

DOI:10.13203/j.whugis20160302



文章编号:1671-8860(2018)07-1122-07

# 干热河谷冲沟 DEM 插值误差的空间分布研究

岳彦利<sup>1</sup> 罗明良<sup>1</sup> 张 斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西华师范大学国土资源学院,四川 南充,637009

**摘 要:**为了分析云南元谋干热河谷典型冲沟插值误差的空间分布特征,采用反距离加权(inverse distance weighting, IDW)、局部多项式(local polynomial interpolation, LPI)、张力样条(spline with tension, ST)、析取克里格(disjunctive Kriging, DK)以及不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)模型方法对高程采样点进行插值,用交叉验证法、相对差系数及沟谷线差异衡量其插值精度。遴选高程误差大于 1 m 的误差点,用变异系数(coefficient of variation, CV)、全局 Moran 指数和 Getis-Ord  $G_i^*$  指数分析其空间格局特征。结果表明:TIN 和 DK 精度较高, IDW 精度最低;高程误差均呈聚集分布,聚集程度  $TIN > LPI > DK > ST > IDW$ ;高程误差均呈空间正自相关, TIN 模型插值误差的自相关程度最高;误差热点位于坡度大的区域。

**关键词:**DEM 插值误差;干热河谷冲沟;空间分布;CV;Moran 指数;Getis-Ord  $G_i^*$  指数;相对差系数

**中图分类号:**P208;P232 **文献标志码:**A

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地表形态的数字化表达,空间插值是构建 DEM 的常用方法之一<sup>[1]</sup>。DEM 插值会存在误差,其数据精度会影响后续地形分析结果的准确性<sup>[2]</sup>,如对坡度、坡向的影响等<sup>[3-4]</sup>。很多学者对此做了大量研究,如汤国安等提出了 DEM 地形描述误差概念,定量地揭示了误差的空间分布规律<sup>[5-6]</sup>;王春等提出了中误差场和极值场量化模型<sup>[7]</sup>;陈永刚等发现 DEM 重采样产生的误差与坡度成正相关<sup>[8]</sup>;贾旖旎等、周兴华等探讨了 DEM 内插对坡度、坡向精度的影响<sup>[9-10]</sup>;王耀革等对 DEM 误差的空间自相关特征进行了研究<sup>[11]</sup>。随着数据采集技术的不断更新,大比例尺 DEM 得到了广泛使用。现有学者对大比例尺 DEM 的生成及可视化、数据更新、DEM 内插精度等方面开展了研究<sup>[12-14]</sup>,在 DEM 的建立及其精度评价方面取得了丰硕的成果。

上述大比例尺 DEM 的研究区域一般较大,样区多位于中国黄土高原、东北黑土区<sup>[15-16]</sup>等地,对西南干热河谷区小范围内密集分布、侵蚀剧烈的冲沟插值误差的研究还有待深入。近年来对元谋干热河谷 DEM 构建的研究表明,用径向基函数(radial basis function, RBF)插值时,选择张力

样条(spline with tension, ST)函数且邻域点数 3~18 个,插值效果较好<sup>[17]</sup>;用反距离加权(inverse distance weighting, IDW)插值时,选择权指数为 2、邻域点数 4~8 个、4 方向插值效果较好<sup>[18]</sup>。本文基于实测高程点插值构建 DEM,探讨其误差的空间分布特征,以期为元谋干热河谷区构建高精度 DEM 提供参考。

## 1 DEM 插值误差研究方法

### 1.1 相对差系数

利用相对差系数定量分析不同插值方法构建表面的差异,将 IDW、局部多项式(local polynomial interpolation, LPI)、ST、析取克里格(disjunctive Kriging, DK)和不规则三角网(triangulated irregular network, TIN) 5 种方法生成的 DEM 进行交互对比,选择其中一种作为基准方法,其他为比较方法。相对差系数  $\alpha$  可定义为<sup>[19]</sup>:

