

# DEM 地形描述误差场量化分析研究

王 春<sup>1</sup> 汤国安<sup>2</sup> 戴仕宝<sup>1</sup> 江 岭<sup>2</sup> 王 靖<sup>1</sup>

1 滁州学院地理信息与旅游学院,安徽 滁州,239000

2 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京,210046

**摘 要:**借鉴误差椭圆和  $\epsilon$  误差带建模思想,提出了 DEM 地形描述误差(简称为 Et)的中误差场和极值场(统称为 Et 场)模型,研究建立了 Et 场的构建方法,并以平原河网、黄土丘陵、秦岭山地等为例,采用比较分析方法研究了 Et 场的基本特征。

**关键词:**DEM;地形描述误差;误差场;形态精度;质量分析

中图法分类号:P208

文献标志码:A

DEM 误差分析与精度评价长期以来一直是 DEM 研究领域的热点,尤其是 DEM 误差来源、误差估算、粗差探测、精度评定、误差性质及数据质量标准<sup>[1-9]</sup>,部分成果已成功地应用到 DEM 的相关标准中。但现有的 DEM 误差研究依然存在一些比较突出的问题,一是目前的研究未能深入揭示 DEM 场结构特征所引起的 DEM 质量和应用适用性的区域性差异问题,二是未能深入揭示 DEM 地形描述误差对 DEM 地形描述质量的影响特征。DEM 地形描述误差(简称为 Et)是指在 DEM 格网点高程采样误差忽略不计的条件下,由 DEM 离散格网采样点重构的模拟地形表面与自然地形表面点之间存在的高程偏差<sup>[1]</sup>。随着现代对地观测技术的发展,人们能够越来越方便地获得高精度的密集高程采样数据,Et 对 DEM 质量和应用不确定性的影响更为显著,尤其是 DEM 格网比较大时<sup>[10-12]</sup>。目前,关于 Et 的研究仅建立了区域 Et 中误差的初步估算模型<sup>[10-11]</sup>,以及初步展示了 Et 具有与地形部位显著相关的空间结构性分布特征<sup>[12]</sup>,还不足以实现顾及 Et 区域差异特征的 DEM 质量分区评价。因此,本文构建了基于误差场模型的 Et 分析新方法,以期为实现 DEM 质量分区评价提供参考。

## 1 Et 场模型基本概念

DEM 通过有限的离散格网采样数据实现一

定尺度条件下地形的近似表达,DEM 地形曲面的每个点不可避免地都含有不同程度的地形描述误差,从而使得 DEM 地形曲面的高程值围绕其真实高程值上、下波动。因此,借鉴误差椭圆和  $\epsilon$  误差带建模思想,也可以构建描述 Et 分布情况的 Et 场。所谓 Et 场,就是指依据 DEM 地形曲面点的 Et 的中误差、平均值、极大值、极小值等信息,制作一个 Et 信息矩阵序列,其数学描述为:

$$Et_{DEM} = \begin{bmatrix} d_{m,j} & \cdots & d_{m,n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{0,0} & \cdots & d_{0,n} \end{bmatrix}$$
$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

式中, $d_{i,j}$  为 Et 的中误差、平均值、极大值、极小值等; $m$ 、 $n$  为 Et 信息矩阵的行数和列数。

如图 1 所示,Et 场实质是由 Et 波动范围构成的具有一定厚度的误差壳,主要描述 DEM 地形曲面围绕实际地形的上、下波动程度。由于 Et 的存在,DEM 地形曲面不可避免地围绕实际地形曲面,在 Et 误差壳上界和下界所限定的厚度范围内上、下波动。本文把 Et 的中误差和平均值配对形成的 Et 误差壳称为 Et 中误差场,主要用于描述 Et 的聚集程度、波动大小及 Et 是否存在系统性的削峰或填谷现象;把 Et 极大值和极小值配对形成的 Et 误差壳称为 Et 极值场,主要用于描述最恶劣条件下,DEM 地形曲面点会高出和低于实际地形曲面点的程度。

收稿日期:2013-04-09

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001301,40930531,41201415);国家教育部科学技术研究重点资助项目(212078);安徽省高校省级自然科学基金重点资助项目(KJ2010A250)。

