

郑向向, 帅向华. 2013. 基于地质统计方法与 DEM 的地震灾情空间插值研究. 地震学报, 35(4): 573-583.
Zheng Xiangxiang, Shuai Xianghua. 2013. Research on spatial interpolation of earthquake disaster information based on geostatistics and DEM. *Acta Seismologica Sinica*, 35(4): 573-583.

基于地质统计方法与 DEM 的地震灾情空间插值研究^{*}

郑向向¹⁾ 帅向华^{2,1),*}

1) 中国北京 100083 中国国土资源航空物探遥感中心

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 历次破坏性地震的震害调查和强震观测资料显示, 地形地貌对地震灾害有着显著的影响。地震发生后, 为了能够及时、准确地为地震救灾指挥部提供灾情分布信息, 该文借鉴了地质统计学方法, 利用灾情速报人员上报的地震现场离散点灾情短信对灾区进行灾情空间模拟的同时, 将数学高程模型(DEM)中所包含的高程、坡度等地形地貌信息作为影响因素引入协克里金(Co-Kriging)插值; 并以汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震灾情短信数据为例, 分别对确定性插值、地质统计学插值结果与有无考虑坡度因素的地质统计学插值结果进行了交叉检验。结果表明, 考虑坡度影响因素的协克里金插值在合适的模型和参数下取得了最优的灾情模拟效果。该方法为地震应急期间进行较高精度的灾情模拟提供了一种新的可行思路。

关键词 地质统计学方法 DEM 空间插值 地震应急 地震灾情短信

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.012 中图分类号: P315.08 文献标志码: A

Research on spatial interpolation of earthquake disaster information based on geostatistics and DEM

Zheng Xiangxiang¹⁾ Shuai Xianghua^{2,1),*}

1) Aero Geophysical Survey, Remote Sensing Center, Ministry of Land and Resources,
Beijing 100083, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: Previous surveys and observations of destructive earthquake damage indicate that topography had a significant influence on earthquake disaster. After an earthquake, in order to provide the distribution of earthquake damage timely and accurately for earthquake relief headquarters, in reference to the concept of geostatistics, we performed spatial simulation for the disaster area using the earthquake disaster SMS provided by the quick reporters of disaster, and took essential geomorphologic factors (e. g., elevation, slope obtained from DEM) into Co-Kriging interpolation. This paper took the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquake for example, and used its disaster SMS data to do spatial interpolation by different ways. The results obtained by different ways of spatial inter-

* 基金项目 地震行业科研专项(201108002-04)资助。

收稿日期 2012-03-06 收到初稿, 2013-02-05 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: shuaixhua@sina.com

polation and different semi-variogram models of geostatistics methods were compared, which indicates that with the help of suitable model and parameter, Co-Kriging interpolation with the consideration of slope can provide the best result of disaster simulation. This method provides a new and feasible idea for earthquake disaster simulation during the emergency.

Key words: geostatistics; digital elevation model; spatial interpolation; earthquake emergency; SMS of earthquake disaster

引言

地震造成的破坏和影响程度不仅与地震震级、震源深度、震中距及建筑物易损性等因素有关,还与局部地形地貌密不可分。历次破坏性地震的震害调查和强震动观测资料显示,局部地形对震害有着显著的影响(薄景山等,2003)。因此,高程和坡度作为地形的数字化表示是震害的影响因子。在震害影响因素中,震级、震源深度、震中距等为主要影响因子,它们决定着震区灾情的总体情况,而高程和坡度(特别是坡度)影响着局部灾情的变化,坡度大的地方地势陡,容易由地震引发滑坡等次生灾害。地震发生后,第一时间获取大致准确的灾情信息是地震应急的关键,也是一切救援工作的基础。但地震灾情短信数据的缺乏,不均匀分布,以及震区复杂地形的影响,都无疑增加了我们掌握灾情的难度。这就要求我们对震区的灾情分布进行模拟时,选择合适并且模拟结果精度高的空间插值方法,以便通过离散的地震灾情采样点短信数据就能准确地掌握区域的受灾情况,真正做到“以点带面”。

本文分别探讨常用的确定性插值方法和地质统计学插值方法对地震灾情的模拟,重点研究坡度因素对地震灾情模拟结果的影响,并对各方法的结果进行交叉检验,从而得出适合灾区的灾情空间插值方法,揭示了灾区地震灾情的空间分布特征。

1 空间插值方法的基本原理

空间数据的插值是从一组已知空间数据中找到一个函数关系式,使该关系式较好地逼近已知的空间数据,并能根据该函数关系式推求出区域范围内其它任意点的值。按照地质统计学的观点,空间插值方法可分为确定性插值和地质统计学插值。

