勘查地球化学异常多尺度分析方法
——以赣东北德兴矿集区为例

曹殿华，王安建，王高尚，李瑞萍，李以科
(中国地质科学院 矿产资源研究所，北京 100037)

摘要：以赣东北德兴矿集区铜元素地球化学数据为例，提出了一种勘查地球化学异常多尺度分析的方法，内容包括：(1)采用具有平移不变性的平稳小波变换进行勘查地球化学异常的多尺度分解；(2)随着小波分解阶数的增大，在多尺度逼近累积频率－含量曲线图上，如果数据分布较均匀，没有出现明显的拐点，则该尺度逼近可以作为最大尺度的背景，该分解阶数为最大分解阶数；(3)各尺度的逼近不能直接代表该尺度的背景，各尺度的背景都是起伏的带而不是曲面，在多尺度细节累积频率－含量曲线图上，以拐点作为各尺度的异常下限；(4)大尺度的细节主要反映区域性的控岩控矿信息，而异常的形态和规模对研究控矿地质因素很重要，直接将各细节的正值作为异常；(5)小尺度的细节的正值分布过于复杂，分布规律不明显，因此一定要进行异常的提取，异常主要反映由矿和蚀变引起的局部变化，具有重要的找矿价值；(6)在各个尺度均表现为异常的区域具有找矿远景，特别是小尺度的局部异常，其不同尺度重叠区域是重要的找矿远景区。勘查地球化学异常的多尺度分析可获得多尺度的曲面背景和对应的异常，并可得到异常的精细结构，突出异常的局部变化特征，从而更有效地识别与矿有关的异常。

关键词：德兴；铜矿；化探；平稳小波变换；累积频率；异常；背景
中图分类号：P595；P622+.3；P632　　文献标志码：A　　文章编号：1000－8527(2008)06－1028－06

Multiscale Analysis of Exploration Geochemical Anomalies: A Case Study of Dexing Ore Concentration Area, Northeast Jiangxi Province

CAO Dian-hua, WANG An-jian, WANG Gao-shang, LI Rui-ping, LI Yi-ke
(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The paper puts forward a method of multiscale analysis of exploration geochemical anomalies, with a case study of Cu element anomalies of Dexing ore concentration area, northeast Jiangxi Province. Shift-invariant stationary wavelet transform was used to do multiscale decomposition of the anomalies. With the increase of decomposition level, statistical distribution of the approximations changed to uniformity, and the level was maximal. The approximation was not the background at each scale, and the background was a wave belt. The upper inflexions at the accumulative frequency-content graphs of multiscale details anomalies indicated the threshold of the anomalies, and which should be used to the details at lower levels. The threshold of the anomalies of the details at higher level was zero in view of the geological implication. The areas with existence of multiscale Cu anomalies were propitious to prospecting, especially at lower levels. Fine structure and local variation of exploration geochemical anomalies could be acquired with the method of multiscale analysis, which are helpful to identify the anomalies relating to mineralization.

Key words: Dexing; copper ore deposit; geochemical exploration; stationary wavelet transform; accumulative frequency; anomaly; background

收稿日期：2008－10－08；改回日期：2008－11－20；责任编辑：楼亚儿。
基金项目：国家科技支撑计划课题(2006BA01B05，2006BAB01A07)。
作者简介：曹殿华，男，助理研究员，博士，1977年出生，矿床学专业，主要从事成矿规律及勘查评价方面的研究工作。Email：dianhuacad@gmail.com。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引　言

不同空间尺度的区域面积性勘查地球化学数据反映了不同尺度的异常信息, 而同一空间尺度的地球化学数据同样是不同规模地球化学异常的叠加, 采样间距反映了异常所能代表的精细程度。如何发掘隐蔽的矿化指示信息, 对矿产资源预测评价具有非常重要的意义。小波分析是一个时间和频率的局域变换, 能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析 (Multiscale Analysis), 可聚焦到信号的任意细节, 解决了 Fourier变换不能解决的许多困难问题, 被誉为 "数学显微镜"。采用小波分析对勘查地球化学异常进行多尺度分析, 可以得到异常的精细结构, 突出异常的局部变化特征, 从而更有效地识别与矿有关的异常。目前, 很多学者将小波分析应用到勘查地球化学数据的处理[1-4], 但是在进行多尺度分解的小波变换方法、多尺度分解阶数的确定、多尺度异常的提取方法等方面需要深入的研究探讨, 数据处理方法不仅要准确, 还要符合地球化学找矿原理。

