基于反距离加权和克里格插值的 S-A 多重分形滤波对比研究

李晓晖，袁　峰，贾　蔡，张明明，周涛发
（合肥工业大学资源与环境工程学院，合肥　230009）

【摘　要】本文以铜陵矿集区土壤 Cu 元素含量数据为例，对比研究反距离加权插值法和克里格插值法对 S-A 多重分形滤波的影响。与单纯的反距离加权插值和克里格插值结果相比，无论是基于反距离加权插值还是克里格插值，多重分形滤波（S-A）方法分解得到的铜陵矿集区 Cu 元素异常场对已知 Cu 矿田的指示均更加准确。基于克里格插值结果的异常场相比于基于反距离加权插值结果的异常场，具有更好的异常识别效果，与铜陵矿集区已知 Cu 矿床分布的空间相关性更加显著，具有矿田尺度的成矿预测价值。

【关键词】多重分形滤波；克里格；反距离加权；铜陵
【中图分类号】P632　　【文献标识码】A　　【文章编号】1009-2307（2012）03-87-04

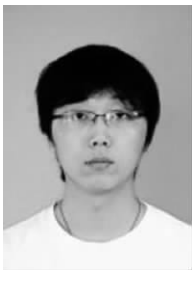
1　引言

在复杂的地质过程尤其是成矿作用过程中，地球化学场往往受到多期次地质过程的影响，造成异常场同多种不同的背景场相互叠加，弱异常常被掩盖在强变异性的背景中，如何有效的从复杂的地球化学场中分离出异常，对于成矿信息提取和成矿预测至关重要，因此一直是众多学者研究的热点问题[1]。

分形理论的提出为地球化学场复杂空间模式的表达提供了新的有力工具[2]。已有研究认为，成矿过程等一系列非线性奇异性地球系统过程具有自组织、临界性、自相似性和各向异性等非线性特征，产生的结果往往服从多重分形分布[3]。通过对成矿复杂系统的临界性、不均匀性和局部奇异性及其在矿产预测中的应用研究，成秋明提出了广义自相似性理论，认为广义自相似性不仅仅表现在空间域中，在其他“域”中也可具有自相似性，分形理论同样适用[4]。

S-A 多重分形滤波方法基于广义自相似和多重分形理论[5]，在傅里叶空间中根据不同的广义自相似性和分形特性构建不同的滤波器，进而利用逆傅立叶变换将地球化学场分解为背景与异常场[4]。S-A 多重分形滤波方法能够有效解决复杂地质环境下的背景与异常的分解问题，对于弱异常的识别也具有良好的效果，已被用于国内外多项地球化学异常识别的研究中[6,7]。

在运用 S-A 多重分形滤波方法进行背景和异常分解前，通常需采用插值方法将不规则分布的地球化学数据转换为网格数据。采用何种插值方法对于 S-A 多重分形滤波方法的有效运用具有重要的制约作用，但是这一研究目前十分有限。铜陵地区是我国东部重要的铜、金矿集区，区内矿床成因复杂，受到多期次热液活动影响，同时矿业开发、利用程度较高，其地球化学场受到多种来源的共同叠加。本文以铜陵矿集区土壤中 Cu 元素含量数据为例，对比研究目前应用广泛的反距离加权插值法和克里格插值法插值法对 S-A 多重分形滤波的影响，以期为更好的利用 S-A 方法进行复杂地球化学场分解提供依据。



作者简介：李晓晖（1986-），男，博士研究生，主要从事多维分形及地质体三维建模预测研究。
E-mail：lxhlixiaohui@163.com

收稿日期：2010-12-31
基金项目：新世纪优秀人才支持计划项目（NCET-10-0324）；安徽省科技攻关计划项目（08010302200）；安徽省公益性地质（科技）工作项目（2009-13）；安徽省优秀青年科技基金项目（08040106907，04045063）
通讯作者：袁峰 教授 E-mail：yf_hfut@163.com

2　实验数据

2.1　采样点分布

本文的土壤 Cu 元素含量数据来源于安徽省地质调查院“安徽省江淮流域多目标区域地球化学调查”资料，土壤样品为较稳定地块的表层土壤，设计基本采样间距为 1km，覆盖了铜陵矿集区的主要矿田（图 1），样本数共计 585 件。