1.1 确定性插值

确定性插值是基于信息点之间的相似程度或者整个曲面的光滑性来创建一个拟合曲面,如反距离权、径向基函数、全局多项式及局部多项式等插值方法都属于确定性插值。常用确定性插值方法如表1所示。

确定性插值方法不提供插值预测的误差评价。通常情况下,当需要插值的区域采样点数据量较大时,采用确定性插值方法会取得较高的拟合精度。反之,插值精度则会低一些。由于我们做地震灾情数据插值的目的是了解震后的受灾情况,并不是估量其长期发展趋势,所以本文在对地震灾情数据进行确定性插值时采用了反距离权和径向基函数两种方法。

1.2 地质统计学插值

地质统计学插值是利用样本点的统计规律,使样本点之间的空间自相关性定量化,从而在待预测点周围构建样本点的空间结构模型,如克里金、协克里金等方法。一个完整的

表 1 4 种常用确定性插值方法
Table 1 Common deterministic interpolation method

方法	原理与公式	适用范围
反距离权插值	$f(x, y) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^n} \cdot Z_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^n} \right)$ $n=1$ 或 2 式中, d_i 是待插点到已知点的距离, $f(x, y)$ 为要求的待插点的值	适用于呈均匀分布且密集程度足以反映局部差异的样点数据集
径向基函数插值	$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j)$ 式中, $T(x, y)$ 表达局部趋势函数, $R(r)$ 为基函数, 用来获取最小的曲率表面, $T(x, y)$ 和 $R(r)$ 表达式的不同, 决定了不同的径向基函数. 常用函数有倒转复二次函数、复对数、复二次函数、自然三次样条函数、薄板样条函数等.	适用于根据大量数据点生成平缓变化的表面(如高程). 但表面值在短距离内出现剧烈变化, 或怀疑样本值有测量误差或不确定性时, 该方法不适用
全局多项式插值	$Z_p = a \cdot x^2 + b \cdot xy + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \cdot y + f$ 式中, a, b, c, d, e, f 为待定系数, Z_p 为待插点的值	适用于在数据集中创建平滑表面及标识长期趋势. 当研究区域范围较大, 且地形很复杂时, 计算成本很大
局部多项式插值	$Z_p = a \cdot x^2 + b \cdot xy + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \cdot y + f$ (多个) 式中, a, b, c, d, e, f 为待定系数, Z_p 为待插点的值	适用于当数据集显示出短程变化时的情况. 该方法是对全局多项式的一大改进

地质统计学插值过程应首先获取原始数据, 并检查、分析数据, 找寻数据暗含的特点和规律, 比如是否为正态分布, 有无趋势效应及各向异性等; 然后选择合适的模型进行表面预测, 其中包括变异函数模型的选择; 最后通过设置不同参数或者选择多个可选模型创建表面, 通过对比分析确定哪个模型对未知值的预测更好(汤国安, 杨昕, 2006).

克里金插值是地质统计学的主要内容之一. 它以变异函数理论和结构分析为基础, 根据未知样点有限邻域内的若干已知样本点数据, 在考虑样本点的形状、大小和空间方位与未知样点的相互空间位置关系, 以及变异函数提供的结构信息之后, 对未知样点进行的一种线性无偏最优估计. 偏移出现与否和对区域变量的解释导致了不同克里金方法的出现(孟庆香等, 2009), 主要有以下几种类型: 普通克里金、协克里金、简单克里金、泛克里金、指示克里金、概率克里金、析取克里金等. 但总体而言, 克里金方法认为当空间变量的结构性成分确定后, 剩余的差异变化属于同质变化, 不同位置之间的差异仅是距离的函数, 可以表示为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中, $Z(x_0)$ 为 x_0 处的估计值, $Z(x_i)$ 为 x_i 处观测值, λ_i 为克里金权重系数, n 为观测点个数.

协克里金方法与克里金方法是一致的, 不同之处在于它综合考虑了影响某一空间信息的多因子共同作用. 借助协克里金方法, 可以利用几个空间变量之间的相关性, 对其中的一个或多个变量进行空间插值, 以提高估计的精度和合理性(孟庆香等, 2009). 假设在待估计点 x_0 的领域内共有 n 个实测点, 即 x_1, x_2, \dots, x_n , 其空间估计值 $Z(x_0)$ 由两个区域化变量 $Z_1(x_i)$ 和 $Z_2(x_i)$ 共同决定, 则协克里金插值的计算公式为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n a_i Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^n b_j Z_2(x_j) \quad (2)$$

式中, a_i , b_j 为权重系数, 分别表示各空间样本点 x_i , x_j 处观测值 $Z_1(x_i)$ 和 $Z_2(x_j)$ 对估计值 $Z(x_0)$ 的贡献程度.