第一作者:王春,博士,副教授,主要从事 DEM 数字地形分析与 GIS 集成应用技术研究。E-mail:wangchun93@126.com

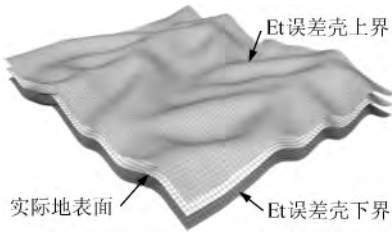


图 1 Et 误差壳示意图

Fig.1 Diagram of Et Error Layer

### 2 Et 场的构建方法

如图 2 所示,  $A_1$ 、 $B_1$  两点为 DEM 格网点, 两点的连线为 DEM 模拟地面, 假定在这两点的高程采样误差为零, 则  $Et_C$ 、 $Et_D$  和  $Et_E$  分别为 DEM 在  $C$ 、 $D$ 、 $E$  三点的描述误差<sup>[1,9]</sup>。

实际中, 地面点  $C$ 、 $D$ 、 $E$  空间位置是固定的, 但 DEM 格网作为数学格网, 其位置取决于起始基准点和格网大小, 即便限定了 DEM 格网分辨率, 其与地面点之间也有无穷多的位置关系, 如图 2 中的  $A_1$ 、 $B_1$  和  $A_2$ 、 $B_2$  就是完全不同的两个 DEM 格网布设位置, 而且在每一个不同布设位置的 DEM 中,  $C$ 、 $D$ 、 $E$  都可能会对应着一组完全不同的  $Et$  值(简称为  $Et_{i,j}$ ,  $i$  为不同 DEM 格网布设方案的编号)。与测量误差一样, 单个  $Et_{i,j}$  值并不具有实用价值, 要获得  $P$  在确定格网分辨率的 DEM 中精度信息, 须计算出  $Et_{i,j}$  的相关统计指标, 进而建立该格网分辨率 DEM 的  $Et$  场。

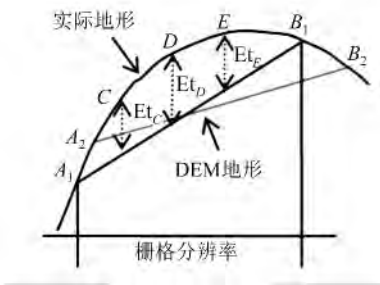


图 2 Et 示意图

Fig.2 Diagram of Et

#### 2.1 任意地面点 P 的单个 $Et_{i,j}$ 值的计算

理论上, 计算  $Et_{i,j}$  值时先要基于 DEM 完成地形曲面重构, 即基于 DEM 建立一个连续数字曲面, 然后解算出  $P$  点在该 DEM 地形曲面上的高程值(记为  $H_{p,i}$ ), 假定  $P$  的实际高程为  $h_p$ , 则  $P$  的  $Et_{i,j}$  值为  $Et_{i,j} = H_{p,i} - h_p$ 。由于地形曲面的复杂性, 实际应用中通常是借助双线性内插或三次卷积内插模型解算出 DEM 地形曲面上  $P$  点

的高程。双线性内插模型由于算法简单、结果歧义性小, 得到广泛应用。因此, 本文也采用双线性内插模型完成  $H_{p,i}$  值解算, 计算公式为:

$$H_{p,i} = h_1 + (h_2 - h_1)\bar{x}_p + (h_4 - h_1)\bar{y}_p + (h_1 - h_2 + h_3 - h_4)\bar{x}_p\bar{y}_p$$

式中,  $\bar{x}_p = (x_p - x_1)/d$ ;  $\bar{y}_p = (y_p - y_1)/d$ ;  $d$  为 DEM 格网大小;  $h_i$  为高程。

#### 2.2 单点 Et 中误差、平均值、最大值、最小值的计算

文献[9-10]给出的  $Et$  中误差(简称为  $RMS_{Et}$ )的估算模型主要用于估算区域  $RMS_{Et}$ 。考虑到地面点  $P$  点与 DEM 格网有无穷多的位置关系(如图 3 所示), 因此, 对于一个已确定格网分辨率的 DEM, 需要不断变换 DEM 格网位置, 从而计算出在该格网分辨率的 DEM 中地面点  $Et$  的相关统计指标。

