

# 数字高程模型地形描述误差的量化模拟 ——以黄土丘陵沟壑区的实验为例

张 勇<sup>1</sup>, 汤国安<sup>1,2</sup>, 彭 亮<sup>1</sup>

(1. 西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710069;

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 本研究以陕北黄土高原丘陵沟壑区为试验样区, 综合运用统计分析及比较分析的原理与方法, 通过数学模拟、对比分析、误差可视化分析, 研究不同空间尺度下 DEM 地形描述误差的数学转换模型。实验结果证明, 目前适用于欧洲地区的地形描述误差的模拟方程  $Et_D = q \cdot a \cdot (Et_B)^b$ , 经过参数的修正, 在我国黄土高原丘陵沟壑区具有较高的模拟精度。该模型的建立可以实现应用低空间分辨率的 DEM 数据在栅格水平模拟高空间分辨率 DEM 所提取的地形描述误差, 从而, 在一定精度范围内大大提高  $Et$  的计算速度和计算效率。并且, 对我国其它地貌类型区类似模型的建立, 都具有重要的参考意义。

**关键词:** DEM; 地形描述误差; 分辨率; 模拟

**中图分类号:** P931; P208

**文献标识码:** A

数字高程模型(DEM)是地理信息系统地理数据库中最为重要的空间信息资料和赖以进行地形分析的核心数据系统。目前世界各主要发达国家都纷纷建立了覆盖全国的 DEM 数据系统, 我国也建立了基于 1: 25 万地形图和 1: 5 万地形图的全国 DEM 数据库, 其它类型的 DEM 也正在积极建设之中。DEM 已经在测绘、资源与环境、灾害防治、国防等与地形分析有关的科研及国民经济各领域发挥着越来越巨大的作用。然而, 各类 DEM 误差的存在不同程度的影响着分析与应用结果的可信性。强化对 DEM 的精度及其数据不确定性问题的研究, 从而为有关遥感、GIS 空间分析提供科学合理的质量标准, 具有重要的意义。

自 1980 年代以来, 对 DEM 精度问题的研究取得了一些重要的成果。Fisher (1990), Li Z. (1991, 1993), Brown and Bara (1994), Felicísimo (1994), Veregin H. (1997) 及 Lay J. G. (1993) 等从不同侧面

进行了 DEM 高程采样误差的成因分析; Monckton (1994), Wood (1996) 等评价了 DEM 误差的量化与检测方法、DEM 误差的空间分布与表达方法; Felicísimo (1995) 及 Gao (1997) 等提出了对 DEM 误差进行估算的数学模拟方法<sup>[1~6]</sup>。然而, 在 DEM 误差的分类体系和 DEM 空间分辨率与地形复杂度对 DEM 地形描述精度的影响等问题上, 还需作进一步的深入的探索。

然而以往对于 DEM 不确定性的研究过分侧重其采样点的高程误差, 而相对忽视 DEM 地形描述误差的存在及其对应用的影响。汤国安 (1998) 首次提出了 DEM 地形描述误差的概念, 并对误差分类以及误差的宏观数学模拟方法进行了深入的研究, 这对于 DEM 精度的宏观估算具有十分重要的意义<sup>[7~9]</sup>。然而, 在实际工作中往往还需要估算误差在具体栅格点位的大小, 即解决 DEM 误差的微观模拟问题。汤国安 (1998) 同时提出了适用于欧洲的

收稿日期 (Received date): 2002- 11- 12; 改回日期 (Accepted): 2003- 02- 21。

基金项目 (Foundation item): 测绘遥感信息工程国家重点实验室高级访问学者基金项目, 中国博士后科学研究基金项目 [Supported by High Visiting Scholar Fund of National Laboratory for Information Engineering in Survey, Mapping and Remote Sensing and China Post Doctoral Fund]