赣东北德兴矿集区是我国的主要铜资源生产基地, 围绕后备资源寻找, 目前已经开展了大量的研究工作[5-12]。本文采用平稳小波变换进行德兴矿集区 1∶20万铜异常的多尺度分解, 讨论分解阶数的确定方法和多尺度异常的提取方法, 提出找矿远景区的圈定方法。

1 平稳小波变换

离散小波变换 (DWT) 不具有平移不变性[13-14], 小波系数依赖于它们所位于的抽样网格的位置, 导致输入信号很小的平移会引起小波系数、不同尺度上能量分布和重建的信号发生很大的变化。Nason在离散小波变换基础上提出 ε-采样离散小波变换方法, 从而实现了具有平移不变性的平稳小波变换 (SWT)[15]。

1.1 离散小波变换

离散正交小波变换是建立在低通滤波器 H、高通滤仪器 G 和二进位采样算子 D_0的基础上。二进位采样算子 D_0用来对数据的偶数项进行采样, 如对某一列数据 x_k 其定义为:

$$D_0(x_k) = x_{2k}$$

离散小波变换由多尺度分析实现[16]。定义 c^0 为原始数据, J 为最大分解尺度, 对 $j=0, 1, \cdots, J-1$, 其离散小波分解可由下式实现:

$$c^{j+1} = D_0 H c^j$$

$$d^{j+1} = D_0 G c^j$$

式中: c^j为尺度系数; d^j为小波系数。可见, 由于采样算子 D_0的作用, 每进行一次运算, 数据的长度就会减半。

由于映射 (D_0G, D_0H)为正交变换, 所以从 c^{j+1}和 d^{j+1}很容易经反变换得到 c^j。离散小波变换的反变换为:

$$c^j = R_0(c^{j+1}, d^{j+1})$$

式中 R_0为重构算子。

1.2 ε-采样离散小波变换

对上述小波变换进行修改, 即在小波分解的二位采样时保留系数的奇数项而不是偶数项。定义 D_1为取奇算子, 即

$$D_1(x_k) = x_{2k+1}$$

映射 (D_1H, D_1G)此时仍为正交变换。虽然使用这种方法与经典的离散小波分解的结果不一样, 但整个过程都为正交变换, 所以仍可使用重构算子进行重构, 此重构算子定义为 R_1。

假设 ε_j, ε_{j-1}, …, ε_1是一个 0和 1的序列, 下标 J为分解最大尺度, 这样当使用算子 D_{ε_j}在尺度 j进行采样时, 就可以使用相应的重构算子 R_{ε_j}进行重构。于是使用不同的 ε序列就会对原始数据产生不同的结果, 这样的变换就称为 ε-采样的离散小波变换。

ε-采样的离散小波变换与经典离散小波变换的小波系数可以通过平移算子 S相互转换[15]。

1.3 平稳小波变换

平稳小波变换可以通过对经典小波变换的修改得到, 即对低通和高通滤波器的输出系数不再进行二进位采样 (下采样), 这样小波系数和尺度系数就与原始信号等长。另外, 还要对滤波器进行修改, 即在滤波器的值之间插零 (上采样)。

规定 Z 为插零算子, 并且对所有的整数 k, 都有:

$$Z(x_{2k}) = x_k$$

$$Z(x_{2k+1}) = 0$$

$H^{[r]}$和 $G^{[r]}$表示对低通和高通滤波器进行 r次插零, D_0^r 为进行 r次下采样, 可得:

$$D_0^r H^{[r]} = H D_0^r$$

$$D_0^r G^{[r]} = G D_0^r$$

对于给定的信号 c^0, 用平稳小波进行分解,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其分解公式如下:

尺度系数 $c_{s}^{j+1}=H^{[j]}c^{j}$

小波系数 $d_{s}^{j+1}=G^{[j]}c^{j}$

式中: $j=0,1,2,\cdots,J-1$, 其中 J 为最大分解尺度。

平稳小波分解包含了 ε-采样离散小波分解的所有系数, 并且平稳小波系数经过采样和平移可以实现与经典小波系数以及 ε-采样小波系数的相互转变。对平稳小波系数 d_{s}^{j} 进行 D_{0}^{j} 采样, 即可得到经典小波系数。