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_{comp}^i - A_{base}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_{comp}^i - \bar{A}_{base})^2} \quad (1)$$

收稿日期:2016-12-27

项目资助:国家自然科学基金(41101348);西华师范大学基本科研业务费(15C002)。

第一作者:岳彦利,硕士生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Yulisa258@163.com

通讯作者:罗明良,博士,教授。lolean586@163.com

式中,  $A_{base}^i$  表示基准方法生成的高程值;  $A_{comp}^i$  表示比较方法生成的高程值;  $\bar{A}_{base}$  表示基准方法生成的 DEM 高程平均值;  $n$  为 DEM 格网数量。以斜率为 1 的直线拟合基准方法和比较方法, 则  $\alpha$  可以刻画两者之间的总偏离程度。若  $\alpha=1$ , 表示两种方法插值结果没有差异;  $\alpha$  越小, 表示两者差异越大; 若  $\alpha<0$ , 则表示两者插值结果无可比性。

1.2 变异系数值

变异系数(coefficient of variation, CV) 用来判别高程误差的空间分布类型, 设插值后产生的高程误差点集为  $S = \{P_1, P_2, P_3 \dots P_n\}$ , 则任意高程误差点的 Voronoi 区域可表示为<sup>[20]</sup>:

$$T_i = \{x | d(x, P_i) \leq d(x, P_j), P_i, P_j \in S, i \neq j\} \quad (2)$$

式中,  $x$  为空间中任一高程误差点;  $d(x, P_i)$  为平面距离函数。CV 值定义为 Voronoi 多边形面积标准差  $\sigma$  与高程平均值  $\bar{A}$  的比值<sup>[21]</sup>:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{A}} \quad (3)$$

由文献[21]可知, 当 CV 值为 33%~64% 时, 为随机分布; 当 CV 值大于 64% 时, 为集群分布; 当 CV 值小于 33% 时, 为均匀分布。

1.3 全局 Moran 指数

Moran 指数用来反映空间邻近区域单元属性值的相似程度, 计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中,  $I$  为全局 Moran 指数;  $x_i, x_j$  分别为单元  $i, j$  的误差;  $n$  为单元数量;  $\bar{x}$  为  $n$  个单元的误差平均值;  $W_{ij}$  表示  $i$  和  $j$  的影响权重。  $I$  的取值范围一般为  $[-1, 1]$ ,  $I>0$  代表邻近正相关;  $I<0$  代表邻近负相关;  $I=0$  则代表不相关。通过全局空间自相关分析可以探究高程误差点的聚集效应。

1.4 Getis-Ord  $G_i^*$  指数

Getis-Ord  $G_i^*$  指数是一种基于距离权矩阵的局部空间自相关指标, 可以用来探测误差在空间上的聚集区域。计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (5)$$

式中,  $W_{ij}$  为  $i$  和  $j$  的距离权重;  $X_i, X_j$  分别为空间单元  $i, j$  的误差值。局部  $G_i^*$  指数可进行标准

化处理得:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (6)$$

式中,  $E(G_i^*)$  为  $G_i^*$  的数学期望;  $\text{Var}(G_i^*)$  为  $G_i^*$  的变异函数。其中, 如果  $Z(G_i^*)$  为正且显著 ( $Z(G_i^*)>2$ ), 则表明位置  $i$  属误差热点区; 反之, 如果  $Z(G_i^*)$  为负且显著 ( $Z(G_i^*)<-2$ ), 则表明位置  $i$  属误差冷点区。利用  $Z(G_i^*)$  值可以衡量误差的局部空间自相关特征, 以探索误差热点区的地形特征。

2 实验与结果分析

2.1 研究样区与数据采集

研究样区位于云南省元谋县沙地村, 地处北纬  $25^{\circ}41'31''$ , 东经  $101^{\circ}52'18''$ , 属金沙江流域, 气候干热, 土壤侵蚀剧烈, 其冲沟系统的空间格局和沟系类型复杂多样, 地形破碎, 具有沟壁陡立、深沟等形态特征<sup>[23]</sup>, 实验选取的冲沟对象为典型的干热河谷冲沟形态, 实际地形见图 1。