作者简介 (Biography): 张勇 (1977- ), 男, 陕西镇巴人, 现为西北大学城市与资源学系硕士研究生, 主要从事 GIS 与遥感应用技术研究, zhangqr1@yahoo.com.cn。 [ZHANG Yong (1977- ), male, was born in Zhenba county Shaanxi Province, PRC. Now he is a postgraduate student of department of urban and resources science, Northwest University. His research interesting now is major in the technologies of GIS, RS and their applications. E-mail: zhangqr1@yahoo.com.cn]

微观数学模型和一套完善的地形描述误差提取方法。本研究在提出 DEM 地形描述误差概念的基础上, 以陕北黄土高原丘陵沟壑区为试验样区, 综合运用统计分析及比较分析法的原理与方法, 研究不同空间尺度下 DEM 地形描述误差的数学模拟模型。该模型的建立可以实现应用低空间分辨率的 DEM 数据在点位上微观模拟高空间分辨率 DEM 所提取的地形描述误差, 从而在一定精度范围内大大提高  $E_t$  的计算速度和计算效率。

# 1 研究工作基础

## 1.1 DEM 地形描述误差的概念

DEM 精度是指所建立的 DEM 对真实地面描述的准确程度 (Burrough, P. A. 1986)。DEM 误差的大小被普遍视为衡量 DEM 精确性的标准<sup>[10]</sup>。然而, 人们在对该问题的认识上存在着明显的偏差, 以往的研究普遍重视 DEM 在采样点上出现的高程误差, 而相对忽视由于 DEM 离散采样所造成的地形描述误差。无疑, 高程采样误差是影响 DEM 精度的重要因素, 但不是唯一因素。因为即使 DEM 在所有高程采样点上的误差均为零, 有限的 DEM 栅格采样点所构成的数字高程模型也只能是对实际地面的近似模拟。可以将这种在假定 DEM 高程采样误差为零条件下, 模拟地面与实际地面之间的差异, 定义为 DEM 地形描述误差。如图 1 所示, A、B 两点为 DEM 地面高程采样点, A、B 两点的连线为 DEM 模拟地面, 假定在该两点的高程采样误差为零, 则  $E_{tC}$ 、 $E_{tD}$  及  $E_{tE}$  分别为在 C、D、E 三点的地形描述误差。

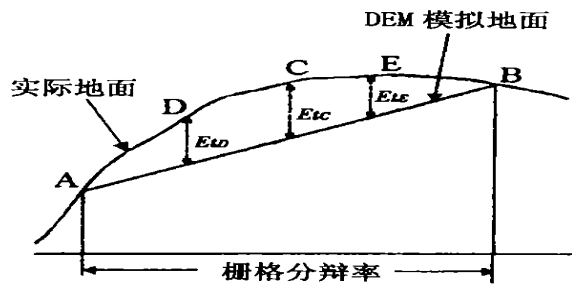


图 1  $E_t$  分布示意图

Fig. 1 The distribution graph of  $E_t$  enors

## 1.2 适用于欧洲的微观地形描述误差模型

目前适用于欧洲地区的地形描述误差的模拟方程, 可以表达为

$$E_{tD} = q \cdot a \cdot (E_{tD'})^b \quad (1)$$

式中  $E_{tD}$  表示原始的高分辨率 DEM 提取的地形描述误差,  $E_{tD'}$  表示低分辨率 DEM 提取的地形描述误差,  $a$ 、 $b$  是模型参数,  $q$  是表示“+ / -”参数, 可以直接从原始 DEM 提取的  $E_t$  矩阵中获取。

## 1.3 误差地图和直方图

DEM 误差的统计值有助于在宏观上了解不同区域的误差水平, 但并不能反映 DEM 误差的空间分布特征。误差地图无疑是最能直观反映误差空间分布规律的技术手段<sup>[11]</sup>。Monckton (1994) 曾探索利用离散点位的专题制图法绘制 DEM 的误差地图, 但是, 由于离散点位在描述连续现象上的局限性, 误差地图的效果不甚理想。本研究采用窗口分析法获取了在空间上连续的误差矩阵, 因而能够在 ARC/VIEW 地理信息系统软件的支持下, 利用质底法绘制误差地图, 并进一步获得相应的直方图。