此外, 地质统计学方法的插值的精度与选择的变异函数模型密切相关. 通常变异函数的模型是根据半变异函数云图的分布, 以实验方差最小为原则选择合适的变异函数理论模型. 常用变异函数的理论模型有

1) 圆形模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \cdot \frac{h}{a} - \frac{2h}{\pi a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (3)$$

2) 球形模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C [1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (4)$$

3) 指数模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C (1 + e^{-\frac{h}{a}}) & h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

4) 高斯模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C [1 - e^{-\left(\frac{h}{a} \right)^2}] & h > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\gamma(h)$ 称为变异函数, 用于表征随机变量的空间变异结构; h 为两样本间的距离; $C_0 + C$ 为基台值, 表示变量空间变异的结构性方差; C_0 为块金值, 代表随机变异的量; a 为变程, 即影响距离的范围. 块金系数是块金值与基台值的比值, 用于反映变量的空间自相关程度.

2 汶川地震灾情空间分布模拟

2.1 数据预处理

本文选取的数据为汶川 $M_s 8.0$ 地震 73 条有效灾情采样点的短信数据和地震影响区域 90 m 分辨率的数字高程模型(digital elevation model, 简写为 DEM)数据 SRTM3. 其中地震灾情短信数据的内容是根据地震造成的破坏程度和影响范围设计的 4 级灾情短信编码: 1 表示无震感或震感轻; 2 表示震感强, 无破坏; 3 表示有破坏, 无伤亡; 4 表示破坏重, 有伤亡. 这 73 条短信数据是从 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 4 秒—24 时收到的 600 余条灾情上报短信中分析提取出来的(帅向华等, 2009). 随后从现有的灾区 DEM 数据中借助 ArcGIS 计算出灾区的坡度, 再通过“按点提取属性值”将汶川 73 个地震灾情采样点的坡度提取出来, 以便进行灾情数据插值时作为影响灾情的变量进行考虑. 汶川 73 个地震灾情短信采样点的空间分布如图 1 所示.

2.2 汶川地震灾情空间插值

在对数据进行预处理之后, 我们就可以选用不同方法对汶川地震灾情短信数据进行插

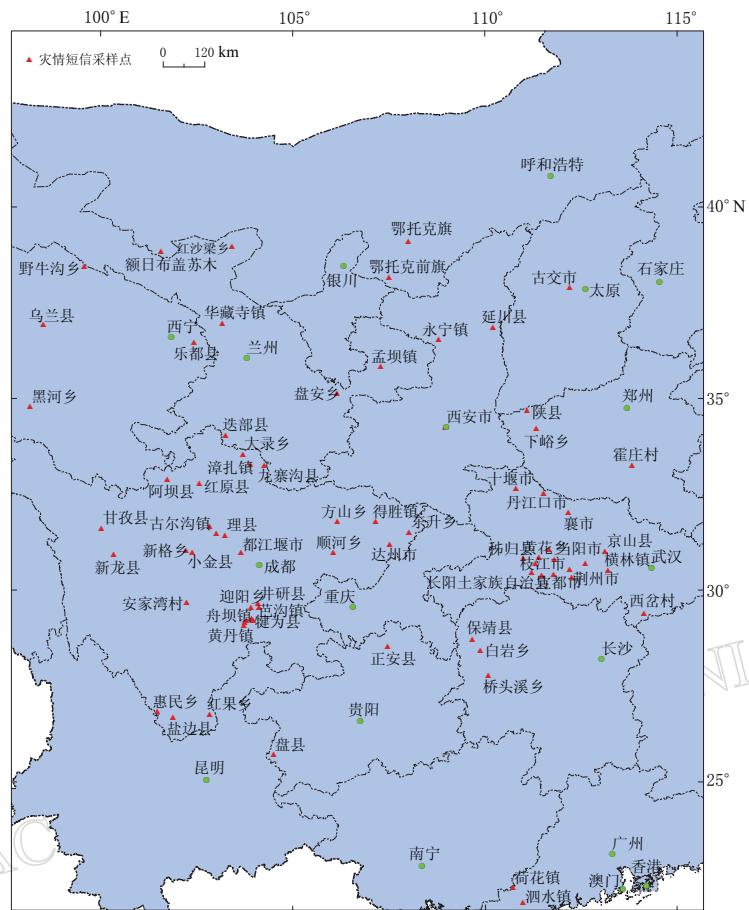


图 1 汶川地震 73 个灾情短信采样点空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of 73 earthquake SMS points