图 1 研究样区  
Fig.1 Study Area

实验数据是通过徕卡全站仪 TCR802 等高精度测量仪器, 按大比例尺测绘测量标准对地表高程进行高密度混合采样<sup>[1]</sup>得到的, 采集时间为 2011 年 7 月。测量时采样点的布设综合考虑了研究区的重要地形特征及采样点的空间分布均衡性, 注重冲沟坡度坡向突变点和局部侵蚀特征点。首先采集地形特征变化的高程点, 然后对其他区域进行适当加密采样, 最终获取约 8 000 个高程采样点, 能够表达一条冲沟的主要地表形态, 可用于 DEM 插值。

2.2 插值精度比较

2.2.1 交叉验证

为了评估 DEM 精度, 将高程采样点分为训练点集和验证点集, 其划分比例对应了插值点集的数据密度, 而数据密度对高程精度会有影

响<sup>[24]</sup>。分别采用 IDW、LPI、ST、DK 和 TIN 5 种方法进行 DEM 插值,交叉验证结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,5 种插值方法产生的高程中误差都小于 0.7 m,插值精度较高,可以进行 DEM 地表模拟。分析平均误差:对于训练数据,除 TIN 以外,其他 4 种方法均在数据密度为 0.63 个/m<sup>2</sup> 时最小;对于验证数据,IDW、LPI 在数据密度为 0.70 个/m<sup>2</sup> 时最小,而 ST、DK 在数据密度为 0.63 个/m<sup>2</sup> 时最小。分析中误差:对于训练

数据,IDW、LPI 在数据密度为 0.70 个/m<sup>2</sup> 时最小,ST、DK 在数据密度为 0.59 个/m<sup>2</sup> 时最小,TIN 在数据密度为 0.63 个/m<sup>2</sup> 时最小;对于验证数据,除 TIN 以外,其他 4 种方法均在数据密度为 0.63 个/m<sup>2</sup> 时最小。因此,本文选用训练数据密度为 0.63 个/m<sup>2</sup> 进行插值研究,此时训练数据和验证数据的高程平均误差都是 ST、DK 较小,中误差大小关系都是 TIN<LPI<DK<ST<IDW。综上所述,DK 和 TIN 方法的插值精度较高。

表 1 不同数据密度的高程插值精度对比

Tab.1 Comparison of Interpolation Accuracy with Different Data Densities

| 插值方法 | 抽取比例<br>/% | 数据密度<br>/(个·m <sup>-2</sup> ) | 平均误差/m  |         | 中误差/m   |         |
|------|------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|      |            |                               | 训练数据    | 验证数据    | 训练数据    | 验证数据    |
| IDW  | 95         | 0.70                          | 0.008 7 | 0.007 4 | 0.506 6 | 0.506 0 |
|      | 90         | 0.66                          | 0.009 8 | 0.019 3 | 0.511 8 | 0.614 2 |
|      | 85         | 0.63                          | 0.008 5 | 0.018 7 | 0.527 8 | 0.478 3 |
|      | 80         | 0.59                          | 0.012 7 | 0.023 9 | 0.520 5 | 0.553 5 |
| LPI  | 95         | 0.70                          | 0.004 2 | 0.005 2 | 0.400 1 | 0.393 8 |
|      | 90         | 0.66                          | 0.003 6 | 0.007 5 | 0.400 2 | 0.430 2 |
|      | 85         | 0.63                          | 0.002 9 | 0.008 8 | 0.401 3 | 0.365 1 |
|      | 80         | 0.59                          | 0.004 8 | 0.017 6 | 0.406 2 | 0.464 1 |
| ST   | 95         | 0.70                          | 0.002 9 | 0.004 2 | 0.452 7 | 0.462 5 |
|      | 90         | 0.66                          | 0.001 7 | 0.006 0 | 0.457 7 | 0.546 6 |
|      | 85         | 0.63                          | 0.000 3 | 0.002 5 | 0.465 0 | 0.429 2 |
|      | 80         | 0.59                          | 0.006 0 | 0.008 5 | 0.441 5 | 0.482 1 |
| DK   | 95         | 0.70                          | 0.001 9 | 0.002 1 | 0.408 1 | 0.411 5 |
|      | 90         | 0.66                          | 0.003 0 | 0.006 4 | 0.419 5 | 0.436 8 |
|      | 85         | 0.63                          | 0.001 6 | 0.001 9 | 0.420 4 | 0.391 7 |
|      | 80         | 0.59                          | 0.002 6 | 0.013 1 | 0.402 2 | 0.461 7 |
| TIN  | 95         | 0.70                          | 0.003 9 | 0.019 9 | 0.106 9 | 0.193 3 |
|      | 90         | 0.66                          | 0.007 7 | 0.001 8 | 0.107 0 | 0.184 3 |
|      | 85         | 0.63                          | 0.005 7 | 0.007 1 | 0.100 9 | 0.197 3 |
|      | 80         | 0.59                          | 0.002 2 | 0.013 5 | 0.092 8 | 0.224 1 |