## 1.4 实验样区与 DEM 数据

本研究所选实验样区位于陕西省绥德县韭园沟小流域, 地貌类型属于典型的黄土丘陵沟壑区。平均海拔高程 995.30 m, 地面平均坡度 29.23°, 沟壑密度 7.38 km/km<sup>2</sup>, 地形粗糙度 1.19。图 2 为实验区的地形光照模拟。

本次研究以 1:1 万比例尺地形图数字化建立的 DEM 作为基本信息源, 基本栅格分辨率为 5 m, 实验测定所建立 DEM 中误差为 4.12, 具有较高的高程采样精度, 便于作为基本信息源进行 DEM 地形描述误差的研究。

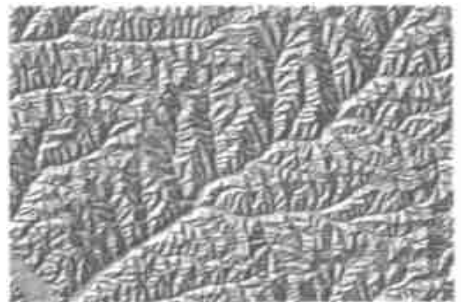


图 2 本研究实验区的地形光照模拟

Fig. 2 The hillshade model of the test area

# 2 实验结果与分析

## 2.1 提取 $E_t$ 的方法

根据以上定义, 地形描述误差可以表达为一个 3×3 分析窗口内, 中心栅格的高程与该栅格四个角点高程的平均值之差。因此, 可以采用栅格窗口分析法实现  $E_t$  的提取。如图 3 所示, 对于 DEM 单元

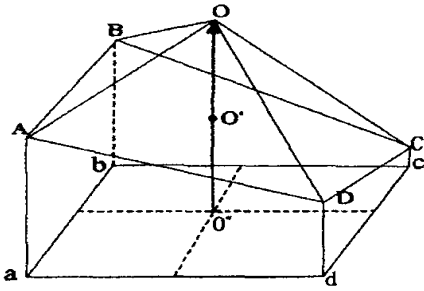


图 3 DEM 高程采样栅格元

Fig. 3 The elevation-sampling grid of DEM

栅格  $abcd$ ,  $O'$  为栅格中心点,  $A, B, C, D, O$  为对应地面点位, 假定在该栅格四个采样点  $A, B, C, D$  上的高程采样误差均为零;  $H_A, H_B, H_C, H_D$  及  $H_O$

分别为在  $A, B, C, D$  及  $O$  各点的海拔高程,  $O'$  为  $A, B, C, D$  四点的平均高程位置, 这样, 我们将  $O$  点与  $O'$  点的高差作为该栅格的地形描述误差  $Et$ , 即

$$Et = H_O - H_{O'} \\ = H_O - \frac{H_A + H_B + H_C + H_D}{4} \quad (2)$$

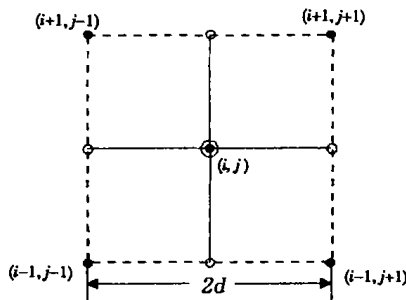
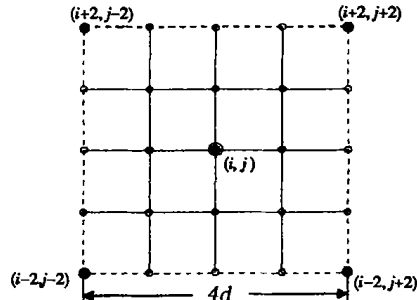
按照式(2), 已知单元栅格中点与其周围四个相邻点的高程是获取该栅格单元  $Et$  值的必要条件。由于单元栅格中点的实际高程是未知的, 所以在实际计算中采用窗口分析法实现  $Et$  的提取。如图 4 (a) 所示, 对于  $3 \times 3$  的正方形分析窗口, 如果 DEM 空间分辨率为  $d$ , 在该分析窗口内, 第  $i$  行第  $j$  列的  $Et$  值可以通过下式求得

$$Et(i, j) = H(i, j) - \frac{H(i-1, j-1) + H(i-1, j+1) + H(i+1, j-1) + H(i+1, j+1)}{4}$$

