间结构信息)是具有现实意义的 DEM 误差分析的基础。除了误差模型的理论推导,目前研究 DEM 误差模型的另一主要途径是运用地统计、线性回归等多种手段,结合 DEM 数据,研究 DEM 实际误差分布的空间相关性,构造更为实际的 DEM 误差模型。

1) 地统计分析法。近年来,地统计作为一种研究既具有随机性又具有空间结构性的自然现象的新工具,被用于探讨 DEM 误差的空间相关性、空间格局与变异。文献[14, 15]采用条件随机模型模拟 DEM 误差变量的空间分布;文献[35]利用半变异函数描述和模拟 DEM 误差变量的空间分布结构;文献[32]研究了不同内插法所产生的残差的空间可变性,讨论了 DEM 误差与地形复杂度的关系,并建立了变异模型。

2) 统计回归分析法。文献[44]通过对 DEM 误差进行统计回归分析,得到 DEM 描述误差与 DEM 空间分辨率及其地面粗糙度之间的线性相关模型;采用类似思路,文献[1]得到 DEM 误差与空间分辨率及平均剖面曲率、坡度之间的关系;文献[45]利用空间相关分析、线性回归图、剖面图等技术,得到 DEM 高程误差与高程的空间关系;文献[46]建立了 DEM 误差与坡度、坡向等因素的多元回归模型;文献[5, 47]假设 DEM 误差为二阶平稳高斯随机过程,并用数值和解析方法建立误差模型。

目前,尽管对 DEM 误差分布的空间相关性和变异问题已取得不少进展,但关于产生这些现象的成因却鲜有报道,而现象与成因的相关性研究更是少之又少。

4 对 DEM 内插误差的重新认识

为进一步理解和探讨 DEM 误差分布不符合随机正态分布规律,却与采样密度、坡度、地形粗糙度等因素存在空间相关性的原因,有必要重新思考 DEM 内插误差的性质问题。

如 § 2.1 所述,在 DEM 误差的研究方法上,DEM 生成过程不可避免地采用了属于二元函数逼近的内插方法,但在讨论 DEM 内插误差时,却沿用测量中广泛使用的随机误差方法,不遵循逼近误差理论。

近年来,DEM 内插误差的性质问题得到重新认识,普遍认为 DEM 误差包括粗差、随机误差和系统误差三类^[11],文献[28, 48]等提出不同数据库和地貌类型的 DEM 误差可能呈空间自相关变化的猜想;文献[5, 17]指出内插过程产生似系统误差;文献[44]在假定 DEM 高程采样误差为零的条件下模拟地面与实际地面之差,称为“地形模拟误差”,并通过实验证实,“格网 DEM 对地形的描述误差 E_t 同 DEM 分辨率与反映地形复杂度的因子平均剖面曲率成正相关”;文献[7]提到以 DEM 形式保存的地理空间数据的整体误差既包括建立 DEM 模型过程中原始格网数据传递过来的传递误差,又包括利用插值模型表示地形表面产生的地形模拟误差^[44]。另外,文献[13]在分析 DEM 误差分布呈系统性的原因时提到,TIN 内插中总是用平三角形表示通常为凸形的山顶,其高程往往被低估,而山谷最低处由于用平三角形取代最深谷底细节,其高程往往被高估;文献[6]甚至已将 DEM 内插误差称为地表模型逼近误差。但是,这些研究仍未将逼近误差理论应用于 DEM 内插误差分析,没有从理论上解释地形逼近误差产生的根源。

文献[12, 18-20, 29]从过去为人们所忽视的 DEM 内插本质为函数逼近的角度,重新理解和审视 DEM 内插误差的性质,采用逼近误差理论对 DEM 误差进行研究,提出一套“基于逼近理论的 DEM 误差理论”,主要包括:① 区分随机误差与逼近误差的本质区别,提出并论证了“DEM 内插模型误差不属于随机误差,而属于截断误差,应该采用函数逼近误差理论进行讨论”的观点^[12]。② 按有关插值模型及余项公式,探讨了两点间线性、TIN、双线性这三种常用内插算法的 DEM 内插逼近误差模型^[12, 20]。③ 在两类不同性质误差的融合问题上,不应采用两独立过程的随机误差方式(中误差平方和公式)处理,提出了基于截断误差概念的 DEM 整体误差模型:

$$R_{\text{dem}} \leq R \pm \Delta_e \quad (2)$$

其中, R 是内插函数的截断误差,它有确定的符号和大小; Δ_e 为一随机量,可在 $[0, 3\sigma_{\text{nod}}]$ 中取值。式(2)的物理意义可解释为数字高程模型的误差不大于所用的内插函数在全域的最大逼近误差值