值以获取区域的受灾情况。我们从插值精度及插值结果与实际灾情的吻合程度两个指标评价不同的插值方法。为此，我们首先比较了确定性插值方法与地质统计学插值方法的灾情插值结果，然后又对是否考虑坡度因素的地质统计学方法的插值结果进行了分析比较。其中确定性插值采用了反距离权和径向基函数方法。在进行确定性插值前，我们在 ArcGIS 提供的地质统计学模块下计算插值所需的最优权重，然后按确定的权重完成对数据的插值；而地质统计学插值采用了普通克里金插值和考虑坡度因素的协克里金插值方法。进行地质统计学插值前，需要对数据进行探索性分析，以便深入了解数据的内在规律性，从而选择合适的参数和理论变异函数模型。一组数据是否适合地质统计学插值首先取决于这组数据是否符合正态分布。

使用 ArcGIS 地质统计学分析模块提供的检验工具对数据进行正态分布检验。若数据的直方图呈钟形曲线或者其正态 QQPlot 分布图 (QQPlot 图用来直观检验数据是否来自于正态分布) 中的采样点分布近乎一条直线，则表示该数据集呈正态分布。本文所用的地震灾情短信采样点数据的直方图如图 2 所示，地震灾情采样点坡度值在对数变换后的正态 QQPlot 分布如图 3 所示。由图 2、图 3 可以看出，地震灾情短信采样点数据和对数转换后各采样点的坡度数据接近于正态分布，故可以利用地质统计学方法来研究其空间分布。

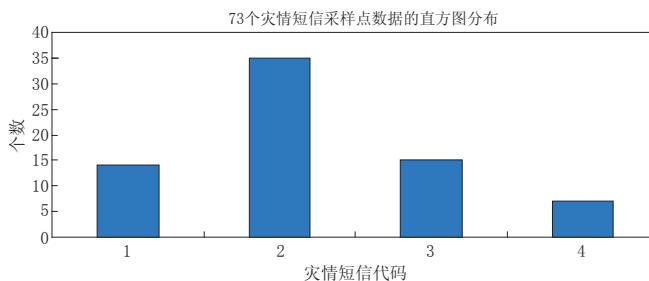


图 2 灾情短信数据集直方图

Fig. 2 Histogram of the earthquake SMS data

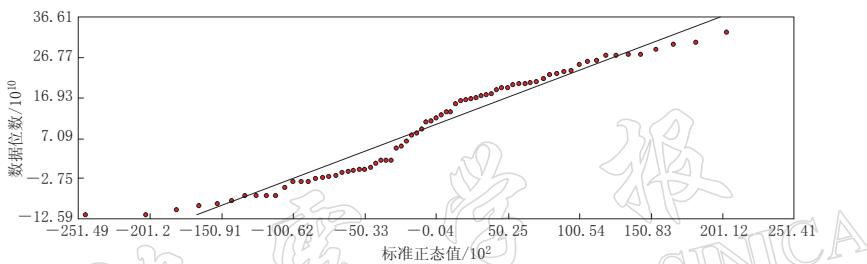


图 3 73 个灾情短信点坡度的正态 QQPlot 分布

Fig. 3 Normal QQPlot distribution of slope data at 73 earthquake SMS points

地质统计学插值受数据计算的限制,因此要选择合适的半变异函数参数。由于数据是不规则格网数据,故要设置最大步长和分组(Lag)步长两个参数。其中,最大步长取值应该小于研究区域采样点之间最大尺度的一半。本文所采用数据中距离最远的两个灾情短信点位于青海海北藏族自治州的野牛沟乡和位于广东省高州市的泗水镇,相隔大约 2144 355 m。因此,可选取此距离值的一半,即 1072 178 m 作为半方差分析的最大步长值。Lag 步长大小的选择对经验半变异函数有重要影响。如果 Lag 步长过大,短程自相关可能会被淹没;如果 Lag 步长过小,可能会有许多空条柱单元,并且条柱单元内的采样过小,无法获得条柱单元的典型平均值。对于不规则格网的数据,可以通过确定点与最近的相邻要素之间的平均距离来确定 Lag 步长大小,这可提供一个非常好的步长大小。因为所有步长都会在其中至少包含数个点对。于是,借助 ArcGIS 下的平均最近邻工具,我们确定了 Lag 步长为 75 264 m。同时,为了满足“步长数乘以 Lag 步长大小的值是所有点之间最大距离的一半左右”这条经验法则,我们得到步长组数应该不大于 14。通过对步长组数取不同值时结果的比较,得到步长组数为 13 时结果最优。于是,最终选取地质统计学插值的 Lag 步长值为 75 264 m,步长组数为 13。