显然,  $3 \times 3$  窗口的分析分辨率为  $2d$ ,  $5 \times 5$  窗口的分析分辨率为  $4d$ , 如图 4 (b) 所示。当顺序移动该分析窗口对整个 DEM 进行逐点计算  $Et$  值, 即能获得相应的误差矩阵。如果 DEM 的栅格分辨率为

$d$ , 搜索半径为  $\sqrt{2}d$ , 即获得正方形分析窗口, 该窗口的分析分辨率为  $2d$ , 则在第  $i$  行第  $j$  列的 DEM 地形描述误差为

$$Et(i, j) = H(i, j) - \frac{H(i-1, j-1) + H(i+1, j-1) + H(i-1, j+1) + H(i+1, j+1)}{4} \quad (3)$$

(a)  $3 \times 3$  分析窗口(b)  $5 \times 5$  分析窗口图 4 提取  $Et$  的分析窗口Fig. 4 Analysis windows of the extraction of  $Et$  errors

如果继续扩大搜索圈的搜索半径, 便可依据公式(3)依次计算出不同分析分辨率条件下的误差矩阵。在本研究中, 我们选用了 10 m 和 20 m 的分析分辨率, 空间分辨率为 5 m 精测 DEM 数据。

## 2.2 对 $-Et$ 和 $+Et$ 的处理

根据地形描述误差的定义可知其值域为实数, 可以将计算的结果划分为  $-Et$ 、0 和  $+Et$ 。在应用模型进行计算时, 应将  $Et$  分为正负两部分分别进行计算。因为模型中含有参数  $q$ , 所以可以将计算出来的  $-Et$  取绝对值, 以便于计算。最后将负值还原与正值进行“和”运算, 得到真实的  $Et$  误差地图。

## 3 对模型参数的分析

本研究是一种实验性研究, 要通过实验来确定模型参数  $a, b$  的最优解。以  $+Et$  为例对模型参数进行分析,  $-Et$  取绝对值后与此方法相同。

### 3.1 对参数 $a$ 的分析

考虑到  $a$  在模型中处在倍数的位置上, 所以对地形描述误差的影响仅仅只局限于大小上的变化。通过反复的实验研究发现应用该模型无法将每一栅格点的误差值用具体的数值表示出来, 而只能根据

其误差的大小应用一定的图例分级表示(例如 0~0.444、0.444~0.888 等)。因此,若  $a$  的取值 $< 1$ ,则属于误差较大级别的点,具有向误差较小区别跃迁的趋势;若  $a$  的取值 $> 1$ ,则属于误差较小区别的点,具有向误差较大级别跃迁的趋势。

3.2 对参数  $b$  的分析

考虑到  $b$  在模型中处在指数的位置上,根据指数函数的特征可知  $b$  值的变化会导致直方图的最大值与最小值的差值增大。因此,随  $b$  值的增大,就会造成部分点有可能超出本级别范围向高级别跃迁,一部分则相反向低一级别跃迁,从而使直方图在纵轴方向拉伸了直方图。

3.3 对  $a$ 、 $b$  的调整方法

首先,对  $Et_{20}$ 做指数运算,对  $b$  取不同的值:从 1.01、1.02、……1.09,从 1.1、1.2、……2。然后对这个结果进行倍数运算,即对  $a$  取不同的值。由于无法将每一点具体的误差值表示出来,而只能反映

出属于每一级的点的数量,因而无法确定每一级内具体的点在  $a$ 、 $b$  的综合影响下的变化,这使得要控制直方图的变化相当困难,这也是本次研究工作的复杂性所在。因而,只能在先确定一个值而变化另一个值的基础上,结合  $a$ 、 $b$  各自对  $Et$  的影响,采用对比分析的方法来确定模型参数。