与该域上原始数据误差通过该内插函数传播出来的影响之和^[19]。④建议在现行 DEM 质量控制标准中,用格网点高程最大偏差法取代检查点中误差法,并给出具体的精度标准建议^[19]。

结合 DEM 误差分布实验可以看到,以 DEM 内插误差为截断误差的观点为核心的 DEM 逼近误差论,能够对实验中所呈现的 DEM 误差分布的空间相关性作出理论解释。如 TIN 线性内插算法下,由模型逼近而产生的截断误差公式为^[12, 20]:

$$|R_T| \leq \frac{3}{8} M_2 h^2 \quad (3)$$

式(3)说明截断误差 R_T 与两个因素密切相关:一是三角形的最大边长 h ,它意味着离散点的取样密度;二是区域内地表曲面函数的二阶导数最大模 M_2 ,几何意义是曲面函数的最大斜率变化率,其物理意义是最大的地表曲率。地表曲率是描述地表形态的重要指标,如平地或平斜坡的地表曲率为 0,由式(3)可知,对其进行线性内插所产生的模型截断误差为 0;对于凹型坡或凸型坡,其地表曲率大于 0(即 $M_2 > 0$)或小于 0(即 $M_2 < 0$),此时线性内插所产生的截断误差总是大于或小于 0。

以上关于 TIN 内插所产生的截断误差的理论分析正好与文献[13]用实验方法得到的 DEM 误差表现规律完全一致。以 LiDAR DEM 为参考,文献[13]用核密度估计方法分析 TIN 内插 DEM 的高程误差分布与地形凹凸度的关系,得出凸地形区的高程往往被降低,凹地形区的高程往往被抬高,并解释其原因为:TIN 内插总是用平三角面表示通常为凸形的山顶,因而山顶高程往往被降低。类似地,山谷最低处由于用平三角面取代最深的谷底细节,其高程往往被抬高。本质上,这正是用 TIN 模型模拟地表产生逼近误差的具体表现。

目前,DEM 误差认识正逐渐趋向于 DEM 内插误差逼近论。文献[22]明确指出“GIS 中离散点对真实地形表面的逼近,点 1、点 2(原始点)量测误差对点 M (内插点)的影响可由误差传播定理求出,但与曲线的逼近误差是两种不同性质的误差,不应当混淆”;文献[23]用经验法讨论 LiDAR DEM 中有限离散点模拟连续地形表面而导致的精度损失,认为基于逼近理论的 DEM 误差模型^[20]可以从理论上解释经验观察中 DEM 误差与地形复杂性、取样密度之间的关系。

综上所述,DEM 内插逼近误差模型从理论上

说明 DEM 模型逼近误差不是随机的,而呈系统性,与数据密度、地貌形态特征密切相关,具有空间分布特征。又由于原始数据传播误差只占 DEM 整体误差的一小部分,DEM 整体误差表现为模型逼近误差的规律,而 DEM 误差所具有的这些特性和规律已由许多 DEM 误差实验所证实。

5 结语

DEM 误差来源于原始数据获取和 DEM 内插两个阶段,用测量“中误差”来描述数据获取阶段所产生的随机误差是建立在成熟的测量误差理论基础上的。然而,沿用“中误差”来讨论 DEM 内插阶段产生的地表模型逼近误差却缺乏理论基础,并已导致如许多文献所述的 DEM 实际误差分布与随机误差性质相矛盾的现象。DEM 内插的数学本质是二元函数逼近,用函数逼近误差理论和方法研究 DEM 内插误差,在研究方法上是合理的、科学的。

国内外许多 DEM 实际误差研究结论——DEM 误差分布的空间相关性与 DEM“中误差”评价法相矛盾,但可以用 DEM 内插误差属于模型逼近误差的观点来解释,说明用逼近误差理论研究 DEM 内插误差的途径是正确、可行的。

