

# AMMI 模型的 DEM 内插方法不确定性研究

赵明伟<sup>1</sup>, 汤国安<sup>1\*</sup>, 田 剑<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046;  
2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 内插模型的精度评价问题一直是 DEM 内插研究中的热点问题。以往较多的研究关注插值模型本身的精度评价, 却忽略了插值模型与应用环境之间的交互作用, 例如, 普通克里金方法作 DEM 内插一般精度较差, 但是当插值区域平坦时, 该方法的插值精度却很高, 这表明该方法对平坦地形的插值问题具有较好的适应性。为了分析不同插值模型在不同地形环境下的适用性, 本文选取陕北黄土高原地区不同地貌类型的实验样区, 应用 AMMI 模型对不同内插模型的精度, 以及对不同地貌类型的适用性进行评价, 该模型最大的特点是很好地结合了方差分析与回归分析的特点, 特别适合于不同影响因素之间交互作用的分析。实验结果表明, AMMI 模型可以有效地分析内插方法与地貌环境对内插精度的交互作用, 不同的内插方法对不同的地貌类型区的适用性存在差异。以本文的研究为例, 在陕北黄土高原地区最稳定的 DEM 内插方法是样条函数法, 而反距离加权法与 Top to Raster 方法精度会更高。最后, 通过对环境指数与若干地形因子的相关性分析, 表明地貌类型区的坡度可以粗略地代表第一环境指数。

**关键词:** AMMI 模型; DEM 内插; 精度; 不确定性

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2012.00062

## 1 引言

内插是数字高程模型的核心问题, 它贯穿在 DEM 的生产、质量控制、精度评定和分析应用等各个环节<sup>[1]</sup>。DEM 内插就是根据分布在内插点周围的采样点高程求出未知点的高程值, 在数学上属于数值分析中的插值问题。从 DEM 概念提出至今, 经过多年的发展和完善, 已经提出了多种高程内插方法, 汤国安等(2005)从数据分布、内插范围、内插函数性质等角度对已有的内插方法作了系统的总结与分类<sup>[2]</sup>。近年来, 基于分形以及神经网络的非线性插值模型也相继被提出<sup>[3-4]</sup>; 产生了一些借助辅助数据进行内插模型修正的算法<sup>[5]</sup>; 此外, 基于微分几何原理的高精度建模技术也成为内插模型的一个热点<sup>[6-7]</sup>。

插值模型是一种通过数学方法模拟真实世界的技术, 如何建立和评价插值模型与真实地表形态之间的关系是值得关注的问题。韩富江等(2007)

对多种内插方法的内插结果与可视性分析结果进行对比与相关分析, 以揭示不同的内插方法对可视性分析结果的影响规律<sup>[8]</sup>。杨雯等(2009)采用不同内插方法在同一地区进行内插分析的精度研究<sup>[9-10]</sup>。胡海等(2011)从计算的稳定性与高程同构特性的角度对集中内插方法进行分析<sup>[11]</sup>。王耀革等(2008, 2009)对内插方法的整体误差, 以及误差的空间自相关性作了分析<sup>[12-13]</sup>。前人的研究集中在内插方法自身的性质, 而对于内插模型的区域适应性研究却少有涉及。加性主效应乘积交互作用模型(Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Model, 简称 AMMI 模型)最大的特点是将方差分析和主成分分析很好地结合起来, 适用于对某种结果不同影响因素的分析, 尤其在分析不同因素的交互作用上具有很大的优势<sup>[14-16]</sup>, 该模型广泛应用于农作物的区域适应性分析中<sup>[17-18]</sup>。

综合前人的研究, 本文选取黄土高原地区不同

**收稿日期:** 2011-07-16; **修回日期:** 2012-01-08.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“基于 DEM 的黄土高原地貌形态空间格局研究”(40930531); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(2010KF0002SA); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

**作者简介:** 赵明伟(1986-), 男, 汉族, 山东省莱芜市人, 硕士研究生, 主要从事空间分析与数字地形分析的研究工作。  
E-mail: zhaomingwei68@163.com

**\* 通讯作者:** 汤国安(1961-), 男, 汉族, 浙江省宁波市人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为地理信息系统、DEM 与数字地形分析及 GIS 空间分析。E-mail: tangguoan@nynu.edu.cn