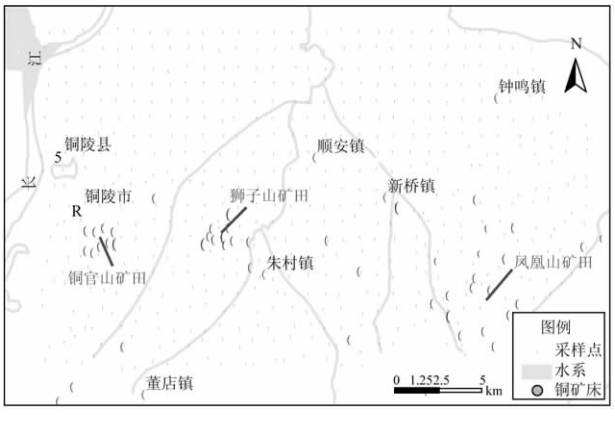


图 1　采样点及主要铜矿床分布图

2.2　数据统计特征及预处理

土壤样品 Cu 元素含量数据的基本统计分析结果见表 1。可见，Cu 元素含量数据的最大值是最小值的 269.82 倍，变异系数高达 244.47%，表明研究区内土壤 Cu 元素变异性非常强烈，数据中存在异常的样本值。

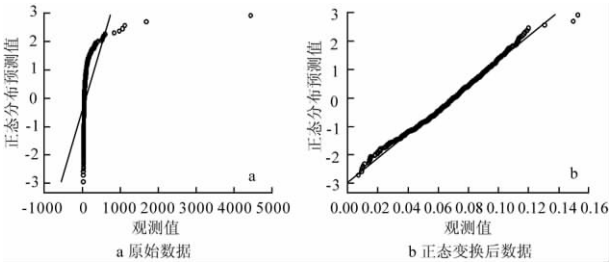
为了检验元素的统计频率分布特征，正态分布 Q-Q 图是最常用的方法之一，采取这种方法可以检验元素是否服从正态分布。研究区土壤 Cu 元素含量原始数据的 Q-Q 图（图 2a）可见，数据明显偏离正态分布参考线；同时，对原始数据进行的 K-S 正态检验结果显示（表 2），正态分布显著性指标（Sig）小于 0.01；均显示原始数据极不符合正态分布。

由于普通克里格法是一种线性地统计方法，建立在数据集呈正态分布且符合二阶平稳假设或准二阶平稳假设之上[8]，数据的非正态分布将会影响到数据的平稳性，同时也会使实验变异函数产生比例效应，即抬高基台和块金值，增大估计误差，使变差值点的波动变大，甚至会掩盖其固有的结构特征[9]。因此，本文采用 Box-Cox 正态变换方法

对原始数据进行正态变换，变换后数据的 Q-Q 图(图 2b)可见，变换后的数据除较高的异常值之外基本服从正态分布(事实上这些异常值服从分形分布)[10]。采用 K-S 正态检验方法对变换后数据的验证结果(表 2)可见，变换后的数据正态分布显著性指标(Sig)已大于 0.05，其偏度和峰度都有了很大的改善，数据已满足正态分布要求，已可以进行克里格插值处理。

表 1 土壤中 Cu 元素含量基本统计

土壤元素	平均值	中位数	最小值	最大值	标准方差	变异系数(%)
Cu(mg/kg)	89.24	106	16.40	4425.00	218.17	244.47



a 原始数据 b 正态变换后数据

图 2 正态检验 Q-Q 图

表 2 原始数据与 Box-Cox 变换后数据正态分布检验结果

土壤元素	原始数据			Box-Cox 变换后数据		
	偏度	峰度	Sig	偏度	峰度	Sig
Cu(mg/kg)	14.78	274.18	<0.01	−0.16	0.18	0.066

3 插值处理

3.1 反距离加权插值

反距离加权插值法是一种以距离作为权重的滑动平均加权插值法，它是根据离散点生成规则网格数据最常见的插值方法。计算过程较为简便，其公式如下:

$$Z^*(x_0)=\sum_{i=0}^{n}Z(x_i)\times\lambda_i \tag{1}$$

(1)式中: $Z^*(x_0)$ 为待估点，$Z^*(x_i)$ 为待估点周围已知点的数值。λ_i 为各已知点的权重，权重可通过公式(2)求得:

$$\lambda_i=\frac{1/d_i^k}{\sum_{i=0}^{n}1/d_i^k} \tag{2}$$

式中: d_i 为待估点与已知点之间的距离，k 为幂指数。

3.2 克里格插值

克里格插值法是一种建立在变异函数模型上的最佳线性无偏估计(BLUE)方法，它能够在插值的过程中充分考虑数据的空间相关性和采样的空间分布结构等性质[11]。

在对数据进行克里格插值前，需对数据进行变异函数分析，离散化的变异函数可以由(3)式定义:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{3}$$

