

引文格式:ZHANG Jinming, YOU Xiong, WAN Gang. Experimental Research on Optimization of DEM Interpolation Parameters[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(2): 178-185, 192. (张锦明, 游雄, 万刚. DEM 插值参数优选的试验研究[J]. 测绘学报, 2014, 43(2): 178-185, 192.) DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0026

## DEM 插值参数优选的试验研究

张锦明, 游 雄, 万 刚

信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450052

## Experimental Research on Optimization of DEM Interpolation Parameters

ZHANG Jinming, YOU Xiong, WAN Gang

Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

**Abstract** :Based on the difference of the weight determination method in interpolation algorithm, it is focused on selecting "optimized" interpolation parameters in interpolation method by selected related parameters with inverse distance weighted interpolation method, radial basis functions interpolation method and ordinary Kriging interpolation method. Firstly, according to the different effects of the interpolation parameters on interpolation accuracy, it takes the relevant interpolation parameters as the experimental object. Then chosen six different regions of landform types of the sparse distribution and discrete sampling data as data source. Finally applied a series of methods such as cross validation, correlation analysis, trend surface analysis and variance of analysis to systematic research on choosing optimized DEM interpolation parameters and proposed the uncertainty of the interpolation parameters of the "optimum" value range.

**Key words** :interpolation parameter; search type; kernel function; cross validation; correlation analysis; trend surface analysis; analysis of variance

**摘 要**:根据插值算法权重确定方法的差异,分别选取反距离加权插值算法、径向基函数插值算法和普通克里格插值算法中相关插值参数,进行“优选”试验研究。首先根据插值参数对插值精度的不同影响,选择相关插值参数作为试验研究对象,选择 6 种不同地貌类型地区的稀疏分布的离散采样点作为试验数据源。然后运用交叉验证法、相关分析、趋势面分析和方差分析等一系列试验方法,系统研究并给出试验插值参数的“最优”取值区间,消除插值参数选择的随意性,更好地指导 DEM 建模的运用。

**关键词**:插值参数; 搜索方式; 核函数; 交叉验证法; 相关分析; 趋势面分析; 方差分析

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2014)02-0178-08

基金项目:国家自然科学基金(40971239;41371383)

## 1 前 言

插值参数是构成插值算法的基本元素,包括搜索方式和插值核函数。不同的插值参数产生不同的插值结果,甚至存在巨大差异<sup>[1]</sup>。但是对于普通用户而言,选择合适的插值参数是困难的,直接导致空间插值成为一个“黑箱(black box)”,因此稳健的插值算法应提供可以理解的插值参数,或者给用户尽可能多的插值参数提示信息<sup>[2]</sup>。

文献[3]通过试验给出了不同插值算法的最佳搜索点数试验值。文献[4]认为克里格插值算

法几乎不受搜索点数的影响,而加权平均插值算法却严格依赖于搜索点数。对于反距离加权插值算法中的权指数取值而言,文献[5]认为取 1 或 2 比较合适,但文献[6]却认为取 2 将取得更好的试验效果。对于径向基函数插值算法中的光滑因子取值而言,虽然没有普遍认可的确定方法,但也有相关文献提出了各种方法:文献[7—9]提出了数值近似表达的方法;文献[10]提出了基于交叉验证的统计方法;文献[11]提出了使用递归算法寻找使得插值表面全局误差最小的方法;文献[12]认为多重二次曲面和多重对数径向基函数应使用

接近于零的光滑因子,反多重二次曲面、自然三次样条和薄板样条径向基函数则应使用非常大的光滑因子。

多数学者在选择插值参数时,大多是依赖经验直接指定。如文献[12]在研究地貌类型、采样密度和插值算法对规则格网精度的影响时,使用 8 个搜索点数完成径向基函数和反距离加权插值算法的计算;文献[13]在反距离加权插值算法自适应研究中,规定“邻域”指距离插值点最近的 5 个采样点组成的局部范围;文献[14]以距离插值点最近的格网点为中心,并以周围 8 个格网点完成似大地水准面格网双二次多项式插值方法的研究。但是仅依赖于经验确定取值,势必会造成插值结果的不确定性,甚至会导致空间分布的扭曲模型,做出潜在的错误决策<sup>[15]</sup>。

为此,本文根据插值算法最优权重确定方法的差异,选取反距离加权插值算法(inverse distance weighted, IDW)、径向基函数插值算法(radial basis functions, RBF)和普通克里格插值算法(ordinary Kriging, OK)的相关插值参数,进行插值参数的“优选”问题研究。首先阐述插值参数的含义,分析不同参数对 DEM 插值精度的影响,并选择搜索点数、搜索方向和插值核函数因子作为试验对象;然后选择 6 种不同地貌类型地区的稀疏分布的离散采样点作为试验数据源;最后利用交叉验证法、相关分析法、趋势面分析法和方差分析法等一系列试验方法,计算得到相关插值参数的“最优”取值区间,消除参数选择的随意性。