根据所确定的步长值和步长组数,通过对各种理论变异函数的拟合参数的比较来判断空间变量的相关性,以确定对数据进行地质统计学插值时可采用的模型。按照区域化变量空间相关性程度分级标准,当块金系数($C_0/(C_0+C_1)$)分别为[0%, 25%], (25%, 75%), (75%, 100%)时,分别指示变量空间自相关程度为强烈、中等及微弱。当变量空间自相关程度微弱时,反映其变异主要由随机变异组成,不适合进行空间插值(吴学文, 晏路明, 2007)。由表 2 可知,圆形、球形、指数和高斯模型分别模拟的曲线块金系数为: 17.4%,

17.2%, 9.9% 和 24.7%, 表明所研究变量在 4 种模型下都具有强烈的空间自相关, 可以分别采用这 4 种模型进行地质统计学插值。

表 2 4 种变异函数理论模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of 4 different variogram functions

模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金系数($C_0 / (C_0 + C)$)
圆形	0.18389	1.05546	17.4%
球形	0.17797	1.03381	17.2%
指数	0.10193	1.02905	9.9%
高斯	0.26665	1.07969	24.7%

接下来, 我们在 ArcGIS 地质统计学模块下用不同方法对地震灾情短信数据进行插值处理, 各方法在插值时采用的权重或函数都是经比较确定的最优值。其中反距离权插值时采用的权重值为 4, 径向基函数插值时采用的径向基函数是复二次函数, 克里金插值和考虑坡度的协克里金插值的 Lag 步长值为 75 264 m, 步长组数为 13。为保证插值结果与地震灾情短信代码一致, 我们要对插值结果重新分级。在确定每级的临界值时, 我们将同一灾情短信代码中离震中最远的灾情上报点插值后的数据值作为分级界线, 即“灾情最重原则”, 将插值结果重新定为 4 级。反距离权和径向基函数法的插值结果如图 4、图 5 所示;