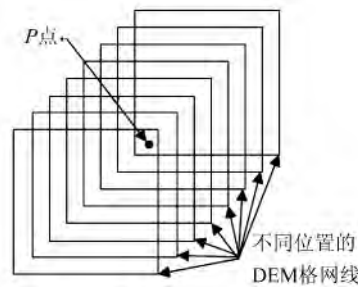


图 3 地面点 P 与 DEM 格网关系示意图

Fig.3 Diagram of Relationship Between a Terrain Point P and Grids of DEM

$$RMS_{Et} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n Et_{i,j}^2 / n}$$

$$Mean_{Et} = \sum_{i=1}^n Et_{i,j} / n$$

$$Max_{Et} = \max\{Et_{1,j}, Et_{2,j}, \dots, Et_{n,j}\}$$

$$Min_{Et} = \min\{Et_{1,j}, Et_{2,j}, \dots, Et_{n,j}\}$$

式中,  $n$  为不同位置的 DEM 布设数量。

本文以 1:1 万的 1 m 格网分辨率的 DEM 为参考真值, 分别完成 2 m、5 m、7 m、10 m、15 m、25 m、35 m、...、1 005 m 格网分辨率 DEM 的  $Et$  信息计算。

记参考真值 DEM 的格网分辨率为  $d$ , 如图 4 所示, 基于参考真值 DEM, 采用抽点法获得  $2d$  格网分辨率的 DEM, 则总共可有 4 种格网布设方法; 采用抽点法获得  $3d$  格网分辨率的 DEM, 则总共可有 9 种格网布设方法。图 4 中, 格网内编号为不同格网点布设方案编号, 以此类推, 如果采用抽点法获得  $kd$  格网分辨率的 DEM, 则总共可有

$k^2$ 种格网布设方法。

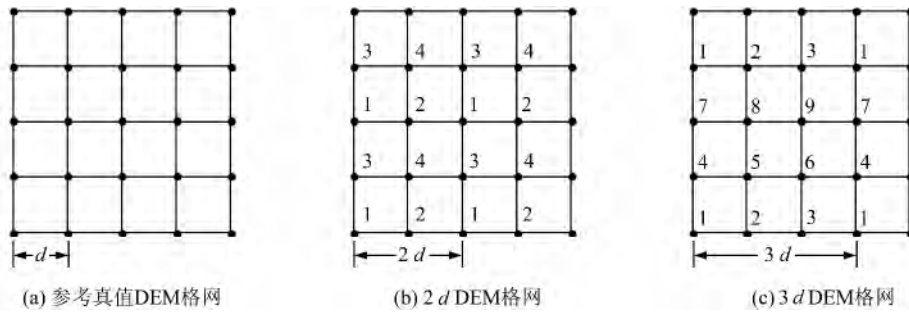


图4 不同基准点位置的 DEM 格网布设方案示意图

Fig. 4 Diagram DEM Grid Layout with Different Datum Points

### 2.3 Et 场的建立

根据上述计算获得 Et 中误差、平均值、最大值、最小值数据矩阵分别描述为：

$$\begin{aligned}
 \text{RMS}_{\text{Et}_{\text{DEM}}} &= \begin{bmatrix} \sigma_{m,j} & \cdots & \sigma_{m,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \sigma_{0,0} & \cdots & \sigma_{0,n} \end{bmatrix} \\
 i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \\
 \text{Mean}_{\text{Et}_{\text{DEM}}} &= \begin{bmatrix} m_{m,j} & \cdots & m_{m,n} \\ \vdots & & \vdots \\ m_{0,0} & \cdots & m_{0,n} \end{bmatrix} \\
 i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \\
 \text{Max}_{\text{Et}_{\text{DEM}}} &= \begin{bmatrix} A_{m,j} & \cdots & A_{m,n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{0,0} & \cdots & A_{0,n} \end{bmatrix} \\
 i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \\
 \text{Min}_{\text{Et}_{\text{DEM}}} &= \begin{bmatrix} B_{m,j} & \cdots & B_{m,n} \\ \vdots & & \vdots \\ B_{0,0} & \cdots & B_{0,n} \end{bmatrix} \\
 i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

式中,  $m, n$  为 Et 信息矩阵的行数和列数。

图 5 为 Et 中误差场断面图。建立 Et 中误差场时,首先在参考真值 DEM 上叠加 Et 中误差矩阵,形成新的 DEM 曲面;然后,以该曲面为基准面,以中误差矩阵中的数据为厚度标准绘制 Et 中误差场的上界面与下界面。