## 2 插值参数

### 2.1 搜索方式

对于绝大多数 DEM 插值算法而言,需要在邻域范围内完成插值点的高程计算,即以插值点为中心,确定一定尺寸的邻域(或是矩形邻域,或是圆形邻域),然后选择已知采样点完成插值计算,这一过程称为采样点的搜索方式。其控制选项包括:搜索形状、搜索方向、搜索点数、搜索邻域半径以及搜索时是否考虑等高线、结构线、断裂线或边界线,等等。搜索方式决定了采样点的选择,最终导致不同数量、分布方式的采样点影响着 DEM 的插值精度。

### 2.2 插值核函数

插值核函数指插值算法内部调节采样点对插值点权重影响的数学函数,是影响 DEM 插值精

度的重要因素之一<sup>[16]</sup>。插值核函数都是显式或隐式的距离函数(表 1),其地理意义直接或间接地表达了相邻两个空间对象之间的相关关系<sup>[1]</sup>。插值核函数因子是插值算法的关键因子,可能导致插值精度的提高,也可能导致插值精度的降低。

表 1 几种典型 DEM 插值算法的核函数

Tab.1 Kernel functions of several DEM interpolation methods

核函数	表达式( $d$ 为距离)	核函数因子
反距离加权 (IDW)	$p(d) = (d+t)^{-u}$	$u$ 为权指数; $t$ 为光滑因子
多重二次曲面函数(MQF)	$\varphi(d) = \sqrt{d^2+c^2}$	
反多重二次曲面函数(IMQF)	$\varphi(d) = \frac{1}{\sqrt{d^2+c^2}}$	
多重对数函数 (MLF)	$\varphi(d) = \ln(d^2+c^2)$	$c$ 为光滑因子
薄板样条函数 (TPSF)	$\varphi(d) = (d^2+c^2) \ln(d^2+c^2)$	
自然双三次样条函数(NCSF)	$\varphi(d) = (d^2+c^2)^{3/2}$	
线性函数 (LINE)	$\gamma(d) = C_0 + Cd$	
球形函数 (SPHERE)	$\gamma(d) = C_0 + C \left( \frac{3}{2} \frac{d}{a} - \frac{1}{2} \frac{d^3}{a^3} \right)$	$C_0$ 为块金值; $C$ 为拱高; $a$ 为变程
指数函数 (EXP)	$\gamma(d) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{d}{a}})$	
高斯函数 (GAUSS)	$\gamma(d) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{d^2}{a^2}})$	

### 2.3 试验插值参数

不同的插值参数产生不同的 DEM 插值精度。有些插值参数可能确定性优化或者确定性降低 DEM 插值精度,如插值过程中将等高线、结构线、断裂线或边界线等作为限制条件,本质是选择分布位置更为合理的采样点的问题,最终确定性提高 DEM 插值精度。对于等高线而言,如果跨越等高线选择其他等高线上的采样点,将导致地形的“块纹”现象<sup>[17]</sup>。对于结构线、断裂线、边界线而言,异侧的采样点存在地貌突变现象,如果参与插值计算,必将有损于 DEM 插值精度<sup>[18-19]</sup>。又如反距离加权插值算法中的光滑因子  $t$ ,其主要作用是平滑地形,使用不为零的光滑因子,直接导致山顶高程被降低,山谷高程被抬高,最终降低 DEM 插值精度。

另一些插值参数因地貌类型、采样点分布方式的差异,选择不同取值可能优化或降低 DEM 插值精度。如搜索方向、搜索点数(或搜索半径)、反距离加权插值算法中的权指数  $u$ 、径向基函数

插值算法中的光滑因子  $c$ 、克里格插值算法中的半变异函数的块金值  $C_0$ 、拱高  $C$ 、变程  $a$ 。

因此,本文总结了几种典型 DEM 插值算法中的对插值精度具有显著影响的参数,作为 DEM 插值参数“优选”试验的研究对象。

### 3 DEM 插值参数“优选”试验

#### 3.1 试验数据来源及特征

采样点数据获取的采样策略包括沿等高线采样、规则格网采样、渐进采样、选择性采样以及混合采样等,实践中应当根据不同的情况采用不同的数据采样策略<sup>[19]</sup>。因此,为不失一般性,本文选择具有代表性的 6 种不同地貌类型的地区作为试验区域,其面积均为  $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ ;试验数据来源于 30 m 分辨率的 ASTER GDEM,对其进行离散化处理得到稀疏分布的离散采样点作为试验数据源,其图形特征如图 1 所示(见文末),地形描述参数如表 2 所示。