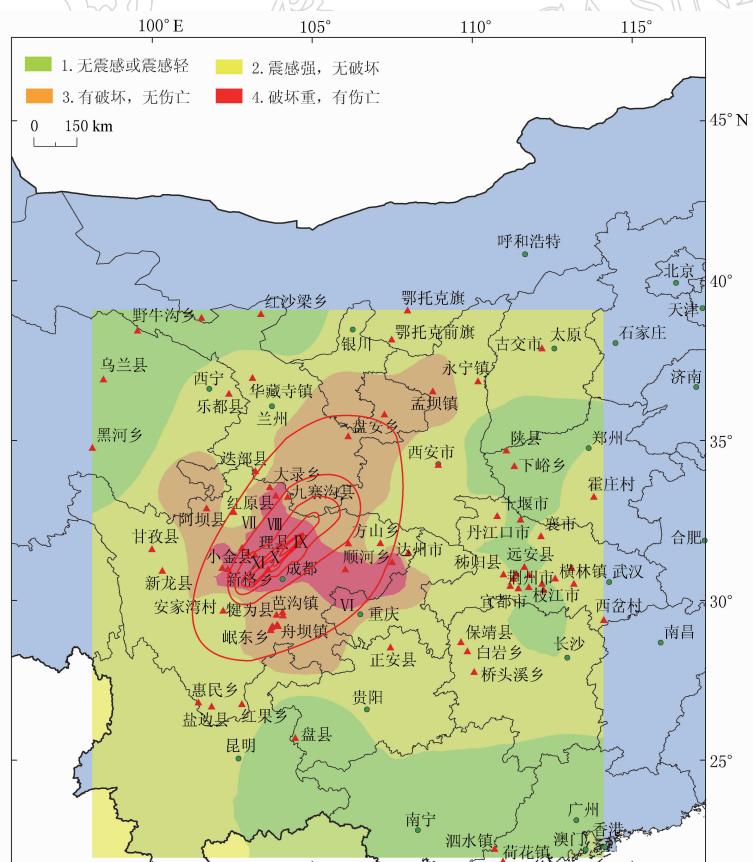


图 4 基于反距离权方法的汶川地震灾情插值结果

Fig. 4 Interpolation result of Wenchuan earthquake disaster based on IDW method

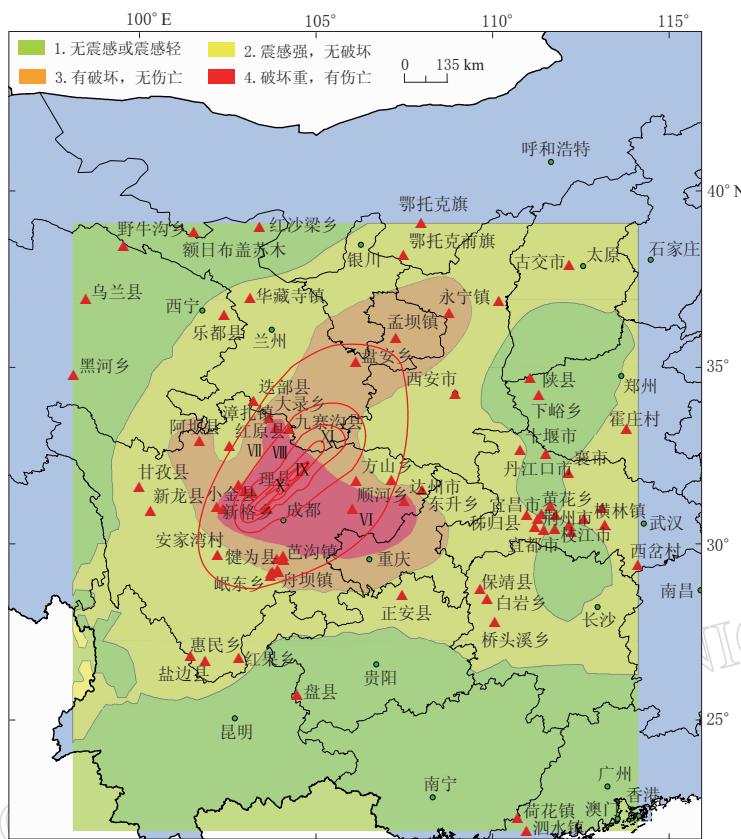


图 5 基于径向基函数方法的汶川地震灾情插值结果

Fig. 5 Interpolation result of Wenchuan earthquake disaster based on RBF method

普通克里金方法和考虑坡度因素的协克里金方法的插值结果如图 6、图 7 所示。从图中我们可以看出，4 种插值方法得到的插值结果存在较大不同，这是由于使用不同的空间插值方法所得到的结果，其品质随内插法等因素的变化而有所不同。确定性插值方法受数据量的影响较大，而地质统计学插值则是利用样本点的统计规律，使样本点之间的空间自相关性定量化，从而在待预测点周围构建样本点的空间结构模型。由此可见，在地震发生初期不能获取大量有效数据点的情况下，确定性插值可能不会取得较好的结果。下面我们就对确定性插值和地质统计学插值的结果进行对比分析。

2.3 空间插值结果分析

对于用不同方法得到的插值结果，我们将从插值结果与实际灾情的吻合程度及插值结果的数学精度两个指标去评价其结果的好坏。

首先，从最终生成的表面我们可以看到确定性插值(反距离权法和径向基函数法)的结果与部分区域的实际灾情有很大差距，尤其是对重灾区的插值结果(图中的红色区域)。例如甘南、陕南等地区属于汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震的重灾区，出现人员死亡的情况，但确定性插值结果显示这些地区为有破坏，无伤亡，这与实际情况出入较大。相比之下，地质统计学插值(普通克里金插值和考虑坡度因素的协克里金插值)的结果则相对较好，尤其是考虑坡度因素的协克里金插值对实际灾害分布情况模拟最好。同时，在实际灾情中，汶川地震 VI 度