式中，h 为滞后距离，$N(h)$ 为距离为 h 的点对数。

本文分别采用球状、指数、线性、高斯等四种常用且重要的试验变异函数模型进行拟合和对比，研究区土壤 Cu 元素含量数据的拟合结果参数见表 3。其中，决定系数($r2$)及剩余平方和(RSS)两参数可用于评价模型拟合的优劣，剩余平方和越小、决定系数越大，则拟合精度越高[12]。经过对比，本文选用决定系数最大且剩余平方和最小的指数模型作为克里格插值的理论变异函数模型，其拟合得到的变异函数见图 3。可见，基于指数模型的理论变异函数非常符合实验变异函数的变化趋势，因而能够很好的用于表征铜陵矿集区土壤 Cu 元素数据的空间变异性质。

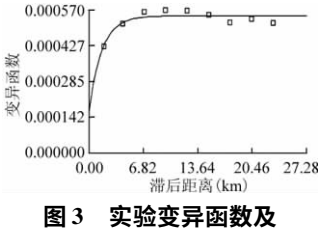


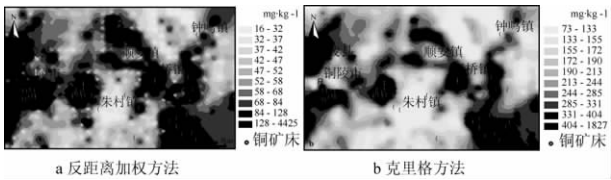
图 3 实验变异函数及拟合模型图

表 3 变异函数参数

金属元素	模型	块金值(Nugget)	基台值(Sill)	变程(Range)	块金值/基台值	决定系数 $r2$	剩余平方和 RSS
Cu	球状	0.000131	0.000543	3.50	0.759	0.769	3.754E-09
	指数	0.000169	0.000547	4.80	0.691	0.807	3.142E-09
	线性	0.000441	0.000608	23.09	0.275	0.107	2.630E-08
	高斯	0.000147	0.000543	8.67	0.729	0.772	3.707E-09

3.3 插值结果

本文的反距离加权插值和克里格插值方法统一设定最大搜索点数为 15，插值网格间距为 0.2m; 插值结果采用 ArcGIS 软件中的分位点(Quantile)方法进行分级，该方法可以保证各级别中包含有相同数量的网格单元，插值结果见图 4。可见，反距离加权插值法由于其值易受数据点集群的影响，出现了很多“牛眼”状的分布模式(图 4a)，而克里格插值法则由于考虑了数据的空间变异性质，在表现数据空间分布的连续性和变异性特征方面具有优势(图 4b)。



a 反距离加权方法 b 克里格方法

图 4 插值结果

4 S-A 分形滤波模型与地球化学场分解

S-A 分形滤波模型基于广义自相似性理论，通过将数据从空间域转换到频率域中，进而研究其分形特征。从多重分形理论的角度，对于各向同性的或者各向异性的具有广义尺度独立性的多重分形场来说，能谱密度 S 与能谱密度大于 S 的波数集合的面积 A(波数的平方)之间的关系可以用下式来描述[1,13,14]:

$$A(\geqslant S)\propto S^{-\alpha} \tag{4}$$

由于这种关系并不要求场具有各向同性的条件，面积 A 可以是任意分布和形状，所以(4)式也能够度量数据各向异性的自相似性质[1,4]。根据(4)式，可以将能谱密度与能谱密度大于 S 的累积面积 A，在双对数图上通过分段线性拟合来进行分析，拟合得到的各条线段分别对应于不同能谱密度范围的幂指数 α，且代表不同含义的无标度空间。