图 6 为 Et 极值场断面图。建立 Et 极值场时,直接以参考真值 DEM 曲面为基准面,在其上方以最大值矩阵中的数值为厚度标准绘制 Et 极值场的上界面,在其下方以最小值矩阵中的数值为厚度标准绘制 Et 极值场的下界面。

## 3 实验测试与分析

为更好地说明 Et 场的特征,实验以平原河

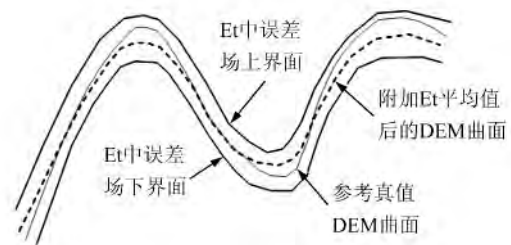


图 5 Et 中误差场断面图

Fig. 5 Profile Map of Et RMS Field

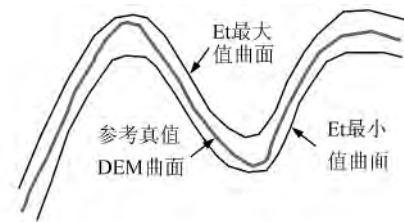


图 6 Et 极值差场断面图

Fig. 6 Profile Map of Extremum Field

网、黄土丘陵、秦岭山区地形的 1:1 万地形图为基准数据(见图 7),按照国家由地形图生产格网 DEM 的技术流程生成 1 m 和 5 m 的 DEM。5 m 是 1:1 万 DEM 的标准格网分辨率,建立 1 m 格网大小的 DEM 主要是作为后续分析的参考真值。

### 3.1 Et 空间分布的变化特征

图 8 是以 25 m 和 125 m DEM 为例的平原河网、黄土丘陵、秦岭山区的 Et 中误差、Et 平均值、Et 最大值、Et 最小值空间分布示意图。其他格网分辨率 DEM 的 Et 场变化与此类似。

图 8 表明,Et 中误差、平均值、最大值、最小值,均呈现显著的空间结构分布特征,其量值大小不仅与 DEM 格网相关区域的地表形态复杂度密切相关,且随着 DEM 格网的增大,其空间结构性分布特征也越显著。