地貌类型的实验样区,分别采用反距离加权插值法,普通克里格方法,最邻近点内插方法,样条函数法方法,以及 Top to Raster 方法,计算这些内插方法在不同区域的插值精度,利用 AMMI 模型分析上述内插方法与实验区域的交互作用。实验结果表明,AMMI 模型可以有效地分析不同内插方法与地貌类型对内插精度的交互作用。本文的研究旨在充实地质学数据的分析方法。

2 研究区数据与方法

2.1 实验区域与数据

考虑到地貌类型的丰富性,研究区域确定在陕北黄土高原。本文选择 6 个实验样区,图 1 展示了研究样区在陕北黄土高原中的分布位置,实验样区的地貌类型,以及基本地形信息见表 1。

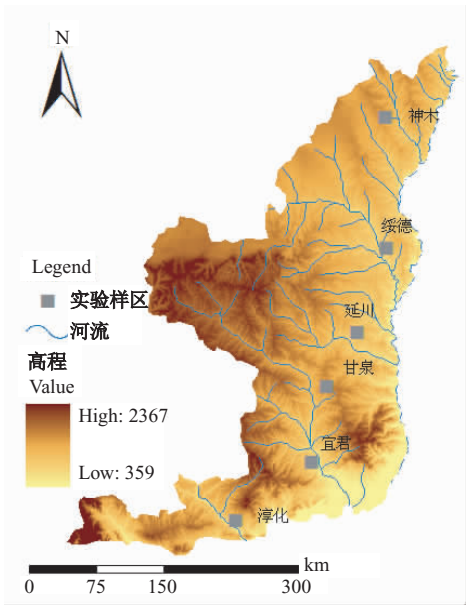


图 1 实验样区分布示意图

Fig. 1 Distribution of the test areas

为了消除样区选择随机性带来的误差,在每个实验样区选择 3 个 3000m×3000m 的样区。在选定的样区内以 1 : 10000 DEM 为高程基准均匀采点,采点密度为 80 点/km<sup>2</sup>,即采样率为 5%。然后采用不同的内插方法得到 25m 分辨率的 DEM,内插精度按照式(1)计算:

$$AI = 1/\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z - z)^2}{n}}$$

(1)

其中, $Z$  为采样点的高程值, $z$  为内插 DEM 相应点的高程值, $n$  为采样点数。本文所定义的内插精度实际上是中误差取倒数,目的是便于后面的 AMMI 模型分析。

表 1 实验样区概况

Tab. 1 General situation of the test areas

样区序号	地貌类型	基本地形信息
1 宜君	黄土长梁残塬沟壑	海拔 761~1 158m,相对高差 397m,地面平均坡度 19°
2 延川	黄土梁峁状丘陵沟壑	海拔 922~1 251m,相对高差 329m,地面平均坡度 31°
3 绥德	黄土峁状丘陵沟壑	海拔 814~1 188m,相对高差 374m,地面平均坡度 29°
4 神木	沙盖黄土低丘	海拔 1 005~1 322m,相对高差 317m,地面平均坡度 9°
5 甘泉	黄土长梁残塬沟壑	海拔 1 145~1 458m,相对高差 313m,地面平均坡度 26°
6 淳化	黄土塬	海拔 768~1 188m,相对高差 420m,地面平均坡度 12°

2.2 内插方法

本文实验选用数据生成与应用中最为常用的几种内插方法,分别是反距离加权法,普通克里格插值法,最邻近点插值法,样条插值法和 TOP to Raster 插值方法,为了便于后续分析,依次将上述插值方法标记为 A, B, C, D, E。实验平台为 ArcGIS 9. 3,试验中对于各种插值方法均保留软件的默认设置。

2.3 AMMI 模型

AMMI 模型的主要特点是将方差分析和主成分分析有机地结合在一起,具有如下形式:

$$y_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma_{gi} \delta_{ei} + \theta_{ge}$$

式中, $y_{ge}$ 是在区域  $e$  中插值方法  $g$  的插值精度, $\mu$  代表总体平均值, $\alpha_g$  是插值方法平均偏差(各个插值方法精度平均值减去总的精度平均值), $\beta_e$  是区域的平均偏差(各个区域的精度平均值减去总的精度平均值), $\lambda_i$  是第  $i$  个主成分分析的特征值, $\gamma_{gi}$  是第  $i$  个主成分的区域主成分得分, $\delta_{ei}$  是第  $i$  个主成分的插值方法主成分得分, $N$  是在模型主成分分析中主成分因子轴的总个数, $\theta_{ge}$  为残差。参数  $\sqrt{\lambda_i} \gamma_{gi}$ ,