### 2.2.2 相对差系数

将 5 种插值方法生成的 DEM 进行交互比较,其相对差系数见表 2。由于插值对象为高密度采样点,相对差系数都很接近。以 TIN 为基准时,DK 和 LPI 的相对差系数最高;DK 和 LPI 互为基准时,相对差系数较高;IDW 的相对差系数比其他方法低。因此,DK、LPI 与 TIN 构建的地形表面较为相近。由于 TIN 插值产生的中误差最小,因此可以将其他插值方法以 TIN 为基准进行对比研究。

### 2.2.3 沟谷线差异对比

以 TIN 模型构建的 DEM 提取的沟谷线作为基准,将其他插值方法生成的 DEM 提取的沟谷线依次与基准沟谷线进行对比,以沟谷线间相交而形成的多边形面积大小来衡量插值方法间的

表 2 相对差系数

Tab.2 Relative Difference Coefficients

| 比较插值<br>方法 | 基准插值方法  |         |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|            | TIN     | IDW     | LPI     | ST      | DK      |
| TIN        | —       | 0.997 2 | 0.998 2 | 0.997 1 | 0.998 4 |
| IDW        | 0.999 2 | —       | 0.998 5 | 0.996 3 | 0.998 3 |
| LPI        | 0.999 5 | 0.998 5 | —       | 0.997 9 | 0.999 2 |
| ST         | 0.999 2 | 0.996 4 | 0.997 9 | —       | 0.998 6 |
| DK         | 0.999 5 | 0.998 4 | 0.999 2 | 0.998 6 | —       |

误差差异特征,如图 2 所示。对多边形面积进行统计分析,发现 IDW 与 TIN 两种方法提取的沟谷线相交总面积最大,而 DK 与 TIN 的相交总面积最小;LPI 与 TIN 模型的单个相交多边形面积最大,ST、LPI 其次,DK 最小。因此,采用 DK 与 TIN 插值方法构建的 DEM 精度相似,与交叉验证结果相符。