平稳小波变换是原始信号的过表达, 其小波系数由许多不同的基生成, 因此其反变换算子将不再是唯一的, 可使用不同的方法来进行重建, 当然不同的反变换结果是一样的。平稳小波变换的逆变换主要有 ε-基重构 (ε-basis inverse) 和基平均重构 (average basis inverse) 两种方法[15]。

二维平稳小波变换的分解 (图 1) 和重构的算法与一维平稳小波变换类似, 二维小波函数和尺度函数是通过一维小波函数和尺度函数做张量积

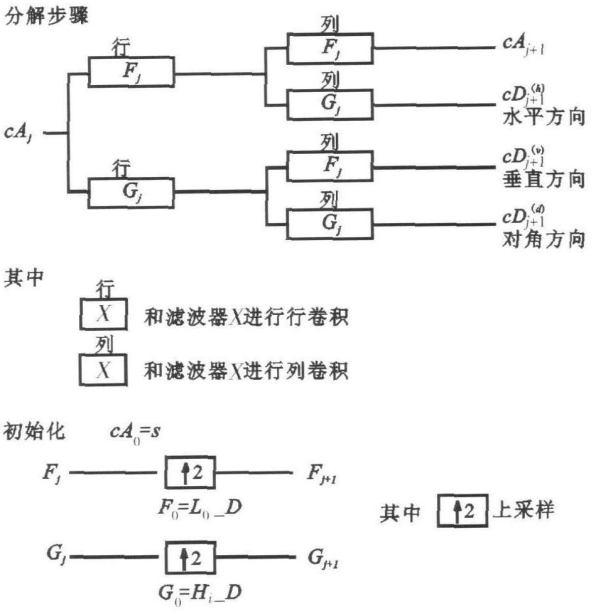


图 1 二维平稳小波分解的基本步骤

Fig. 1 Decomposition step of two-dimensional stationary wavelet transform

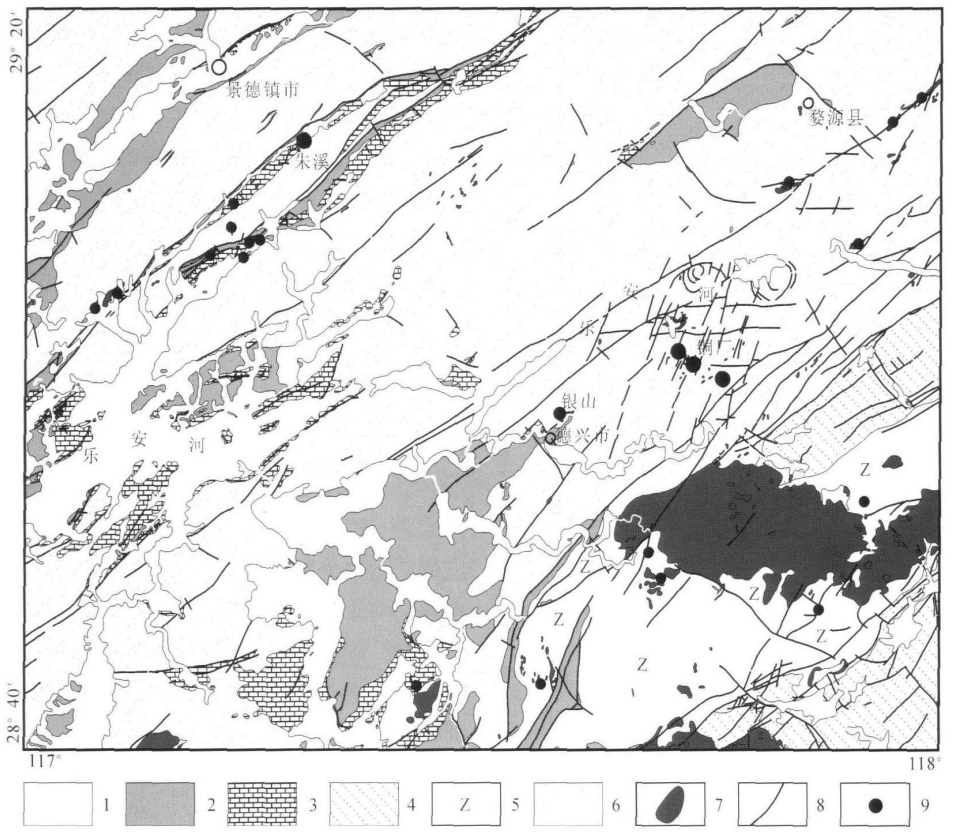


图 2 德兴矿集区地质矿产图 (据 1∶20万乐平幅矿产图修改)