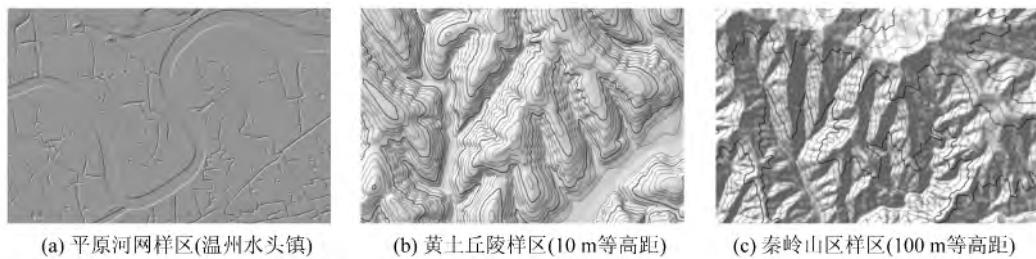


图 7 实验样区地形变化示意图

Fig. 7 Sketch Maps of Terrain Features of Test Areas

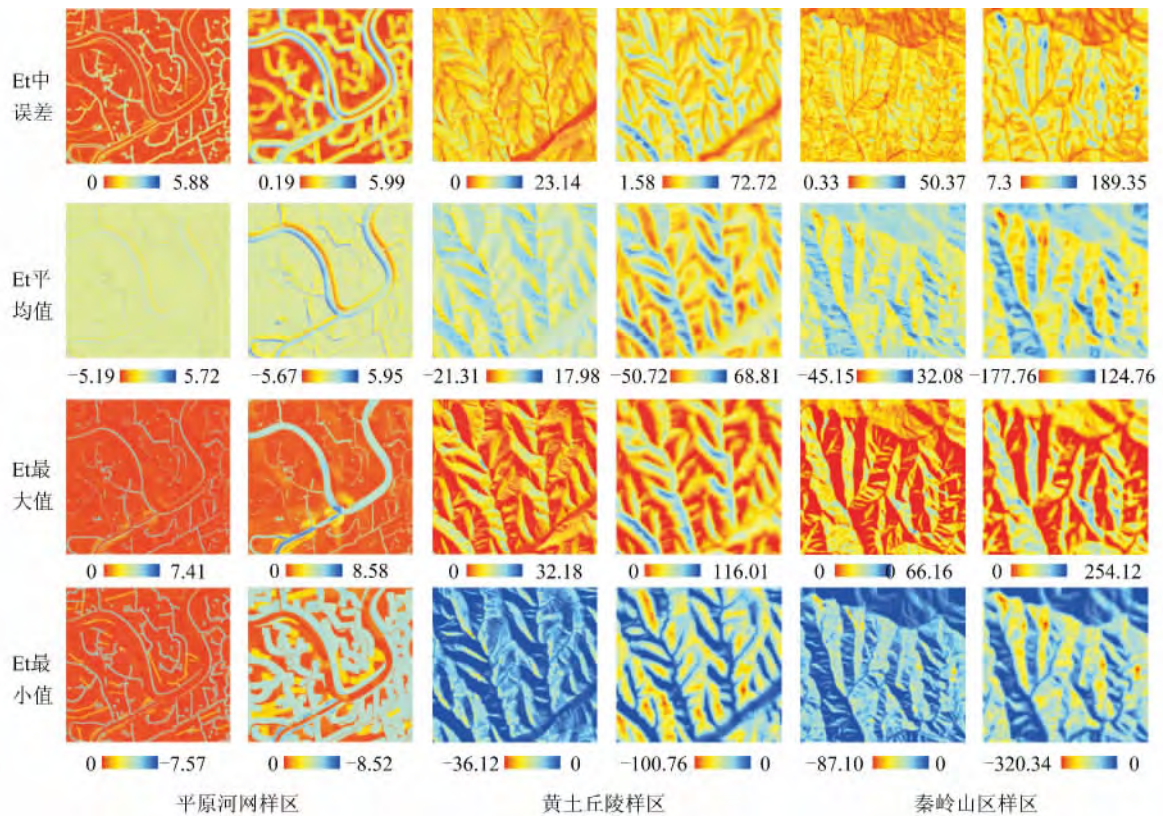


图 8 实验样区 Et 场信息空间分布图(左为 25 m DEM,右为 125 m DEM)

Fig. 8 Spatial Distribution Maps of Et Information for Test Areas

### 3.2 Et 统计值的变化特征

图 9 是实验样区不同格网分辨率 DEM 的 Et 统计值变化图。图 9 中,①为 Et 最大值曲线,②为 Et 中误差曲线,③为 Et 平均值曲线,④为 Et 最小值曲线。进一步实验分析表明,对于确定尺度的地表形态,无论单点还是区域,Et 中误差呈现图 9(d)所示的“∫”曲线变化特征。取该曲线 4 个较大变化点为分割点,Et 中误差曲线可以分为 5 个变化区间。一是 OA 段的极缓变化区,在该区域内提高 DEM 格网分辨率,仅会增加 DEM 的数据冗余,不会有效降低 Et 值;二是 AB 段的凹曲线变化区,在该区域内 Et 值随着 DEM 格网的增大加速增长;三是 BC 段的线性线变化区,在该

区域内 Et 值随着 DEM 格网的增大近似线性增长,这一结果与文献[10-11, 3]的研究结果相吻合;四是 CD 段的凸曲线变化区,在该区域内 Et 值随着 DEM 格网的增大呈减速增长趋势;五是 D 点以后的近似水平线变化区,在该区域内 Et 值随着 DEM 格网的增大无限趋近于一个常量,不再随 DEM 格网的增大而显著变化。研究表明,一是在 BD 段,DEM 格网分辨率对 Et 值具有显著影响,应慎重设置 DEM 格网分辨率;二是 A、B、C、D 点的实际位置与区域地表形态复杂度密切相关,具体的估算模型还有待进一步研究。