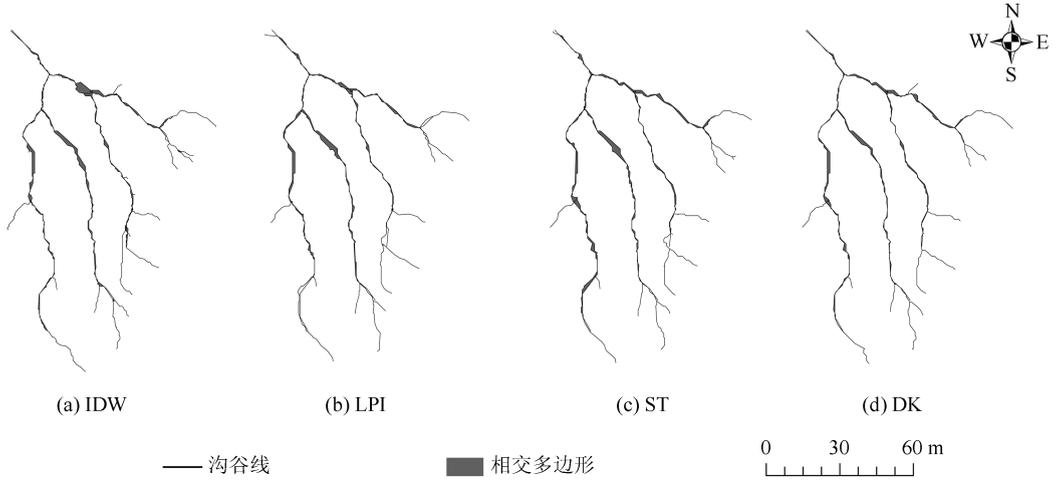


图 2 4 种插值方法与 TIN 构建方法提取沟谷线的差异

Fig.2 Valley Line Differences Between Four Methods and TIN Method

### 2.3 误差空间分布特征

提取高程误差大于 1 m 的误差点,利用 Voronoi 多边形计算 CV 值,基于空间统计分析计算误差的全局 Moran 指数和 Z 分数值(见表 3)。Z 分数值可用来判断误差是否呈聚类分布或离散分布,若 Z 分数值为正值,则表示误差在空间上呈聚类分布;若 Z 分数值为负值,则表示误差在空间上呈离散分布。

表 3 高程误差空间分布特征值

Tab.3 Spatial Distribution Feature Values of Height Errors

| 插值方法 | CV 值 | 全局 Moran 指数 | Z 分数值 |
|------|------|-------------|-------|
| IDW  | 1.52 | 0.20        | 12.29 |
| LPI  | 1.77 | 0.07        | 3.45  |
| ST   | 1.57 | 0.03        | 2.36  |
| DK   | 1.58 | 0.13        | 6.07  |
| TIN  | 2.22 | 0.52        | 25.67 |

由表 3 可以看出,5 种方法的 CV 值均大于 1,呈集群分布,且聚集程度 TIN>LPI>DK>ST>IDW;全局 Moran 指数和 Z 分数值均大于 0,表明误差均呈空间正自相关且为聚类分布,其中 TIN 的聚集程度最高,与 CV 值一致。

为了探讨误差的聚集位置,分别对 5 种方法进行误差热点分析(见图 3)。图 3 表明,5 种方法的插值误差具有公共热点区,但误差热点区具有很大差异,如 ST 方法的部分误差热点区对应于 TIN 模型的误差冷点区。对 DEM 计算坡度以分析高程误差点的空间分异规律,误差点在不同坡度范围内的分布比例如表 4 所示。由表 4 可以看

出,5 种方法的高程误差点均集中分布在坡度大于 45°的区域,此时 TIN 和 DK 的插值误差点占比高达 80%以上;反之,坡度越低的区域,其高程误差点所占比例也越低,分布零散;整体呈坡度越大误差点越多的趋势。

表 4 不同坡度范围内高程误差点分布比例/%

Tab.4 Distribution Proportions of Height Errors in Different Ranges of Slope/%

| 方法  | 坡度/(°) |      |       |       |     |
|-----|--------|------|-------|-------|-----|
|     | 0~5    | 5~15 | 15~30 | 30~45 | >45 |
| IDW | 1      | 7    | 17    | 30    | 45  |
| LPI | 1      | 1    | 12    | 23    | 63  |
| ST  | 0      | 2    | 7     | 12    | 79  |
| DK  | 0      | 2    | 7     | 9     | 82  |
| TIN | 0      | 0    | 7     | 10    | 83  |