表 2 试验区域的地形描述参数统计表

Tab.2 Major topographic variables

地貌类型	平原	丘陵	低山	中山	高山	混合
所属区域	江苏	山东	河南	贵州	西藏	辽宁
最低高程/m	2	33	285	1235	3940	575
最高高程/m	50	354	1444	2252	5769	1081
平均坡度/(°)	1.27	5.51	13.36	16.63	23.77	9.11

#### 3.2 试验对象

试验选取反距离加权插值算法、径向基函数插值算法、普通克里格插值算法中的相关插值参数为研究对象,试验取值如表 3 所示。

表 3 试验插值参数及其取值

Tab.3 Interpolation parameters and its experimental values

插值算法	搜索方向	搜索点数	核函数因子
加权平均	IDW		$u = 1, 2, 3, 4, 5$
	MQF		$c = 0, 20, 40, 60, 80, 100,$
径向基函数	IMQF	$D =$	$P = 1, 2, 200, 300, 400,$
	MLF	无方向、	$500, 600, 700,$
	TPSF	四方向、	$800, 900, 1000$
	NCSF	八方向	
普通克里格	LINE		试验拟合
	SPHERE		
	EXP		
	GAUSS		

#### 3.3 试验过程和方法

DEM 插值参数“优选”试验的流程如图 2 所示。

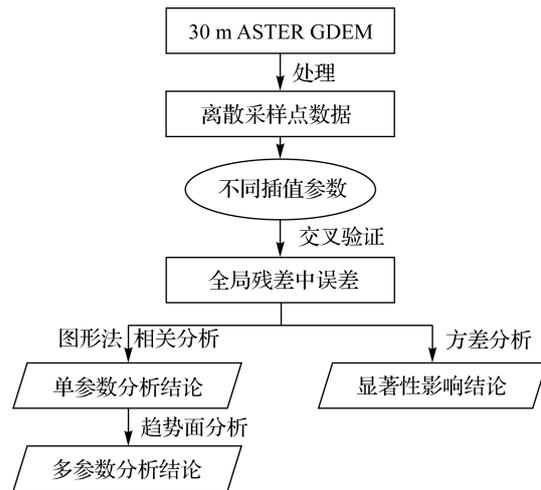


图 2 DEM 插值参数“优选”试验流程图

Fig.2 Flow chart of experiment

第 1 步:试验数据获取。

选取 6 种不同地貌类型区域的  $15\text{ km} \times 15\text{ km}$  范围内的 30 m 分辨率的 ASTER GDEM,离散化后作为试验数据源;

第 2 步:运用交叉验证法统计全局残差中误差值。

交叉验证法是一种与用户无关、与 DEM 网格尺寸无关的试验方法,可以让用户将关注点集中于插值参数本身。

试验中根据插值算法中不同插值参数的不同试验取值,运用交叉验证法计算每一采样点的残差值,并统计全局残差中误差值。然后以此为基础,运用各种分析方法确定插值参数的“最优”取值区间。以反距离加权插值算法为例,按照表 3 的插值参数试验取值,计算得到不同插值参数组合时的全局残差中误差值,如表 4 所示。

表 4 交叉验证试验结果(基于反距离加权插值算法)

Tab.4 Results of CV(based on IDW)

试验区域	搜索方向	搜索点数	权指数	全局残差中误差值/m
河南	无方向	4	1	4.039 5
	无方向	4	2	3.817 3
	无方向	4	3	3.938 1
	无方向	4	4	4.217 5
	无方向	4	5	4.532 4
	∴	∴	∴	∴
	四方向	4	1	2.611 7
	四方向	4	2	2.717 1
	四方向	4	3	3.342 9
	四方向	4	4	3.930 0
四方向	4	5	4.406 4	

第 3 步:基于全局残差中误差值,运用相关分析和图形法选择插值参数的“最优”取值区间相关分析是经典统计分析中最基本的方法,从统计分析角度定量分析要素之间的相关程度和拟合变量之间的数量关系。要素之间相关程度的测定,主要通过相关系数  $r$  的计算与检验完成。一般认为,当相关系数  $r$  的绝对值大于 0.8 时,表明两变量之间具有较强的线性关系;当相关系数  $r$  的绝对值小于 0.3 时,表明两变量之间的相关关系较弱<sup>[20]</sup>。

试验中运用相关分析法分析不同搜索方向时计算得到的中误差值之间的相关关系,确定搜索方向对 DEM 插值精度的影响,并选择“最优”的搜索方向。表 5 中不同搜索方向之间的相关系数均在 0.83 以上,特别是四方向和八方向的相关系数高达 0.99 以上(表中“D1×D2”表示四方向和八方向搜索时计算得到的中误差值之间的相关系数值),表明四方向和八方向搜索对 DEM 插值精度的影响不大。