图 9 中的 Et 平均值曲线表明,Et 具有一定的系统误差特征。在正地形(凸地形)比重较大地区,Et 平均值为负值;在负地形(凹地形)比重较

大地区,  $E_t$  平均值为正值。且地形起伏度越大,  $E_t$  平均值的绝对值也越大。上述现象在  $E_t$  平均值的空间分布图显示得更为突出。

图 9 中的  $E_t$  最大值、最小值曲线表明,  $E_t$  最大值、最小值在开始阶段随 DEM 格网的增大而

持续增大。可以推断, 当 DEM 格网增大到一定程度后,  $E_t$  最大值、最小值也无限趋近于一个常量, 不再随 DEM 格网的增大而显著变化。理论上该常量应该为该区域的最大起伏度值。

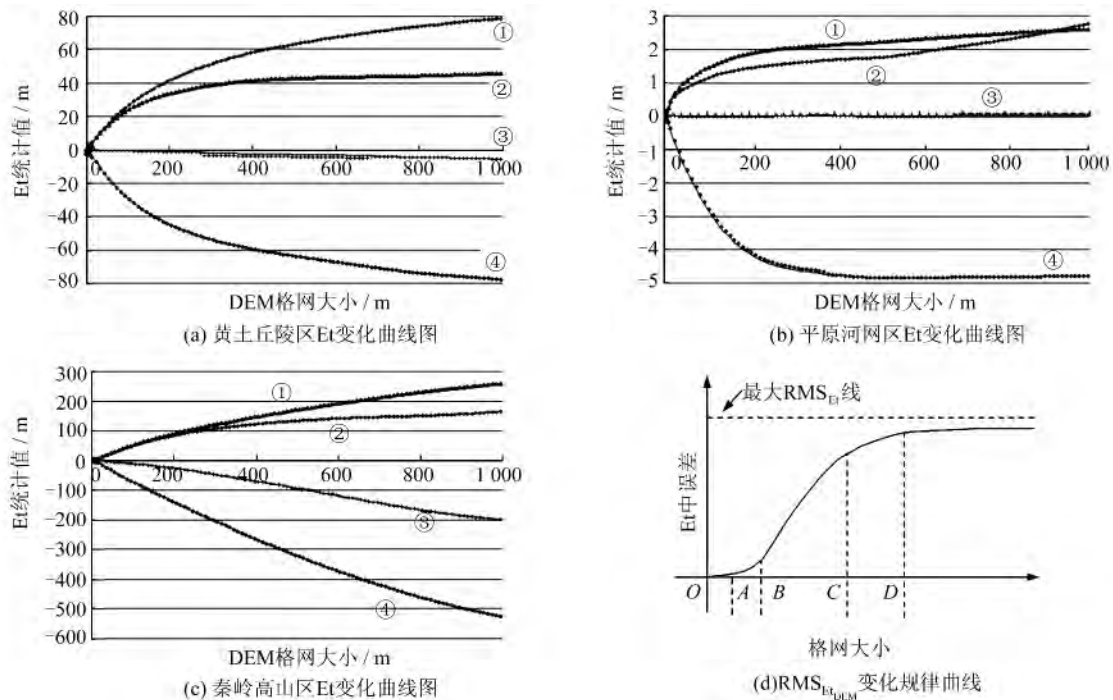


图 9 实验样区不同格网分辨率 DEM 的  $E_t$  统计值变化图

Fig. 9 Change of  $E_t$  Statistics Derived from DEM with Different Resolutions for Test Areas

## 4 结 语

1) 场模型是 DEM 的本质结构特征。Et 场的建立, 在准确描述 DEM 地形描述误差同时, 更为直观准确的反映了 DEM 误差的空间分布特征, 为实现顾及不同地形部位与高程精度的 DEM 数字地形分析误差传递推演与精度评定奠定了一定基础。

2) 在地表形态复杂区域,  $E_t$  随着 DEM 格网的增大急剧增大, 成为影响 DEM 地形描述质量的主要因素, 并且使得即便是同样格网分辨率的 DEM, 其地形描述结果与实际 DEM 格网点布设位置密切相关。因此, 如何适度调整 DEM 格网点采样误差, 从而减弱  $E_t$  的影响, 实现精度最优的系列尺度 DEM 构建, 值得深入研究。

3) 研究表明, 一是对于任何确定尺度的地表形态, 随着 DEM 格网分辨率的增大,  $E_t$  中误差呈现“ $\int$ ”曲线变化特征, 即 DEM 地形描述存在最佳格网分辨率阈值(“ $\int$ ”曲线的 A 点附近)和最大  $E_t$  限差阈值。二是现有的  $E_t$  中误差估算模型