Fig. 2 Geology and mineral resources map of Dexing ore concentration area (after the 1∶200 000 Leping mineral resources map)

1. 第四系; 2. 中生界碎屑岩; 3. 上古生界碳酸盐岩夹碎屑岩、硅质岩、泥质岩、煤系; 4. 下古生界硅质岩、碳酸盐岩、泥质岩、碎屑岩; 5. 震旦系硅质岩、碎屑岩、火山岩; 6. 前震旦系双桥山群火山碎屑岩; 7. 岩体; 8. 断层; 9. 铜 (多金属) 矿床

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得到的。二维平稳小波分解把尺度 j的低频系数分解成 4部分: 尺度 $j+1$的低频系数和 3个方向(水平、垂直、斜线)的高频系数。图 1描述了二维平稳小波分解的基本步骤。

2　德兴矿集区铜地球化学异常多尺度分析

赣东北德兴矿集区分布着德兴斑岩铜矿、银山次火山热液型铜金多金属矿床、金山剪切带型金矿等大型、超大型矿床和一系列的铜、金、多金属中小型矿床。矿床与矿点主要分布在中元古界的双桥山群地层内(图 2), 该地层为一套火山沉积的碎屑岩建造, 主要是浅变质的绢云母千枚岩和变质沉凝灰岩。总体上来看, 该地层在全区广泛分布, 岩性比较简单, 同类岩石的矿物成分、矿物含量、结构构造等相对稳定, 是一种地质学上相对均匀的介质[5]。铜多金属矿床的成矿作用与燕山期浅成中酸性岩浆活动有关。近年来, 较精确的同位素年代学研究表明, 德兴矿集区的岩浆活动和成矿作用主要集中在 170~ 180 Ma左右[17-19]。本文采用双正交 Bior2. 2小波基进行平稳小波变换, 实现德兴矿集区铜地球化学数据多尺度分解与重构。下面讨论小波分解阶数的确定、多尺度异常的提取方法和找矿远景区的圈定方法。

2. 1　小波分解阶数的确定

将地球化学数据进行多阶(通常 3~ 4阶)的平稳小波分解与重构, 得到多尺度的逼近和细节, 对多尺度的逼近和细节分别做累积频率—含量曲线图。随着分解阶数的增大, 如果对应尺度的逼近分布较均匀, 没有出现明显的拐点, 则可以作为最大尺度的背景, 该分解阶数作为最大分解阶数。

德兴 Cu元素地球化学数据 4阶分解的逼近 A_4总体分布比较均匀, 没有 1阶、2阶、3阶分解的逼近 A_1、A_2、A_3所表现出的明显的拐点和变化幅度大的高值区存在, 因此 A_4可以作为德兴矿集区铜地球化学异常的最大尺度背景(图 3)。

2. 2　多尺度异常提取方法

各尺度的逼近不能直接代表该尺度的背景, 即不能直接取各尺度细节的正值作为异常, 代表高频信息的细节是相对于代表低频信息的逼近的变化值。由多尺度细节累积频率—含量曲线图(图 4)可知, 各尺度的细节在 0值附近均有均匀波动