表 5 不同搜索方向之间的相关系数(基于反距离加权插值算法)

Tab.5 Correlation coefficient between different search directions(based on IDW)

试验区	江苏	山东	河南	贵州	西藏	辽宁
D0×D1	0.959 1	0.990 1	0.929 3	0.952 4	0.877 4	0.978 3
D0×D2	0.958 4	0.991 5	0.908 3	0.939 5	0.835 8	0.976 1
D1×D2	0.998 0	0.999 4	0.998 2	0.998 9	0.996 3	0.999 7

如果结合相同搜索点数、插值核函数因子时不同搜索方向对应的中误差柱形图(图 3),可以发现:无方向限制搜索时建立的 DEM 插值精度最差,四方向搜索和八方向搜索相当,因此,综合考虑插值算法的插值效率和插值精度的前提下尽量使用四方向搜索。

第 4 步:基于全局残差中误差值,运用趋势面分析法验证插值参数的“最优”区间。

趋势面分析是利用数学函数模拟要素在空间上的分布及其变化趋势的方法,本质是通过回归分析,运用最小二乘拟合二维非线性函数,模拟要素在空间上的分布规律,展现要素在空间上的变化趋势<sup>[21]</sup>。

假设存在采样点  $(x_i, y_i, z_i)(i=1, 2, \dots, n)$ , 拟合回归方程  $z=f(x, y)$ , 使得

$$Q = \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i)]^2 \rightarrow \min$$

其中常用的  $f$  是多项式函数,因为任何函数在适

当范围内都可以用多项式函数逼近,并且可以根据需要调整多项式函数的次数。此外,需要用  $F$  检验来检验拟合得到非线性函数的适度问题,因为它直接关系趋势面分析的应用效果。

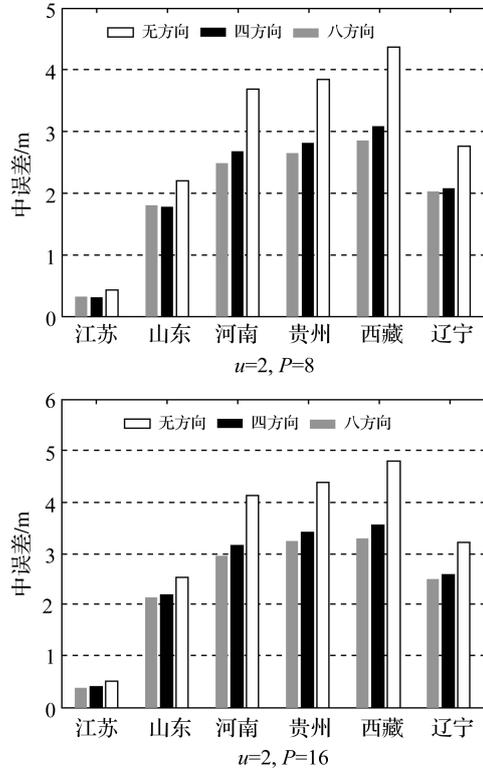


图 3 搜索方向对 DEM 插值精度的影响(基于 IDW)

Fig.3 Influence of search directions on DEM interpolation accuracy(based on IDW)

试验中运用趋势面分析法分析不同插值参数对 DEM 插值精度的影响,从空间分布趋势角度确定插值参数的“最优”取值区间。表 6(见文末)中以搜索点数为  $x$  轴、光滑因子为  $y$  轴、中误差为  $z$  轴进行三次多项式趋势面分析,从空间连续变化的角度观察搜索点数、光滑因子对 DEM 插值精度的影响趋势。可以发现,搜索点数、光滑因子对中误差的趋势面函数拟合程度极高,可决系数  $(R^2)$  达到 0.928 3;查  $F$  分布表得  $F_{0.05}(9, 95) = 1.96$  小于计算  $F$  值(158.315 8),表明三次趋势面拟合函数在 0.05 的置信水平下是显著的。其次从趋势面拟合效果图中可以清楚地看到,中误差较小的区域集中在搜索点数 20~24 点之间且光滑因子接近于 0;中误差较大的区域集中在光滑因子较大或搜索点数 44~56 点之间。

第 5 步:基于全局残差中误差值,运用方差分析法研究各插值参数的显著性差异。

方差分析用于两个或两个以上样本均数差别的显著性检验,研究不同因素的变异对总变异的贡献大小,并分析不同水平的控制因素是否对结果产生了显著性影响<sup>[22]</sup>。方差分析的  $p$  值常用于推断控制因素显著性影响程度的指标,假设给定置信水平 0.05,当计算得到的  $p$  值小于或等于 0.05 时,可以认为控制因素对试验结果存在显著性影响。