$\sqrt{\lambda_i}\delta_{ei}$  分别被定义为插值方法  $g$  与区域  $e$  的第  $i$  个交互作用主成分分析, 简称为 IPCAr 值( $r=1, 2, \dots, N$ )。  $\sqrt{\lambda_i}\delta_{ei}$  可理解为第  $i$  个环境指数在区域  $e$  的数值, 相应的插值方法  $g$  在该环境指数的敏感度由  $\sqrt{\lambda_i}\gamma_{gi}$  度量。 这些环境指数之间是相互正交的。 模型中的参数  $N$  表明合理解释插值方法与区域环境的交互作用所需要的乘积项。

该模型采用双标图可以有效而又直观地解释分析结果, 常用的双标图有两种, 第一种是 AMMI1 双标图, 将插值方法的精度和区域的插值精度作为  $x$  轴, 将插值方法和区域的 IPCA1 值作为  $y$  轴; 第二种是 AMMI2 双标图, 这时  $x$  轴对应于插值方法和区域的 IPCA1 值,  $y$  轴对应于相应的 IPCA2 值。 根据文献[14]的分析, 在 AMMI2 双标图中, 把区域图标和坐标原点用直线连接, 可以直观地鉴别和比较各个插值方法在区域的交互作用估计值大小。 因为二项乘积之和:

$$\lambda_1 \gamma_{g1} \delta_{e1} + \lambda_2 \gamma_{g2} \delta_{e2} = (\sqrt{\lambda_1} \delta_{e1}, \sqrt{\lambda_2} \delta_{e2}) \cdot (\sqrt{\lambda_1} \gamma_{g1}, \sqrt{\lambda_2} \gamma_{g2})$$

为两向量的内积, 在图中等于原点和区域  $e$  图标的距离  $x$  乘以插值方法  $g$  的图标在原点和区域  $e$  的图标的连线上的垂直投影距离  $y$ (图 2)。 所以在某一区域, 与插值方法交互作用值的相对大小可以非常直观地由它们垂直投影长短比较而得, 投影越长则说明插值方法和插值区域的交互作用就越强, 相应的插值精度会越高。 更进一步, 可以通过将区域的 IPCA 值和实际区域的地形因子变量作相关分析, 以帮助解释不同插值方法在不同环境下的交互作用。

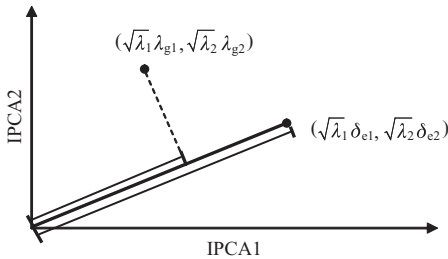


图 2 乘积和示意图(王磊,1997)[16]

Fig. 2 Graphical interpretation of inner products[16]

3 模型内插的不确定性分析

采用实验选取的内插方法, 依次对 6 个实验样区的离散高程点做内插, 然后依据(1)式计算内插

精度, 结果如表 2。

表 2 实验样区不同内插方法的精度值  
Tab. 2 Accuracy analysis of different interpolation methods

		反距离 加权/A	克里 金/B	最邻近 点/C	样条函 数/D	TOP to Raster/E
实验样区 1	1	0.685	0.065	0.224	0.393	0.348
	2	0.577	0.057	0.292	0.332	0.343
	3	0.640	0.056	0.283	0.367	0.337
.....			.....	.....	.....	
实验样区 6	1	0.776	0.137	0.418	0.474	0.303
	2	0.811	0.476	0.426	0.439	0.329
	3	1.155	0.786	0.413	0.709	0.422

首先对表 2 的数据进行方差分析, 分析结果见表 3。 可以看出, 地貌类型的平方和与内插方法的平方和均占较大比重, 在统计上是也是显著的, 表明两者对内插精度都有重要影响; 地貌类型与内插方法的交互作用的平方和较小, 但在统计上也是显著的。 因此, 由于各种插值方法与地貌类型对插值精度均有较大影响, 仅仅采用方差分析无法得到满意的结果, 有必要进行内插方法与地貌类型的交互作用分析。