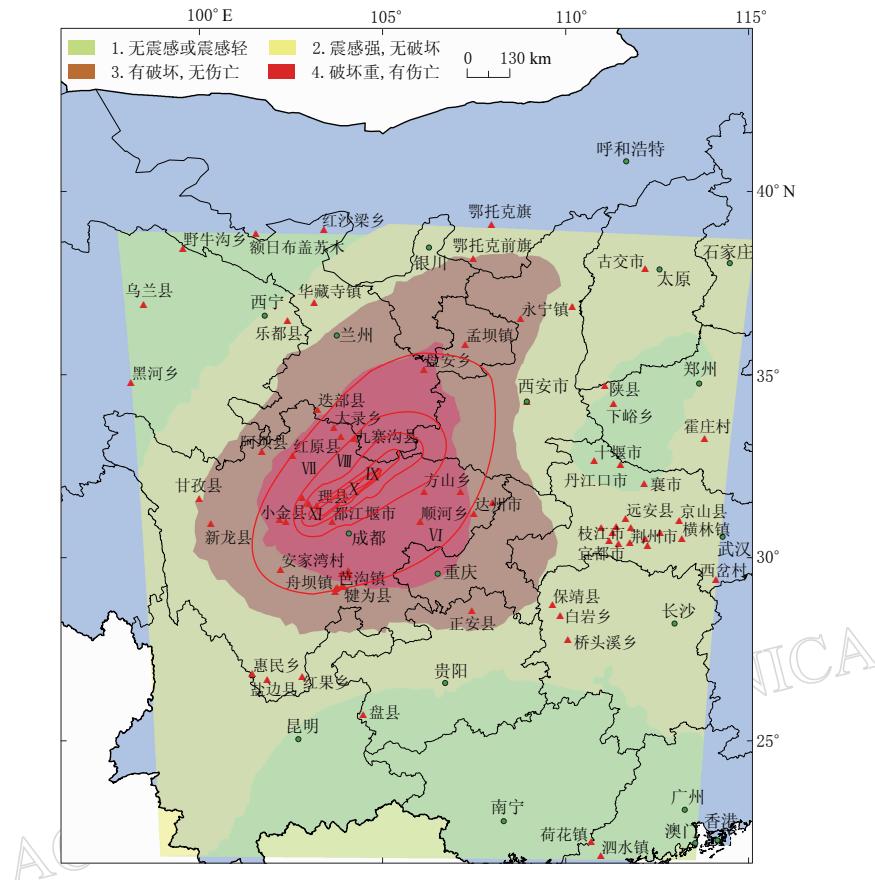


图 6 基于普通克里金方法的汶川地震灾情插值结果

Fig. 6 Interpolation result of Wenchuan earthquake disaster based on ordinary Kriging

区内均出现了人员伤亡情况,因此,本文将各插值结果与汶川地震烈度分布进行了对比。从对比效果来看,地质统计学方法结果中的4级,即破坏重,有伤亡与汶川地震烈度分布更为吻合。

除此之外,本文还用量化指标了解了各方法对未知位置进行插值的准确程度。交叉验证使用所有数据对趋势和自相关模型进行估计,它每次移除一个数据位置,然后预测关联的数据值,以此类推(ESRI中国信息技术有限公司,2010)。交叉验证时,最优模型的标准是:标准平均值最接近于0,均方根预测误差最小,平均标准误差最接近于均方根预测误差,标准均方根预测误差最接近于1(汤国安,杨昕,2006)。

从地质统计学插值和确定性插值方法的交叉检验结果来看(表3),地质统计学插值方

表 3 汶川地震 73 个灾情短信点的不同插值方法交叉检验对比

Table 3 Cross-validation results of different interpolation methods for earthquake precipitation

空间插值方法	插值方法	权重模型	标准平均值	均方根预测误差
确定性插值	反距离权值	权重为4	0.09331	0.6758
	径向基函数插值	径向基函数为 Multiquadric	0.02967	0.5992
地质统计学插值	克里金插值	球形模型	0.02069	0.5484
	协克里金插值	球形模型	0.02062	0.5499

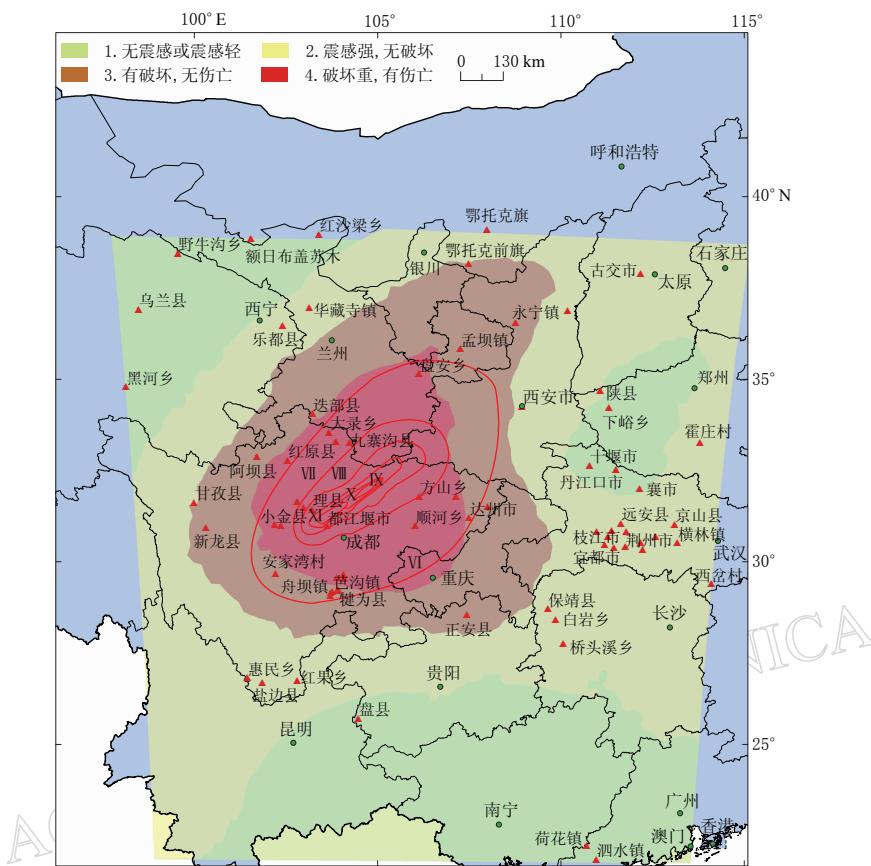


图 7 根据考虑坡度的协克里金方法得到的汶川地震灾情插值结果

Fig. 7 Co-Kriging interpolation of Wenchuan earthquake disaster with topographic slope considered