试验中运用方差分析法分析插值参数对 DEM 插值精度的显著性影响程度,提示用户改进哪个参数可以更有效地改善插值效果。

表 7 中,如果考虑半变异函数模型和搜索点数对 DEM 插值精度的影响,则半变异函数模型及两者的交互作用对 DEM 插值精度都具有显著

性影响(即  $p < 0.05$ ),而搜索点数对 DEM 插值精度不具有显著性影响(即  $p = 0.320 2 > 0.05$ );考虑搜索方向和搜索点数对 DEM 插值精度的影响,则搜索点数对 DEM 插值精度具有显著性影响,而搜索方向和两者交互作用不具有显著性影响;考虑半变异函数模型和搜索方向对 DEM 插值精度的影响,则半变异函数模型对 DEM 插值精度具有显著性影响,而搜索方向和两者交互作用不具有显著性影响。因此,可以认为三因素对 DEM 插值精度的显著性影响程度的顺序为“半变异函数模型 > 搜索点数 > 搜索方向”,其中搜索方向对 DEM 插值精度不具显著性影响。

表 7 半变异函数模型、搜索点数、搜索方向对 DEM 插值精度的显著性影响(基于克里格插值算法)

Tab.7 Significant influence of semivariogram function, search points and search directions on DEM interpolation accuracy (based on KRG)

试验区域	变异来源	平方和(SS)	自由度(DF)	均方(MS)	F 值	p 值
山东	“半变异函数模型”间	311.246 6	3	103.748 9	19.653 0	0.000 1
	“搜索点数”间	27.721 4	4	6.930 4	1.313 0	0.320 2
	半变异函数模型×搜索点数	63.349 5	12	5.279 1	110.190 0	0.000 0
	“搜索方向”间	0.009 2	2	0.004 6	0.205 0	0.818 8
	“搜索点数”间	0.618 1	4	0.154 5	6.858 0	0.010 6
	搜索方向×搜索点数	0.180 3	8	0.022 5	0.022 0	1.000 0
	“半变异函数模型”间	39.523 4	3	13.174 5	346.410 0	0.000 0
	“搜索方向”间	0.009 2	2	0.004 6	0.121 0	0.887 8
	半变异函数模型×搜索方向	0.228 2	6	0.038 0	0.239 0	0.961 2

#### 4 试验结果及分析

按照第 3 节的描述,本文运用一系列试验方法,计算得到了几种典型 DEM 插值算法中插值

参数的“最优”取值区间,如表 8 所示。结合插值算法的特性分析结果,探索插值参数的“优选”规律,以便更好地指导 DEM 建模的运用。

表 8 试验插值参数的“优选”区间

Tab.8 “Optimization” interval of interpolation parameters

插值算法	搜索点数	搜索方向	插值核函数因子	各因素影响程度
加权平均	IDW	$P = 4 - 12$	$D = 四方向$	$u = 2 - 3$ 权指数 > 搜索点数 > 搜索方向
	MQF	$P = 24 - 32$	$D = 四方向$	$c = 0 - 200$ 搜索点数 > 光滑因子 > 搜索方向
	IMQF	$P < 12$	$D = 四方向$	$c = 1000$ 或极大 —
径向基函数	MLF	$P = 20 - 24$	$D = 四方向$	$c = 0$ 搜索点数 > 光滑因子 > 搜索方向
	TPSF	$P > 32$	$D = 四方向$	$c = 0$ 光滑因子 > 搜索点数 > 搜索方向
	NCSF	$P > 32$	$D = 四方向$	$c = 0$ 光滑因子 > 搜索点数 > 搜索方向
	LINE	$P = 8 - 16$		
克里格	SPHERE	$P = 8 - 16$	$D = 无方向$	半变异函数模型 > 搜索点数 > 搜索方向
	EXP	$P = 8 - 16$		
	GAUSS	$P = 4 - 8$		

反距离加权插值算法是一种精确性插值算法,插值生成的最大值和最小值只会出现在采样

点处,随着搜索点数的增加,采样点间的高差逐渐增大,最终导致插值精度降低,因此较少的搜索点

数是合适的选择(图 4)。

其次随着权指数  $u$  的增加,每一采样点对插值点的权重影响的敏感程度增加,表现在距离较近的采样点的贡献率显著增加,而距离较远的采样点的贡献率逐渐降低,因此较大或较小的权指数都不是理想的选择。更为重要的是,试验结果表明权指数、搜索点数和搜索方向三参数对 DEM 插值精度影响程度为“权指数 > 搜索点数 > 搜索方向”,因此适时改变权指数可以更明显地提高插值精度。