4 实验结果

基于以上的分析,经过大量的实验研究,首先确定了  $a$ 、 $b$  的取值范围: $a$  取值在 0.3~0.4 之间, $b$  取值在 1.08~1.2 之间。

经过反复实验得到了+  $Et$  的最佳的模拟效果,其  $a$ 、 $b$  的取值分别为 0.4 和 1.095。对于-  $Et$  的模拟,采用了同样的方法得到的  $a$  和  $b$  的值分别是 0.33 和 1.1。将+  $Et$  和-  $Et$  进行“和”运算后的模拟效果如图 5 所示,直方图如图 6 所示。

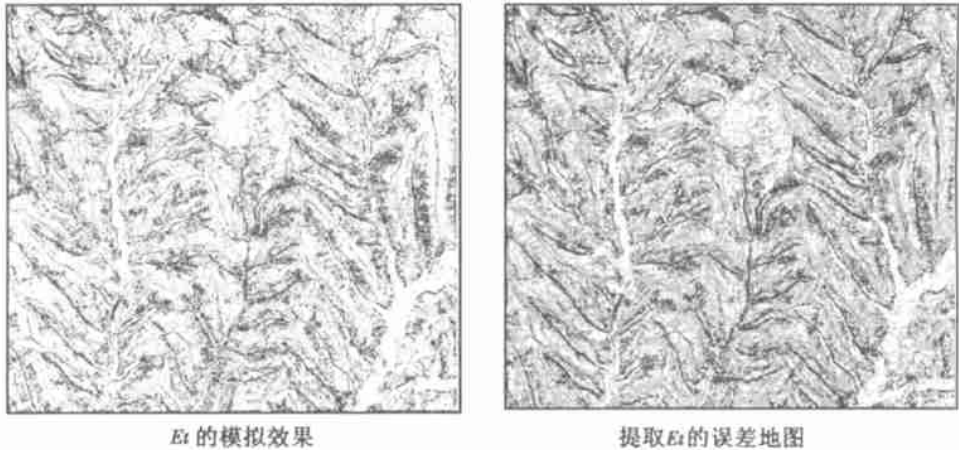


图 5 模拟误差图与提取误差图的对比

Fig. 5 The contrast between the analogical map and the extraction map of EDM  $Et$  enors

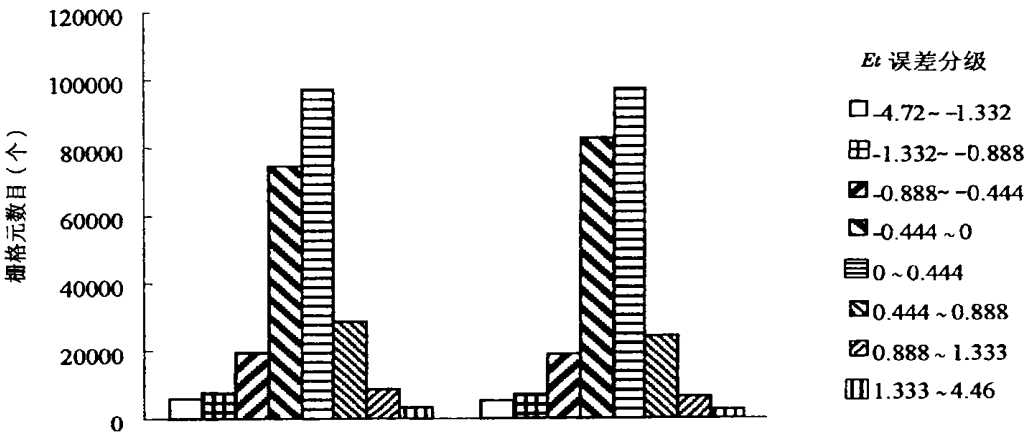


图 6 模拟误差直方图与提取误差直方图对比

## 5 结论与展望

1. DEM 离散采样(无论是规则格网、不规则三角网 TIN, 还是离散点)的结果, 必然造成 DEM 地形描述误差的存在。除了利用回归统计模型可对其随 DEM 栅格分辨率与地形复杂度的变化而变化的特征进行宏观模拟以外, 对 DEM 地形描述误差在栅格水平的微观模拟证明是可行的。