### 3 结 语

采用 IDW、LPI、ST、DK、TIN 这 5 种方法对高精度高程采样点进行插值,结果发现 DK 和 TIN 模型的插值精度较高。沟谷线对比实验表明,利用 DK 与 TIN 插值方法构建的 DEM 表面最相似。5 种方法产生的高程误差均为聚集分布且呈空间正自相关;5 种插值方法具有公共误差热点区且都位于坡度较大的区域,但各插值方法的热点区分布具有较大差异。本文对小尺度典型冲沟进行研究,发现坡度大的区域其误差点占比也越大,对于其他地形因子对元谋干热河谷冲沟 DEM 构建的精度影响还有待深入研究。

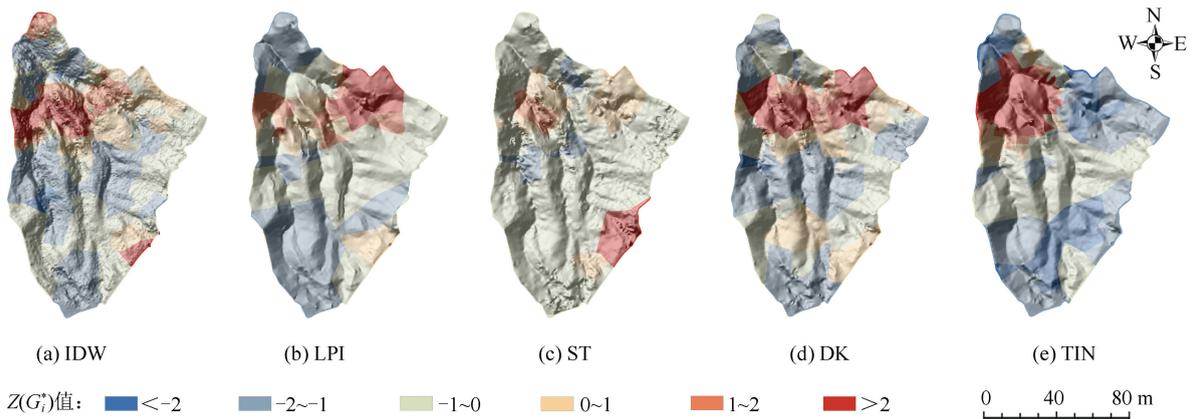


图3 5种方法高程误差热点分布图

Fig.3 Hot Spot Distribution of Height Errors of Five Methods

## 参 考 文 献

- [1] Tang Guoan, Li Fayuan, Liu Xuejun. Digital Elevation Model Course[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010(汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M]. 2版.北京:科学出版社,2010)
- [2] Lu Huaxing. Research on DEM Error Model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008(卢华兴. DEM 误差模型研究[D].南京:南京师范大学,2008)
- [3] Liu Xuejun, Bian Lu, Lu Huaxing, et al. The Accuracy Assessment on Slope Algorithms with DEM Error Spatial Autocorrelation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2):200-206(刘学军,卞璐,卢华兴,等.顾及DEM误差自相关的坡度计算模型精度分析[J].测绘学报,2008,37(2):200-206)
- [4] Liu Xuejun, Wang Yefei, Cao Zhidong, et al. A Study of Error Spatial Distribution of Slope and Aspect Derived from Grid DEM[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2004(12):11-13(刘学军,王叶飞,曹志东,等.基于DEM的坡度坡向误差空间分布特征研究[J].测绘通报,2004(12):11-13)
- [5] 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)
- [6] 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): 351-352(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):351-352)
- [7] Wang Chun, Tang Guoan, Dai Shibao, et al. Quantitative Analysis of DEM Terrain Representation Error Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1 074-1 079(王春,汤国安,戴仕宝,等.DEM地形描述误差场量化分析研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(9):1 074-1 079)
- [8] Chen Yonggang, Tang Guoan, Zhu Shijie. Spatial Point Pattern of DEM Re-sampling Error and Difference Analysis of Influence Factor[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(4): 653-659(陈永刚,汤国安,祝士杰. DEM重采样误差空间分布格局及差异性分析[J].中国矿业大学学报,2011,40(4):653-659)
- [9] Jia Yini, Tang Guoan, Liu Xuejun. The Impact of Elevation Interpolation on the Accuracy of Gradient and Aspect from DEMs[J]. *Geo-Information Science*, 2009, 11(1): 36-42(贾旖旎,汤国安,刘学军.高程内插方法对DEM所提取坡度、坡向精度的影响[J].地球信息科学学报,2009,11(1):36-42)
- [10] Zhou Xinghua, Yao Yiqiang, Zhao Jixian. Research on Interpolation and Accuracy Assessment of DEM[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(5): 86-88(周兴华,姚艺强,赵吉先. DEM内插方法与精度评定[J].测绘科学,2005,30(5):86-88)
- [11] 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)
- [12] Liu Ling. Research on Creation and Visualization of Large-Scale Digital Elevation Model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001(柳玲.大比例尺数字