径向基函数插值算法同样是一种精确性插值算法,与反距离加权插值算法相比,它可以计算出高于或者低于采样点的高程值,因此搜索点数的选择和反距离加权插值算法存在差异。MQF 和 MLF 的“最优”取值区间在 20~32 点之间或大于 64 点(考虑插值效率取小值更为合适)(图 5),IMQF 的“最优”取值区间小于 12 点,TPSF 和 NCSF 的“最优”取值区间大于 32 点。这和其他研究成果都不一致,特别是 TPSF 和 NCSF,当搜索点数大于 32 点时,几乎可以获得最佳的插值结果。其次,径向基函数插值算法的核函数属于典型的对称性距离函数,因此使用较少搜索方向可能导致较差的插值精度。第三,径向基函数插值算法的核函数中光滑因子是影响插值精度的重要参数之一,光滑因子的“最优”取值区间也和 Aguilar 的研究成果存在较大差异。对于 MQF、MLF 而言,较小的光滑因子是合适的;对于 IMQF 而言,需要选择极大的光滑因子,较小的光滑因子导致极大的数值不稳定性;对于 TPSF、NCSF 而言,当搜索点数较少时,TPSF、NCSF 产生显著的数值不稳定性,随着光滑因子的增加,这种数值不稳定性消失;当搜索点数较大( $>32$ )时,TPSF、NCSF 插值的数值不稳定性消失,可以得到最佳的插值结果,但是随着光滑因子的增加,数值不稳定性逐渐表现出来,可能这就是为什么 Aguilar 认为需要使用极大光滑因子的原因。同样,试验结果表明光滑因子、搜索点数和搜索方向三参数对 DEM 插值精度影响程度因径向基函数的差异而有不同表现(表 8):对于 MQF、MLF 而言,搜索点数的影响程度更高;对于 TPSF、NCSF 而言,光滑因子的影响程度更高;而对于 IMQF 而言,由于插值结果的数值不稳定性,无法判断各参数的影响程度高低。

普通克里格插值算法在插值过程中需要根据

试验数据建立试验半变异函数,即选择合适的半变异函数模型及其拟合值。如果试验数据不存在合适的试验半变异函数,将导致不能得到理想的插值结果<sup>[23]</sup>,因此半变异函数模型对 DEM 插值精度具有最大的显著性影响。同时试验还表明:第一,线性模型始终具有稳定的插值结果,而且随着搜索点数的增大,中误差值呈现逐步衰减并趋于稳定的趋势。第二,在所有半变异函数模型中,块金值的作用异常明显。当块金值为 0 或较小时,指数模型的插值结果和线性模型几乎一致,且插值中误差较小;当块金值较大时,则插值中误差较为明显(图 6)。显然和块金值的含义存在很大关系,即块金值代表的是离散采样点集中的取样误差和小尺度变化引起的误差等<sup>[23]</sup>。第三,克里格插值算法的一个重要特性是屏蔽效应<sup>[25]</sup>,可以消除较多搜索点数和搜索方向对 DEM 插值精度的影响,因此较少搜索点数和无方向限制搜索是合理的取值。

## 5 结 论

本文运用交叉验证法、相关分析、趋势面分析和方差分析等方法研究了四种典型插值算法的插值参数的“最优”取值区间。由于 DEM 插值过程中,并没有任何一个方法可以实现地形特征的自动判别,并选择适宜的插值算法和相应插值参数,因此向用户提供更多的插值参数提示信息,消除插值参数选择的随意性,就显得尤为重要。其次,试验过程中并没有考虑某些特殊取样可能对某些插值算法产生的“异常”影响,如 IMQF、TPSF、NCSF 等插值残差中存在的极大值,因此通过全局残差中误差计算得到的插值参数“最优”取值区间,在稳健型、抗差性方面是“最优”的选择。再次,搜索方向作为影响 DEM 插值精度的因素之一,和其他因素相比较而言,其影响程度最低。并随着 InSAR、LiDAR 等新型的数据获取手段的出现<sup>[19]</sup>,使得获取的采样点精度不断提高、分布日益密集,因此在实际建模过程中可以淡化,甚至忽略搜索方向的选择。

不同插值算法的插值参数是不同的,因此如何确定其他插值算法的插值参数“优选”区间是下一步研究试验工作,即将现有算法进行合理的分类,并得出各种插值算法的参数“优选”规律,将能更好地指导 DEM 建模的运用。