表 3 方差分析和 AMMI 模型分析的结果  
Tab. 3 Results of variance analysis and AMMI analysis

误差来源	自由度	平方和	均方和	F-值	P-值
方差分析					
内插方法	4	2.4979	0.6245	44.4609	0.0001
地貌类型	5	3.9327	0.7865	56.0009	0.0001
交互作用	20	0.4512	0.0226	1.6063	0.0811
AMMI 模型分析					
第一乘积项	8	0.3610	0.0451	83.5195	0.0001
第二乘积项	6	0.0756	0.0126	23.3250	0.0001
残差	6	0.0147			

通过 AMMI 分析看出, 第一乘积项与第二乘积项分别解释了交互作用平方和中的 79.99% 和 16.75%, 残差近似为 0, 并且两个乘积项在统计上都是显著的。

基于地貌类型和插值方法平均误差和 IPCA1 值 AMMI1 的双标图如图 3 所示(图中字母分别为插值方法和实验样区的标记, 参见表 1、表 2): 在水平方向上地貌类型比插值方法更分散, 表明地貌类型对插值精度的影响要大于插值方法; 垂直方向表明插值方法与地貌类型交互作用的差异, 以 IPCA1

=0 作一条水平线,则插值方法与在此水平线一侧的地貌类型有正的交互作用,与另一侧的地貌类型的交互作用则为负,靠近水平线的插值方法是对所有地貌类型较为稳定的方法。因此,插值方法 A,B 适用于地貌类型 4 和 6,插值方法 C,D,E 则对地貌类型 1,2,3,5 更为适用;此外,插值方法 D 对所有地貌类型的适用性与其他方法相比更为稳定。

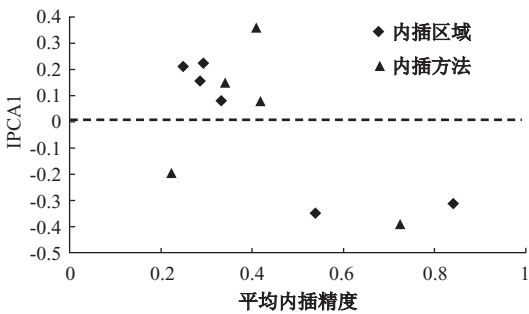


图 3 AMMI1 模型双标图  
Fig. 3 The biplot of AMMI1 model

图 4 给出了 AMMI2 双标图。从图中可以看出插值方法 D 在地貌类型 2, 3, 5 的图标和原点的连线上的投影长度不及插值方法 E 和 A,在地貌类型 4 的图标和原点的连线上的投影长度不及插值方法 A,表明尽管插值方法 D 对所有地貌类型而言是最稳定的,但是针对具体一种地貌类型而言,插值方法 D 并非最优。可以从图中看出,A 和 E 在 6 个地貌类型图标与原点的连线上的投影长度均较大。因此,如果仅考虑插值精度,插值方法 A 和 E 是最优的。

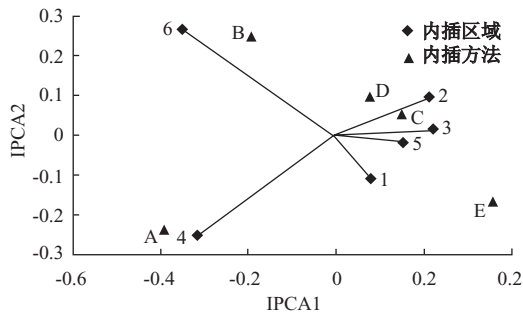


图 4 AMMI2 模型双标图  
Fig. 4 The biplot of AMMI2 model

为了探求交互作用与哪种因素相关联,本文计算了地貌类型的 IP-CA1 值,IPCA2 值和地貌类型的一些地形因子的相关系数(表 3)。从中看出,IP-CA1 和地表曲率(包括平面曲率和剖面曲率)、地表坡度以及高程标准差均呈显著相关,而这类地形因子代表了地面起伏的复杂度。因此,AMMI 模型的

第一环境指数(IPCA1)可以粗略地理解为某种地貌类型地形复杂度,具体可以用平均坡度来量化。而 IP-CA2 与各个地形因子均没有显著的相关关系,这可能是因为 IP-CA2 所解释的方差和占交互作用平方和的比例较小,因此,难以找到具体的因素与之对应。

表 4 地貌类型 IP-CA 值与地貌类型因子的相关系数  
Tab. 4 Correlation coefficient between IP-CA and landform parameters