参 考 文 献

- [1] 王光霞,张寅宝,李江. DEM 精度评估方法的研究与实践[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 73-75
- [2] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 60-108, 218-225
- [3] Shi Wenzhong, Li Qingquan, Zhu Changqing. Estimating the Propagation Error of DEM from Higher-Order Interpolation Algorithms [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(14): 3 069-3 084
- [4] Zhu Changqing, Shi Wenzhong, Li Qingquan. Estimation of Average DEM Accuracy Under Linear Interpolation Considering Random Error at the Nodes of TIN Model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(24): 5 509-5 523
- [5] Oksanen J, Sarjakoski T. Uncovering the Statistical and Spatial Characteristics of Fine Toposcale DEM Error [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(4): 345-369
- [6] Aguilar F J, Aguilar M A, Agüera F, et al. The Accuracy of Grid Digital Elevation Models Linearly Constructed from Scattered Sample Data [J]. International Journal of Geographical Information Sci-

- ence, 2006, 20(2): 169-192
- [7] 王耀革,朱长青,王志伟.数字高程模型(DEM)的整体误差分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2009, 34(12): 1 467-1 470
- [8] Li Zhilin. Theoretical Models of the Accuracy of Digital Terrain Models: An Evaluation and Some Observations[J]. Photogrammetric Record, 1993, 14(82): 651-660
- [9] Li Zhilin. Mathematical Models of the Accuracy of Digital Terrain Model Surfaces Linearly Constructed from Square Gridded Data [J]. Photogrammetric Record, 1993, 14(82): 661-674
- [10] Kyriakidis P C, Goodchild M F. On the Prediction Error Variance of Three Common Spatial Interpolation Schemes[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(8): 823-855
- [11] USGS. National Mapping Program Technical Instructions: Part 2 Specifications, Standards for Digital Elevation Models[OL]. <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/acrodocs/dem/2DEM0198.pdf>, 2007
- [12] 胡鹏,吴艳兰,胡海.数字高程模型精度评定的基本理论[J].地球信息科学,2003,5(3): 64-70
- [13] Bonin O, Rousseaux F. Digital Terrain Model Computation from Contour Lines: How to Derive Quality Information from Artifact Analysis[J]. GeoInformatica, 2005, 9: 253-268
- [14] Castrignanò A, Buttafuoco G, Comolli R, et al. Accuracy Assessment of Digital Elevation Model Using Stochastic Simulation[OL]. http://www.spatialaccuracy.org/2006/PDF/Olteanu20_2006
- [15] Carlisle B H. Modelling the Spatial Distribution of DEM Error[J]. Transactions in GIS, 2005, 9(4): 521-540
- [16] Lopez C. Improving the Elevation Accuracy of Digital Elevation Models: A Comparison of Some Error Detection Procedures [J]. Transactions in GIS, 2000, 4: 43-64
- [17] Wise S. Assessing the Quality for Hydrological Applications of Digital Elevation Models Derived from Contours[J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 1 909-1 929
- [18] 胡鹏,吴艳兰,胡海.再论DEM精度评定的基本理论问题[J].地球信息科学,2005,7(3):28-33
- [19] 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
- [20] Hu Peng, Liu Xiaohang, Hu Hai. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models based on Approximation Theory [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2009, 75(1): 49-56
- [21] 王春,刘学军,汤国安,等.格网DEM地形模拟的形
态保真度研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009, 34(2): 146-149
- [22] 李德仁.对空间数据不确定性研究的思考[J].测绘科学技术学报,2006, 23(6): 391-392
- [23] Aguilar F J, Mills J P, Delgado J, et al. Modelling Vertical Error in LiDAR-Derived Digital Elevation Models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 103-110
- [24] Crosetto M. Calibration and Validation of SAR Interferometry for DEM Generation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 57: 213-227
- [25] 王耀革,朱长青,王鑫.基于多点的规则格网DEM的传递误差分析[J].测绘科学技术学报,2008, 25(6): 436-439
- [26] 王东华,刘建军,商瑤玲.全国1:25万数字高程模型数据库的设计与建库[J].测绘通报,2001(1): 28-31
- [27] Li Zhilin. A Comparative Study of the Accuracy of Digital Terrain Models (DTMs) Based on Various Data Models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 49(1): 2-11
- [28] Östman A. Accuracy Estimation of Digital Elevation Data Banks[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53: 425-430
- [29] 胡鹏,黄雪莲,吴艳兰,等. DEM若干理论问题思考[J].哈尔滨工业大学学报,2006, 38(12): 2 143-2 147
- [30] 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[J].测绘学报,2004, 33(2): 168-173
- [31] Briese C, Pfeifer N, Dorninger P. Applications of the Robust Interpolation Method from DTM Determination[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34(3A): 55-61
- [32] Weng Q. Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models Derived from Topographic Maps[M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 403-418
- [33] Shortridge A M. Characterizing Uncertainty in Digital Elevation Models[M]/ Hunsaker C T, Goodchild M F, Friedl M A, et al. Spatial Uncertainty in Ecology: Implications for Remote Sensing and GIS Applications. New York: Springer, 2001
- [34] Holmes K, Chadwick O, Kyriakidis P. Error in a USGS 30-meter Digital Elevation Model and Its Impact on Terrain Modeling[J]. Journal of Hydrology, 2000, 233: 154-173
- [35] Kyriakidis P C, Goodchild M F. Geostatistics for Conflation and Accuracy Assessment of Digital Elevation Models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13: 677-707