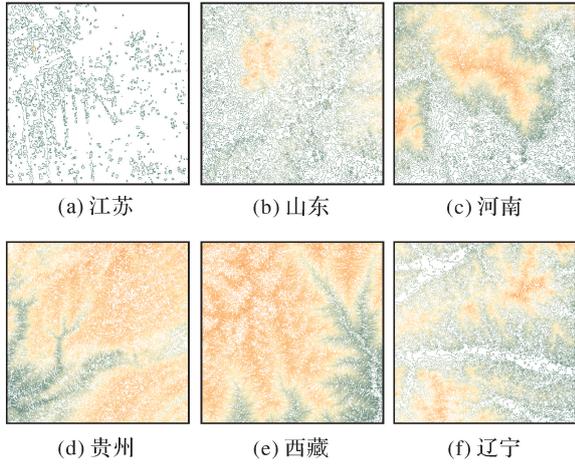


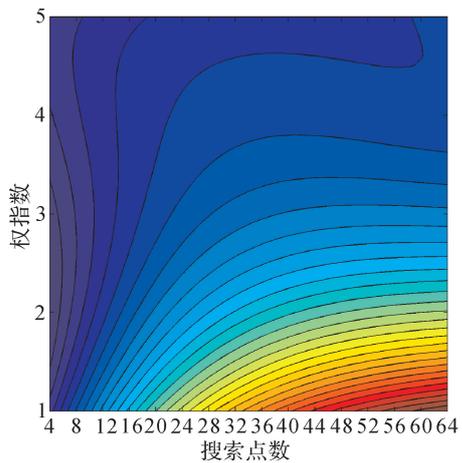
图1 试验区域透视效果图

Fig.1 Perspective rendering of experimental regions

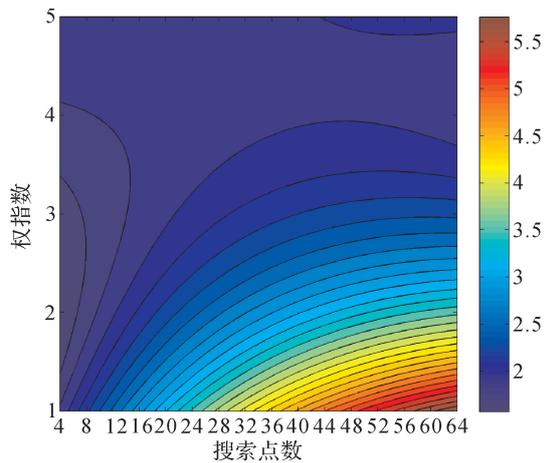
表6 搜索点数、光滑因子和中误差的趋势面分析结果 (基于MLF 径向基函数插值算法)

Tab.6 Results of trend surface analysis between search points, smooth factor and RMSE (based on MLF RBF)

试验区域	河南
拟合效果图	
$F$ 值	158.315 8
$p$ 值	0
$R^2$ 值	0.928 3



(a) 江苏试验区域



(b) 山东试验区域

图4 趋势面分析结果(基于反距离加权插值算法)

Fig.4 Results of trend surface analysis(based on IDW)

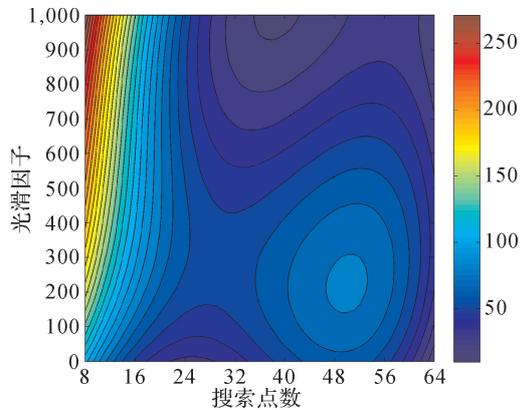
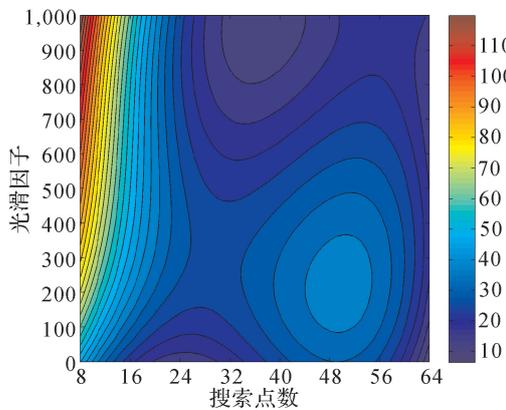
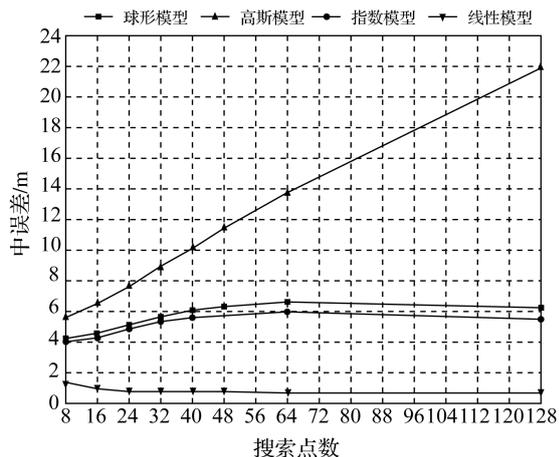
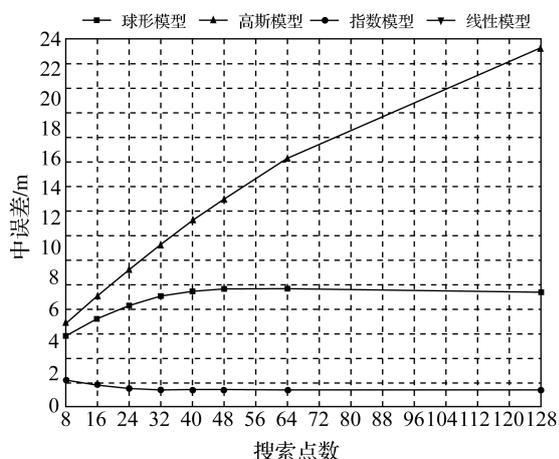