法的精度要优于确定性插值。随后又对普通克里金方法和考虑坡度因素的协克里金方法在不同半变异函数模型下的插值结果进行了交叉检验。结果表明,两种方法在相同的半变异函数模型下,考虑坡度因素的协克里金方法的插值效果更好。通过进一步抽样检验,尤以高斯模型下考虑坡度影响的协克里金插值结果最好(表 4)。

表 4 汶川地震 73 个灾情短点的不同克里金插值方法交叉检验对比

Table 4 Cross-validation of different Kriging interpolation methods for earthquake precipitation

插值方法	半变异函数	标准平均值	均方根预测误差	平均标准误差	标准均方根预测误差差
普通克里金	圆形模型	0.01667	0.5480	0.6083	0.9513
	球形模型	0.02059	0.5484	0.6106	0.9523
	指数模型	0.02826	0.5592	0.6226	1.0060
	高斯模型	0.01337	0.5455	0.6085	0.9291
考虑坡度的 协克里金	圆形模型	0.01468	0.5479	0.5999	0.9580
	球形模型	0.01819	0.5499	0.6015	0.9614
	指数模型	0.02604	0.5684	0.6063	1.0300
	高斯模型	0.01091	0.5404	0.6000	0.9351

通过对不同插值方法的结果与实际灾情的对比,以及交叉验证的量化比较,本文得到

了在步长值取 75 264 m, 步长组数为 13 的参数值时, 考虑坡度因素影响的协克里金插值方法对汶川地震的灾情具有最优的空间插值效果。最终插值结果(图 7)与实际灾情基本吻合。但有一处结果与实际灾情有所出入, 即河南省等部分区域出现绿色部分被黄色部分包裹。其主要原因是由于地震灾情速报员为个体点, 在灾情上报时看到或得到的信息有限, 或是其所处的地理位置影响了其感觉。考虑到上述实际存在的情况, 地震发生后可以采用动态分析方法, 即随着信息的逐渐增加动态计算插值结果, 动态地反映灾情变化, 从而使结果更为接近实际灾情(帅向华等, 2009)。

3 讨论与结论

围绕汶川 M_s 8.0 地震并综合上述研究和分析得到如下几点认识:

1) 根据 73 个灾情信息点经插值得到的结果与汶川地震实际调查烈度在空间分布上基本吻合, 与实际灾情分布大致相符, 尤其对重灾区的拟合。这表明了利用震后短时间得到的灾情信息点选择适当的插值方法对地震灾情进行插值分析, 快速了解灾情分布是可行的。

2) 通过比较确定性插值与地质统计学插值发现, 后者的插值误差较小; 而考虑坡度因素的协克里金方法比普通克里金方法则更加有效和准确, 这也验证了地形地貌对地震震害是有显著影响的。

3) 虽然考虑坡度因素的协克里金方法在高斯模型下总体上能更好地反映灾情的空间分布格局, 但在地震发生后, 我们还可以随着地震灾情采样点数据的变化不断地进行分析, 以便能够动态地、更加准确地反映地震灾情分布信息。

4) 空间插值方法多种多样, 没有适合于任何区域的插值参数模型和方法。插值过程中要重点考虑区域的地理特点, 如何对特定区域选择合适的并且能得到最佳应用的空间插值方法依旧是一个值得探讨的问题。

参 考 文 献

- 薄景山, 李秀领, 李山有. 2003. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 19(2): 11-15.
- 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 2009. 黄土高原年均温的空间插值方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 23(3): 83-87.
- 帅向华, 侯建盛, 刘钦. 2009. 基于地震现场离散点灾情报告的灾害空间分析模拟研究[J]. 地震地质, 31(2): 321-333.
- 汤国安, 杨昕. 2006. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社: 288-348.
- 吴学文, 晏路明. 2007. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法: 以福建省一月均温空间内插为例[J]. 地球信息科学, 9(3): 104-108.
- ESRI 中国信息技术有限公司. 2010. ArcGIS desktop help[R/OL]. 北京: ESRI. [2011-09-06]. <http://help.arcgis.com/zh-cn/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/00310000059000000/>.