	平面曲率	剖面曲率	坡度	高程标准差
IPCA1	0. 82	0. 818	0. 952	0. 818
IPCA2	0. 049	0. 093	0. 076	0. 178

\* \* 显著性水平  $p=0. 05$

4 结论

本文得出的主要结论为:(1)内插方法与地貌类型对于 DEM 内插精度存在显著的交互作用。第一环境指数可以解释绝大部分的交互作用,并且内插区域的坡度可以粗略的代表第一环境指数。(2)在采样率为 5%的前提下,样条函数法对所有研究的地貌类型区适应性的稳定性最好,反距离加权法与 Top to Raster 插值方法对所研究的地貌类型插值精度最高。而普通克里金法仅适用于黄土塬以及沙盖黄土低丘等平坦地貌类型。

AMMI 分析方法很好地结合了方差分析与回归分析的特点,特别适合于不同影响因素之间交互作用分析的问题。本文将该模型引入地学研究领域,对于充实地学数据分析的方法体系有一定的意义。今后拟通过扩大试验样区范围与 DEM 内插方法的选择,以及采用不同采样率下不同内插方法与地貌类型对 DEM 内插精度的交互作用,有望得到更好的结果。

参考文献:

[1] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003,125 - 126.  
[2] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2005,78 - 80.  
[3] 曹云刚. 基于分形理论的 DEM 数据内插算法研究[J]. 微计算机信息,2007,23(8):184 - 185.  
[4] 史秋晶,胡伍生. 神经网络 BP 算法在 DEM 内插中的应用研究[J]. 现代测绘,2007,30(5):3 - 5.

- [5] 沈涛,李成名,苏山舞. 基于水系改进的数字高程模型内插研究[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 535 - 539.
- [6] Tian-Xiang Yue, Zheng-Ping Du, Dun-Jiang Song. A new method of surface modeling and its application to DEM construction [J]. *Geomorphology*, 2007(91): 161 - 172.
- [7] 岳天祥,杜正平,宋敦江. 高精度曲面建模 HASM4 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 343 - 348.
- [8] 韩富江,刘学军,潘胜玲. DEM 内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 31 - 35.
- [9] 杨雯,刘洪利,胡卓玮,等. 数字高程模型内插方法的可视化对比研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(7): 136 - 138.
- [10] 蒋友谊,黎晓. 数字地面模型内插方法的优劣分析[J]. 西安科技学院学报, 2001, 21(3): 213 - 216.
- [11] 胡海,游涟,胡鹏,等. 数字高程内插方法的分析和选择[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(1): 82 - 85.
- [12] 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): 1467 - 1470.
- [13] 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): 1259 - 1262.
- [14] Crossa J, Gauch H G, Zobel R W. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials[J]. *Crop Sci*, 1990, 30: 493 - 500.
- [15] 唐启义,冯明光. DPS 数据处理系统—实验设计、统计分析 & 模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 485 - 492.
- [16] 王磊,杨仕华,谢美贤,等. AMMI 模型及其在作物区试数据分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 1997, 5(1): 39 - 46.
- [17] 常磊,柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3678 - 3684.
- [18] 王冬良,陈友根,吕国华. 基于 AMMI 模型的新疆日光温室适应性分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 148 - 152.

## Uncertainty Analysis of Different DEM Interpolation Methods Based on AMMI Model

ZHAO Mingwei<sup>1</sup>, TANG Guoan<sup>1</sup> and TIAN Jian<sup>1, 2</sup>

(1. *Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;*

*2. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)*

**Abstract:** Analysis of evaluation of interpolation models is a hot topic in the DEM interpolation studies. Most studies focused on the interpolation model in the last decades, while ignored the influencing factors between the interpolation models and environments. That is to say, on the one side, different interpolation models influence the accuracy of the analysis result; on the other side, difference environments also influence the accuracy of a certain interpolation model. In order to analysis the applicability of different interpolation methods in different environments, this paper selected test areas under different geomorphic types, and used the AMMI model to analyse the accuracy of the different interpolation models and the applicability of the studied models to different geomorphic types. The experiment results showed that the AMMI model could test the influencing factors between the interpolation models and the environments. Taking the test of this paper as an example, in the Northern Shaanxi region, the ordinary Kriging model is the best choice in the DEM construction. Finally, by analyzing the correlation coefficient between the environment coefficient and several landform parameters, it can be found that the slope gradient could represent the first environment coefficient.

**Key words:** AMMI model; DEM interpolation; accuracy; uncertainty