图5 趋势面分析结果(基于MQF 径向基函数插值算法)

Fig.5 Results of trend surface analysis(based on MQF RBF)



(a) 西藏试验区域



(b) 辽宁试验区

图 6 不同半变异函数时搜索点数和 DEM 插值误差的关系

Fig.6 Results of trend surface analysis

参考文献:

[1] 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.)

[2] HOFIERKA J, CEBCAUER T, ŠŮRI M. Optimisation of Interpolation Parameters Using a Cross-validation [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(4): 461-477.

[3] WANG Jiayao. Principles of Spatial Information System[M]. Beijing: Science Press, 2001. (王家耀. 空间信息系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.)

[4] GAO J. Construction of Regular Grid DEMs from Digitized Contour Lines: A Comparative Study of Three Interpolators[J]. Geographic Information Sciences, 2001, 7(1): 8-15.

[5] LAM N S. Spatial Interpolation Methods: A Review[J]. The American Cartographer, 1983, 10(2): 129-149.

[6] F A N D. Interpolation Methods for Scattered Sample Data: Accuracy, Spatial Patterns, Processing Time[J]. Cartography

and Geographic Information Systems, 1996, 23(3): 128-144.

[7] HARDY R L. Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(8): 1905-1915.

[8] FRANKE R. Scattered Data Interpolation: Tests of Some Methods [J]. Mathematics of Computation, 1982, 38(157): 181-200.

[9] FOLEY T A. Interpolation and Approximation of 3-D and 4-D Scattered Data [J]. Computers & Mathematics with Applications, 1987, 13(8): 711-740.

[10] LI J, CHEN C S. A Simple Efficient Algorithm for Interpolation between Different Grids in Both 2D and 3D [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 58(2): 125-132.

[11] RIPPA S. An Algorithm for Selecting a Good Value for the Parameter C in Radial Basis Function Interpolation [J]. Advances in Computational Mathematics, 1999, 11(2-3): 193-210.

[12] AGUILAR F J, AGÜERA F, AGUILAR M A, et al. Effects of Terrain Morphology, Sampling Density and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(7): 805-816.

[13] GEORGE Y L, DAVID W W. An Adaptive Inverse Distance Weighting Spatial Interpolation Technique [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(9): 1044-1055.

[14] DENG Xingsheng, GUO Yunkai, HUA Xianghong. Quasigeod Grid Network Biquadratic Interpolation Method [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(1): 35-40. (邓兴升, 郭云开, 花向红. 似大地水准面格网双二次多项式插值方法 [J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 35-40.)

[15] LONGLEY P A, GOODCHILD M F, MAGUIRE D J, et al. Geographical Information Systems: vol 1: Principles and Technical Issues [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

[16] SMITH de M J, GOODCHILD M F, LONGLEY P A. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principle, Techniques and Software Tools [M]. 2nd ed. London: The Winchelsea Press, 2007.

[17] GAO Jun, XIA Yunjun, YOU Xiong, et al. Virtual Reality in Terrain Environment Simulation [M]. Beijing: PLA Publishing House, 1999. (高俊, 夏运均, 游雄, 等. 虚拟现实在地形环境仿真中的应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 1999.)

[18] TANG Guoan, LIU Xuejun, LV Guonian. Principle and Method of DEM and Geoscience Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2005. (汤国安, 刘学军, 阚国年. 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.)

[19] LI Zhilin, ZHU Qing. Digital Elevation Model [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 第 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.)