在不同的能谱范围内，应具有完全不同的自相似性，根据这种差异可以构造两个滤波器: 异常滤波器和背景滤波器。由于这两个滤波器的形状是不规则的，所以它们保持了所对应地球化学场的各向异性和在二维能谱空间中的内部结构[4]。利用这两个滤波器对原始地球化学场分别进行滤波处理，再通过逆傅里叶变换即可得到分解后的背景和异常场数据。

本文分别对反距离加权插值和克里格插值得到的研究区土壤 Cu 元素网格数据进行傅里叶变换，建立能谱密度(S)与累计面积($A(\geqslant S)$)的双对数图像(图 5)。可见，无论是采用反距离加权方法方法还是克里格方法的插值结果，计算得到的能谱密度与累计面积的关系都可以采用最

小二乘法进行分段线性拟合。图 5 中竖线位于拟合线段的分界处，对具有不同自相似特征的无标度区间予以划分；竖线左侧部分反映的是低能谱分布范围，并可以据此构建异常滤波器，而竖线右侧则反映高能谱分布范围，可以构建背景滤波器[10]。

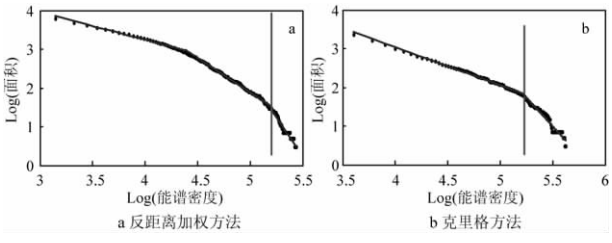


图 5　插值结果 S-A 曲线图

通过上述建立的滤波器对转换成频率域的数据进行滤波后，再经过傅里叶逆变换，得到分解后的土壤 Cu 元素背景图(图 6)和异常场(图 7)，插值结果仍采用 ArcGIS 软件中的分位点(Quantile)方法进行分级。

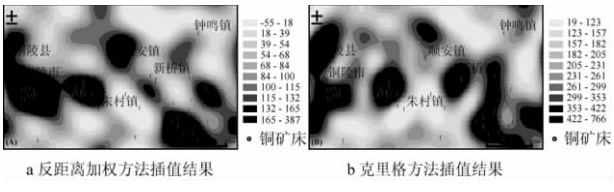


图 6　多重分形滤波分解背景场

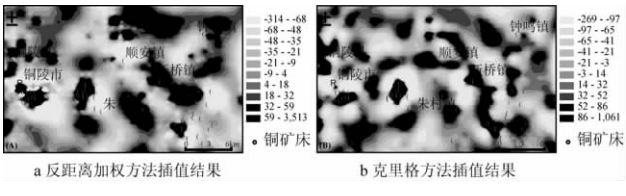


图 7　多重分形滤波分解异常场

5　结果分析

经多重分形滤波分解的背景场可见(图 6)，无论是基于反距离加权插值还是克里格插值，获得的背景场均能够较为准确的识别出铜陵矿集区铜官山、狮子山和凤凰山 Cu 矿田所处区域的地球化学高背景场特征，这符合铜陵矿集区的实际地质情况。同时对比可见，基于克里格插值结果经多重分形滤波(S-A)分解得到的背景场(图 6b)较之基于反距离加权插值结果分解得到的背景场(图 6a)更符合已知矿床的分布趋势，特别是对于凤凰山矿田，图 6b 中展示的高值区域延展情况与已知矿床的空间分布极为相似。因此，通过多重分形滤波分解得到的土壤元素背景场可以有效的反映研究区的元素背景分布特征，因而也具有初步识别成矿异常的意义，特别是对于地质条件没有显著差异的区域，更具有指示作用。

与单纯的土壤 Cu 元素反距离加权插值和克里格插值结果(图 4)相比，由于多重分形滤波(S-A)方法能够度量地球化学场的各向异性和广义自相似性[4,15]，所以，分解得到的异常场(图 7)具有强化局部变异信息的特点。可见，无论是基于反距离加权插值还是克里格插值，多重分形滤波(S-A)方法分解得到的异常场(图 7)对已知矿田的指示均更加准确。这充分说明了多重分形滤波(S-A)方法具有压制背景影响、突出弱异常的作用，因而比单纯的插值方法具有更好的结果，而这对于成矿异常识别至关重要。