- 高程模型的生成及可视化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001)
- [13] Duan Xiumei. Updating Method of 1 : 50 000 Scale DEM Based on 1 : 10 000 Scale Terrain Data [D]. Hunan: Central South University, 2012(段修梅. 基于 1 : 1 万地形数据更新 1 : 5 万 DEM 的方法研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2012)
- [14] Li Jinyang, Fan Jianrong, Xu Jinghua. Research on Precision Comparison of Interpolation DEM Based on the Point Cloud Data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(1): 37-40(李瑾杨, 范建容, 徐京华. 基于点云数据内插 DEM 的精度比较研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(1): 37-40)
- [15] Yang Qinke, McVicar T R, van Niel T G, et al. Comparison of Hydro-geomorphology Representing Between DEMs by TIN and ANUDEM Approaches [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6): 84-88(杨勤科, McVicar T R, van Niel T G, 等. ANUDEM 和 TIN 两种建立 DEM 方法的对比研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 84-88)
- [16] Wang Ping, Li Hao, Chen Shuai, et al. Interpolation of Permanent Gully Density Based on Slope Steepness in Black Soil Area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 312-317(王平, 李浩, 陈帅, 等. 基于坡度的黑土区切沟密度协同克里格插值方法研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 312-317)
- [17] Qing Yalan, Luo Mingliang, Zhang Bin, et al. Effects of Interpolation Parameters in Radial Basis Function on DEM Accuracy in Dry-Hot Valleys[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(7): 113-117(青亚兰, 罗明良, 张斌, 等. 径向基函数对干热河谷冲沟 DEM 构建的影响[J]. 测绘科学, 2015, 40(7): 113-117)
- [18] Chen Juan, Luo Mingliang, Zhang Bin, et al. Effects of Interpolation Parameters in Inverse Distance Weighted Method on DEM Accuracy in Dry-Hot Valleys of Yuanmou[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 29-34(陈娟, 罗明良, 张斌, 等. 反距离加权插值参数变化对元谋冲沟 DEM 构建的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 29-34)
- [19] Liu Xuejun, Jin Bei, Wang Yanfang. Similarity Analysis of Flow Route Algorithms for Extracting Drainage Network from Grid-Based Terrain Model [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1 347-1 357(刘学军, 晋蓓, 王彦芳. DEM 流径算法的相似性分析[J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1 347-1 357)
- [20] Yan Chaode, Bai Jianjun, Zhao Renliang. Voronoi Diagram's Recursive Convergence Characteristic Along Preferred Possible Nearest Neighbor Objects and Its Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 48-51(闫超德, 白建军, 赵仁亮. Voronoi 图的首最邻近递归收敛特性及其应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 48-51)
- [21] Zhang Hong, Wang Xinsheng, Yu Ruilin. Voronoi Diagram to Study the Spatial Distribution Pattern of Point Sets[J]. *Journal of Central China Normal University(Natural Sciences)*, 2005, 39(3): 422-426(张红, 王新生, 余瑞林. 基于 Voronoi 图的测度点状目标空间分布特征的方法[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(3): 422-426)
- [22] Zhang Songlin, Zhang Kun. Comparison Between General Moran's Index and Getis-Ord General G of Spatial Autocorrelation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(4): 93-97(张松林, 张昆. 全局空间自相关 Moran 指数和 G 系数对比研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(4): 93-97)
- [23] Li Xiang, Deng Qingchun, Zhang Bin, et al. Characteristics and Controlling Factors of Rills in the Micro-watershed of Yuanmou Dry-Hot Valley[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 24-30(李响, 邓青春, 张斌, 等. 元谋干热河谷微流域细沟形态特征及控制因素[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 24-30)
- [24] Wang Lei, Yang Qinke, Wang Chunmei, et al. Analysis of Relationship Among RMSE of Elevation, Grid Size and Data Density when Generate DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 366-369(王雷, 杨勤科, 王春梅, 等. 采样数据密度及栅格尺寸对高程中误差的影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 366-369)