的精度不容乐观, 问题根源在于缺乏区域地形复杂程度的有效度量指标, 要实现高精度的  $E_t$  相关信息估算, 首先要解决区域地形复杂程度的准确量化模拟问题。

## 参 考 文 献

- [1] Tang G A. A Sensitivity Analysis of Errors in Digital Terrain Models[D]. Salzburg: Salzburg University, 1998
- [2] Li Zhilin. Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modeling[D]. Glasgow: The University of Glasgow, 1990
- [3] Li Zhilin. Mathematical Models of the Accuracy of Digital Terrain Model Surfaces Linearly Constructed from Square Gridded Data[J]. *Photogrammetric Record*, 1993, 14(6): 661-674
- [4] Zhu C Q, Shi W Z, Li Q Q. Estimating of DEM Accuracy Under Linear Interpolation Considering Random Error at Nodes of TIN Model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(24): 5 509-5 523
- [5] Fisher P F, Tate N J. Causes and Consequences of Error in Digital Elevation models[J]. *Progress in*

- Physical Geography*, 2006, 30(4): 467-489
- [6] Hu Peng, Yang Chuanyong, Wu Yanlan, et al. New DEM Theories Methods Standards and Application[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007(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)
- [7] Wang Yaoge, Wang Zhiwei, Zhu Changqing. Analysis of Digital Terrain Error Based on Spatial Autocorrelation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1 259-1 262 (王耀革, 王志伟, 朱长青. DEM 误差的空间自相关特征分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12): 1 259-1 262)
- [8] Wang Chun, Liu Xuejun, Tang Guoan, et al. Morphologic Fidelity of Grid Digital Elevation Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 46-49(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): 46-49)
- [9] Hu Hai, Wu Yanlan, Hu Peng. Discussion of DEM Standards, Quality Theory and Conceptions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 713-717(胡海, 吴艳兰, 胡鹏. 数字高程模型精度标准、质量理论和科学观念讨论[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(6): 713-717)
- [10] Tang Guoan, Gong Jianya, Chen Zhengjiang, et al. A Simulation on the Accuracy of DEM Terrain Representation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 361-365(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)
- [11] Wang Guangxia, Zhu Changqing, Shi Wenzhong, et al. The Further Study on the Accuracy of DEM Terrain Representation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(2): 168-173(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)
- [12] Tang Guoan, Zhao Mudan, Cao Han. An Investigation of the Spatial Structure of DEM Errors[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2000, 30(4): 349-352(汤国安, 赵牡丹, 曹茜. DEM 地形描述误差空间结构分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, 30(4): 349-352)

## Quantitative Analysis of DEM Terrain Representation Error Field

WANG Chun<sup>1</sup> TANG Guoan<sup>2</sup> DAI Shibao<sup>1</sup> JIANG Ling<sup>2</sup> WANG Jing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geographic Information and Tourism College, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

**Abstract:** Based on the modeling of error ellipses and  $\epsilon$  error bands, we present a model for the Et field which includes REM field and the extremum field, where Et is the DEM terrain representation error. Then, a construction method of Et field is established. Taking the terrain of plain river network, loess hill and Qinling mountains as test data, we analyze the basic characteristics of the Et field by a comparative analysis method. Experimental results show Experimental results show the conclusions as follows: (1) the Et field could reflect the spatial distribution of DEM terrain representation error intuitively and accurately and deserves to research. (2) Et is closely related to the landform complexity of the area presented by DEM and presents significant spatial structure distribution characteristics. Meanwhile, RMS of Et shows a feature of the curve with the resolution of DEM increasing. (3) As the unoptimistic accuracy of existing RMS estimation models of Et, the quantitative simulation of the regional topographic complexity should be completed scientifically and accurately at first to achieve the high-accuracy RMS estimation of Et.

**Key words:** DEM; terrain representation error; error field; morphological accuracy; quality analysis

**First author:** WANG Chun, PhD, associate professor, specializes in DEM digital terrain analysis and the integration of multi-source spatial data application technology. E-mail: wangchun93@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 40930531, 41001301, 41201415; Key Project of Chinese Ministry of Education, No. 212078; the Provincial Natural Science Foundation Project of Anhui, No. KJ2010A250.