对比多重分形滤波(S-A)方法分解得到的异常场可见，基于克里格插值结果的异常场(图 7b)相比于基于反距离加权插值结果的异常场，具有更好的异常识别效果，能够更加精确的指示已知矿床的位置，且与已知矿床分布的空间相关性更加显著；特别是对于凤凰山矿田东南部的若干矿床，在基于反距离加权分解得到的异常场中没有体现，而基于克里格插值结果的异常场却能够很好的对其识别，这充分体现了克里格插值方法在插值过程中对数据的空间相关性和变异性质进行分析考虑的重要性。

6　结束语

1) 无论是基于反距离加权插值还是克里格插值，通过多重分形滤波分解得到的土壤 Cu 元素背景场均可以有效的反映铜陵矿集区土壤 Cu 元素的背景分布特征，具有初步识别成矿异常的意义。

2) 与单纯的反距离加权插值和克里格插值结果相比，采用多重分形滤波(S-A)方法分解得到的 Cu 元素异常场对已知 Cu 矿田的指示均更加准确，其具有的压制背景影响、突出弱异常的作用，能够很好的应用于成矿异常识别。

3) 较之基于反距离加权插值结果分解得到的异常场，基于克里格插值结果分解得到的异常场具有更好的异常识别效果，已具有矿田尺度的成矿预测价值。

参考文献

[1] 成秋明. 空间自相似性与地球物理和地球化学场的分解方法[J]. 地球物理学进展,2001,16(2).

[2] Schertzer,D,S Lovejoy. Nonlinear variability in geophysics: scaling and fractals[M]. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers,1991.

[3] 成秋明. 成矿过程奇异性与矿床多重分形分布[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(3): 298-305.

[4] 成秋明,张生元,左仁广,等. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术研究与进展[J]. 地学前缘,2009,16(2): 185-198.

[5] Cheng,Q,Y Xu,E Grunsky. Multifractal power spectrum-area method for geochemical anomaly separation[J]. Natural Resources Research,2000,9(1).

[6] Lima,A,B De Vivo,D Cicchella,et al. Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy),Campania region[J]. Applied Geochemistry,2003,18(12): 1853-1865.

[7] 成秋明,赵鹏大,陈建国,等. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解[J]. 地球科学: 中国地质大学学报,2009,34(2): 232-242.

[8] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社,2005.

[9] 王仁铎,胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社,1988.

[10] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2000,25(3).

[11] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic geology,1963,58(8): 1246.

[12] Robertson,G. GS+: Geostatistics for the environmental sciences-GS+ User's Guide[M]. Plainwell: Gamma Design Software,1995.

[13] Cheng Q M. Multifractal modelling and spectrum analysis: Methods and applications to gamma ray spectrometer data from southwestern Nova Scotia,Canada[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2006,49(3).

[14] 文战久,刘洪臣,高星. 地球物理和地球化学异常的多重分形分析与分解[J]. 地球物理学进展,2007,22(3): 972-978.

[15] Carranza,E. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS[M]. Oxford: Elsevier Science Ltd,2009.

(下转第 46 页)

2) 进行基准更新后，新基准下的水深成果与原成果走势基本一致，仅在局部区域略呈现差异，如图 6 所示。两者 9331 个水深注记的均方差为 0.168m。结果显示，水深的等差值线(带) 呈现南北走向，与原始测线方向一致，这是由于相同测线上的新、旧(原) 基准的差异主要在于两者基准的系统差，因基准面的空间形态差异所造成水深差值量相对较小，由此表明: 该海域现行海图深度基准的推算结果(即 A 站和 B 站注记值) 的时效性可能出现较大的下降，需重新核对计算。

4 结束语

海图水深注记的变更是通常意义下海图深度基准面更新的主要工作，也是深度基准更新任务的主要工作所在。本文采用基于长期平均海面的深度基准转换体系，首先将海图水深注记转换至(近似) 长期平均海面，而后通过基于长期平均海面的新一代深度基准模型实现了海图水深注记的变更。以长期平均海面为中介的变更方法充分利用了长期平均海面时空变化上的稳定性，并且使现行海图的水深基准转换误差得到分步控制。本文的研究成果将促进我国海洋测绘基准系统化和正规化的建设、确保海洋测绘产品的一致性和可拼接性，使海洋测绘产品符合国际公认的标准。然而，由于现行海图深度基准来源的复杂性以及历史测量资料的可能较低精度，使得局部区域的水深注记转换精度可能无法得以有效控制，仍需通过基于新一代基准的海道测量模式对该区域水深进行重测、制图。

参考文献

[1] 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理: 博士学位论文[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学,1998.