# Study on Spatial Distribution of DEM Interpolation Errors in the Gully of Dry-Hot Valley

YUE Yanli<sup>1</sup> LUO Mingliang<sup>1</sup> ZHANG Bin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China

**Abstract:** To analyze the interpolation errors spatial distribution characteristics of the typical gully of Yuanmou dry-hot valley, the measured elevation points were interpolated by inverse distance weighting (IDW), local polynomial interpolation (LPI), spline with tension (ST), disjunctive Kriging (DK) and triangulated irregular network (TIN) model to generate DEM. Cross validation, relative difference coefficient and the valley lines discrepancy were used to evaluate the interpolation accuracy. The error points with elevation error greater than 1 m were extracted, and their spatial distribution characteristics were analyzed by coefficient of variation(CV), global Moran's index and Getis-Ord  $G_i^*$  index. The results show that DK and TIN model had higher interpolation accuracy, the height error points of five interpolation methods were overall aggregating distribution, and the degree was TIN>LPI>DK>ST>IDW. Height errors were significantly positive spatial autocorrelation and TIN model had the highest autocorrelation degree, the hot spots of errors were distributed in the area with large slope.

**Key words:** DEM interpolation error; gully of dry-hot valley; spatial distribution; CV; Moran's index; Getis-Ord  $G_i^*$  index; relative difference coefficient

**First author:** YUE Yanli, postgraduate, specializes in soil and water conservation and desertification combating. E-mail: Yulisa258@163.com

**Corresponding author:** LUO Mingliang, PhD, professor. E-mail: lolean586@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41101348; the Basic Scientific Research Foundation of China West Normal University, No.15C002.

(上接第 1035 页)

error under the two approaches are obtained. Based on the above error indexes, the corresponding precision indexes of the two kinds of gravity field inversion methods in the tandem flight mode are calculated respectively. Among, the second inversion method makes full use of the characteristics of the relative orbit determination by using the east-west observations in the tandem mode, and takes account of the systematic error characteristics of the propagation error and geophysical correction error under the close-range conditions. Therefore, the vertical deflection accuracy of the second inversion method is higher than that of the first inversion method, and its gravity field inversion also has certain advantages accordingly. The theoretical calculation results show that using the first inversion method, we can get a gravity anomaly accuracy of 6—10 mGal in 2.3 years and 4.2—7.1 mGal in 4.6 years; while using the second inversion method, a gravity anomaly accuracy of 3.9 mGal in 2.3 years and 2.8 mGal in 4.6 years can be obtained, respectively.

**Key words:** altimetry satellite; tandem mode; sea surface height; vertical deflection; gravity anomaly

**First author:** ZHAI Zhenhe, PhD, assistant researcher, specializes in the satellite altimetry and airborne gravimetry. E-mail: zhaizhenhe1980@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41674082.