2. DEM 地形描述误差的微观模拟方法, 具有不同地域间的通用性。但是, 在不同地貌类型区及不同分辨率尺度条件下, 其模型参数需要得到适当修正。

3. 在黄土丘陵沟壑区, 不同 DEM 栅格分辨率  $E_t$  的转换模型可以表达为

$$Et_{10} = 0.4(+Et_{20})^{1.095} + (-0.33(1 - Et_{20})^{1.1})$$

对于+  $Et$ ,  $a$  取 0.4、 $b$  取 1.095; 对于-  $Et$ ,  $a$  取 0.33、 $b$  取 1.1。该模拟可以实现对任意两个空间分辨率 DEM 地形描述误差之间的量化模拟。

4. 模拟方程是地域适应性还需要经过更多实验洋区的验证。如果能够制定出模型参数随地形复杂度而变化的规律, 将具有十分重要的意义。

5. 神经网络、分形分维等分析方法的引入, 将有助于取得更为理想的研究结果。

### 参考文献(References):

- [1] Chang K, Tsai B. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1991,

18: 69~ 77.

- [2] Florinsky I. V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, **12**(1): 47~ 61.
- [3] 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.
- [4] Jeffery P Walker, Garry R Willgoose On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 1999, **35**(7): 2259~ 2268.
- [5] Tang Guoan. A research on the accuracy of digital elevation models. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] Wood J D. The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. Leicester: Leicester University Press, 1996.
- [7] Tang Guoan, Zhao Mudan, Cao Han. An investigation of the spatial structure of DEM errors. *Journal of Northwest University (Nature Science Edition)*, 2000, **20**(4): 349~ 352. (In Chinese) [ 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, **20**(4): 349~ 352. ]
- [8] Tang Guoan, Gong Jianya, Cheng Yanhui A Simulation On The Accuracy DEM Terrain Representation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, **30**(4): 361~ 365. (In Chinese) [ 汤国安, 龚健雅, 成燕辉, 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. ]
- [9] Tang Guoan, Yang Qinke, Zhang Yong etc. A Research on the Accuracy of Slope Derived from DEMs of Different Map Scales——A case study in the hill~ gully areas of the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, **21**(1): 53 ~ 56. (In Chinese) [ 汤国安, 杨勤科, 张勇, 等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究——以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J], 水土保持通报, 2001, **21**(1): 53~ 56. ]
- [10] Li Zhilin, Zhu Qing. Digital Elevation Model. Wuhan: Wu Han University Press, 2001. (In Chinese) [ 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2001. ]
- [11] Guo Renzhong. Spatial Analysis. Wuhan: Wu Han University Press, 2000. (In Chinese) [ 郭仁中. 空间分析[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2000. ]

## A Mathematical Simulation of DEM Terrain Representation Error ——A Case Study in the Loess Hill-gully Areas of China

ZHANG Yong<sup>1</sup>, TANG Guo-an<sup>1,2</sup>, and PENG Qi<sup>1</sup>

(1. Department of Urban and Resources Science, Northwest University, Xi'an 710069 China;

2. National Laboratory for Information Engineering in Survey, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430074 China)

**Abstract** DEM terrain representation error ( $E_t$ ) has been commonly regarded as a key factor impacting the accuracy in deriving terrain features. Many successful works have been done in simulating  $E_t$  at global level. This paper focuses mainly on the simulation of  $E_t$  at local level in China Loess Plateau Area and the transformation of two  $E_t$  error maps at different spatial scales. A series of experiments show that Tang's Europe  $E_t$  model fitted to China Loess Plateau Area as well, although their parameters should be adjusted. This model can be represented as following exponential equation  $E_{tD} = q \cdot a \cdot (E_{tD'})^b$ , which has been validated to be of ideal effect and can be treated as a good prototype to other terrain areas.

**Key words:** DEM; terrain representation error; resolution; simulation