[2] 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[M]. 北京: 测绘出版社,2003.

[3] 翟国君,黄谟涛,暴景阳. 海洋测绘基准的需求及现状[J]. 海洋测绘,2003,23(4):54-58.

[4] 中国人民解放军海军司令部海道测量部. 实用潮汐学[M]. 中国人民解放军海军司令部海道测量部: 天津,1959.

[5] 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 海道测量规范-水深测量[S]. 天津: 中国人民解放军海军司令部航海保证部,1975.

[6] 国家技术监督局. GB 12327—90 海道测量规范[S],北京: 中国标准出版社,1990.

[7] 国家质量技术监督局. GB 12327—1998,海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社,1999.

[8] 汪家君. 近代历史海图及应用文集[M]. 北京: 测绘出版社,1989:41-51.

[9] 韩范畴,吴俊彦. 海图深度基准面不统一所带来的问题与对策[C]//第十九届海洋测绘综合性学术研讨会论文集. 2009:263-265.

[10] 段福楼,杜强,王春瑞. 对沿岸新旧水深图深度变化原因的分析[J]. 海洋测绘,2006,26(3):59-61.

[11] 叶葭. 采用新旧深度基准面应注意的问题[J]. 水运工程,2007(11):25-27.

[12] 肖斌. 我国测绘基准的历史与现状[J]. 露天采矿技术,2007(1):29-31.

[13] 孙翠羽. 海洋无缝垂直基准面的建立方法研究[D],山东科技大学: 2011:7.

[14] 王艳玲. 用回归分析法建立近代历史海图上各种深度基准面的改正数方程[J]. 厦门科技,2000,(S1):85-87.

[15] 李秀亭. 岙山头平均海面和深度基准面的确定[J]. 海岸工程,1990,9(4):47-53.

[16] 罗宗业. 华南沿海的深度基准面[J]. 港湾建设,1991(3):33-37.

[17] 劳顺根,胡连法. 长江口深度基准面查考[J]. 海洋测绘,2003,23(2):40-43.

[18] 吴华林,沈焕庭,吴加学. 长江口海图深度基准面换算关系研究[J],海洋工程,2002,20(1):69-74.

[19] 许军. 水下地形测量的水位改正效应研究: 博士学位论文[D]. 海军大连舰艇学院,2009.

[20] 李改肖,孙新轩,刘雁春,等. 中国海区连续化基准面模型的构建[J]. 海军大连舰艇学院学报,2010,33(2):65-68.

Datum updating method of chart soundings annotation

Abstract: Building the united and normative sounding datum is the basic guarantee of hydrographic surveying and mapping. In order to remove the conflicting chart datum of chart soundings, a transforming scheme based on the mean sea level datum was put forward about converting the old chart datum into new system in the paper. A chart depth data updating method was established based on the newly introduced chart datum with the experimental sounding data. The result was proved perfect.

Key words: chart datum; mean sea level; datum transformation; chart soundings; updating method

LI Gai-xiao(Dept. of Hydrography and Cartography Engineering, Dalian Naval Academy, Liaoning Dalian 116018, China)

(上接第 89 页)

Contrastive study of S-A multifractal filtering method based on inverse distance weighted and Kriging interpolation

Abstract: This paper took Cu element of Tongling Ore Cluster area as an example, studied on the effect of inverse distance weighted interpolation method and Kriging interpolation method on the multifractal filtering method. The research showed that, compared with raw inverse distance weighted interpolation method and Kriging interpolation method, whether based on inverse distance weighted interpolation method and Kriging interpolation method, the Cu element anomaly field which is decomposed by multifractal filtering (S-A) method could indicate the Cu ore field more accurately. The anomaly field based on the Kriging interpolation result achieved better results than that base on the inverse distance weighted interpolation result, the former was more significantly correlated with the distribution of Cu deposits, which is decomposed by multifractal filtering (S-A) method would have the application value for metallogenic prediction at deposit scale.

Key words: multifractal filtering method; Kriging; inverse distance weighted; Tongling

LI Xiao-hui, YUAN Feng, JIA Cai, ZHANG Ming-ming, ZHOU Tao-fa(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)