- [36] 王春,汤国安,李发源. 基于 DEM 提取坡谱信息的不确定性[J]. 地球信息科学, 2008, 10(4): 539-545
- [37] 汤国安,赵牡丹,李天文,等. 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 825-830
- [38] Carrara A, Bitelli G, Carla R. Comparison of Techniques for Generating Digital Terrain Models from Contour Lines[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(5): 451-473
- [39] 朱长青,王志伟,刘海砚. 基于重构等高线的 DEM 精度评估模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(2): 153-156
- [40] 范青松,汤翠莲,胡鹏. DEM 精度检查中等高线回放的量化方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 118-120
- [41] 任志峰,刘学军,卢华兴,等. 基于 Strahler 积分的 DEM 精度评价模型[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 119-123
- [42] 秦奋,焦学军. 全面定量评估 DEM 精度的缓冲区叠加法研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3): 336-342
- [43] Felicismo A M. Parametric Statistical Method for Error Detection in Digital Elevation Models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 47(1): 63-69
- [44] 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[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365
- [45] San B T, Süzen M L. Digital Elevation Model (DEM) Generation and Accuracy Assessment from ASTER Stereo Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(22): 5 013-5 027
- [46] Gorokhovich Y, Voustianiouk A. Accuracy Assessment of the Processed SRTM-based Elevation Data by CGIAR Using Field Data from USA and Thailand and Its Relation to the Terrain Characteristic [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 409-415
- [47] Oksanen J, Sarjakoski T. Error Propagation of DEM-based Surface Derivatives[J]. Computers and Geosciences, 2005, 31: 1 015-1 027
- [48] Goodchild M F. Attribute Accuracy[C]/Guptill S C, Morrisson J L. Elements of Spatial Data Quality, International Cartographic Association, Ergamon, Oxford, 1995

第一作者简介:吴艳兰,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为 DEM 误差、GIS 空间分析、海洋划界技术等。

E-mail: wylmq@sina.com

A Review on the Issues in DEM Error and DEM Quality Assessment

WU Yanlan¹ HU Hai¹ HU Peng¹ PANG Xiaoping¹

(1 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We provide an overall review of the present standing of research in digital elevation model (DEM) error, focusing mainly on the four aspects: DEM propagation error, DEM error models based on the measure of mean square error (MSE) and the problems that have arisen in the using of MSE measure, DEM error distribution experiments, and new understanding of DEM interpolation error. It addresses the following viewpoints: the foundation of the use of MSE measure to assess DEM propagation error is error propagation theory, however, using MSE measure to assess DEM interpolation error and the total error lacks a theoretical basis. On the other hand, the spatial patterns of error distribution shown in many DEM error experiments have cast considerable doubt on the usefulness of MSE-based measures, but the spatial property of DEM error can be explained by the DEM error model based on approximation theory. It is correct and feasible to apply approximation theory to discuss DEM interpolation error.

Key words: DEM error; propagation error; approximation error; DEM quality control