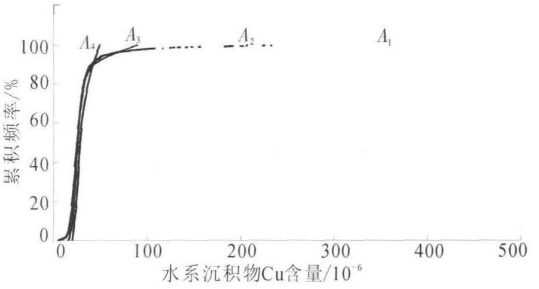


图 3　多尺度逼近累积频率—含量曲线图

Fig. 3　Accumulative frequency-element content graph of multiscale approximations

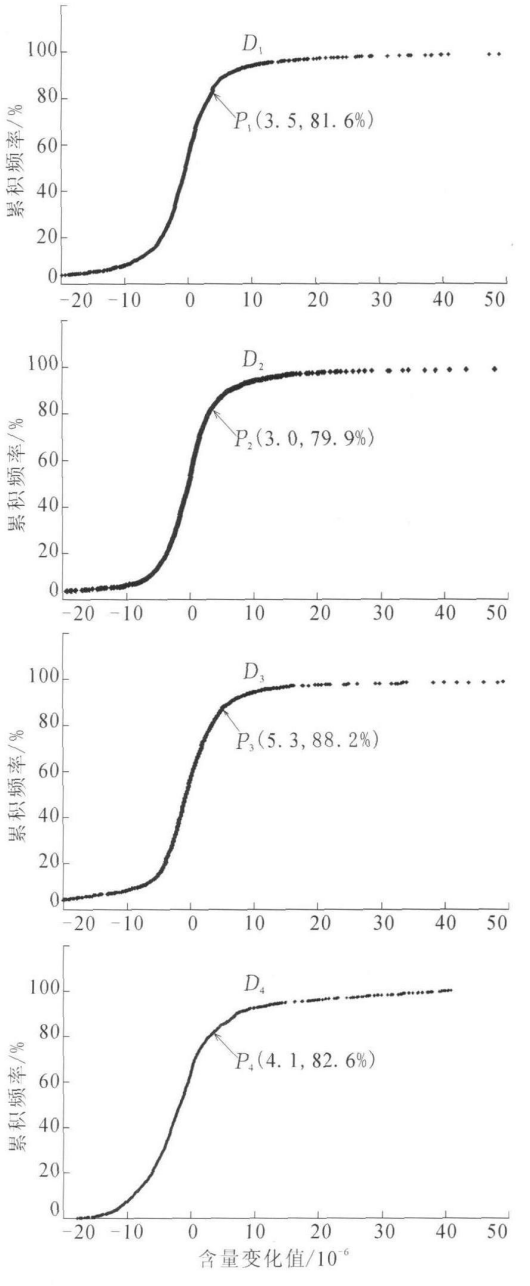


图 4　多尺度细节累积频率—含量曲线图

Fig. 4　Accumulative frequency-element content graph of multiscale details

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区间，该波动范围应作为背景的变化范围，即逼近所代表的曲面上下变化的范围，所以各尺度的背景都是起伏的带而不是曲面。高于背景的正异常对于地球化学找矿有利，因此在多尺度细节累积频率—含量曲线图上，以拐点作为各尺度的异常下限。在累积频率—含量曲线图的作图过程中，要调整横轴坐标的显示范围，从而避免极值的影响。

但是，考虑到大尺度的细节主要反映区域性的控岩控矿信息，不能直接用来圈定找矿远景区，而异常的形态和规模对研究控矿地质因素很重要，因此不进行异常的提取，直接将各细节的正值作为异常。小尺度的细节的正值分布过于复杂，分布规律不明显，因此一定要进行异常的提取，异常分布范围可以作为找矿远景区。

德兴Cu元素地球化学数据的多尺度细节D_1、D_2的拐点分别为P_1、P_2(图4)，其异常下限分别为3.5和3.0。德兴矿集区多尺度(D_1、D_2、D_3、D_4)Cu地球化学异常空间分布图见图5。

2.3 找矿远景区圈定方法

相对于勘查地球化学异常的常规处理方法，多尺度分析方法可以将不同规模的叠加异常分解成不同尺度的异常，各尺度异常具有不同的地质属性。小尺度的局部异常反映主要由矿化和蚀变引起局部变化，具有重要的找矿价值。德兴矿集区主要对应于1阶、2阶异常D_1、D_2(图5)，但对于1阶异常要考虑采样、测试等过程中的异常干扰。较大尺度的区域异常主要由构造、岩浆活动、沉积或变质作用所引起，反应了控矿构造或地质体，德兴矿集区主要对应于3阶、4阶异常D_3、D_4(图5)。

德兴矿集区主要铜矿床(点)在D_1、D_2、D_3、D_4尺度均有Cu地球化学异常显示，如德兴斑岩铜矿、银山多金属矿、朱溪铜矿在不同的尺度上均形成了明显的异常。因此在各个尺度均表现为异常的区域具有找矿远景，特别是D_1、D_2尺度的异常，其重叠区域是重要的找矿远景区。

在找矿远景区圈定时要进行不同尺度异常的综合分析，将反映控矿信息的大尺度异常与反映矿化蚀变信息相结合，同时要进行不同元素异常、不同学科异常之间的关联分析，从而实现更精确的矿床定位预测。

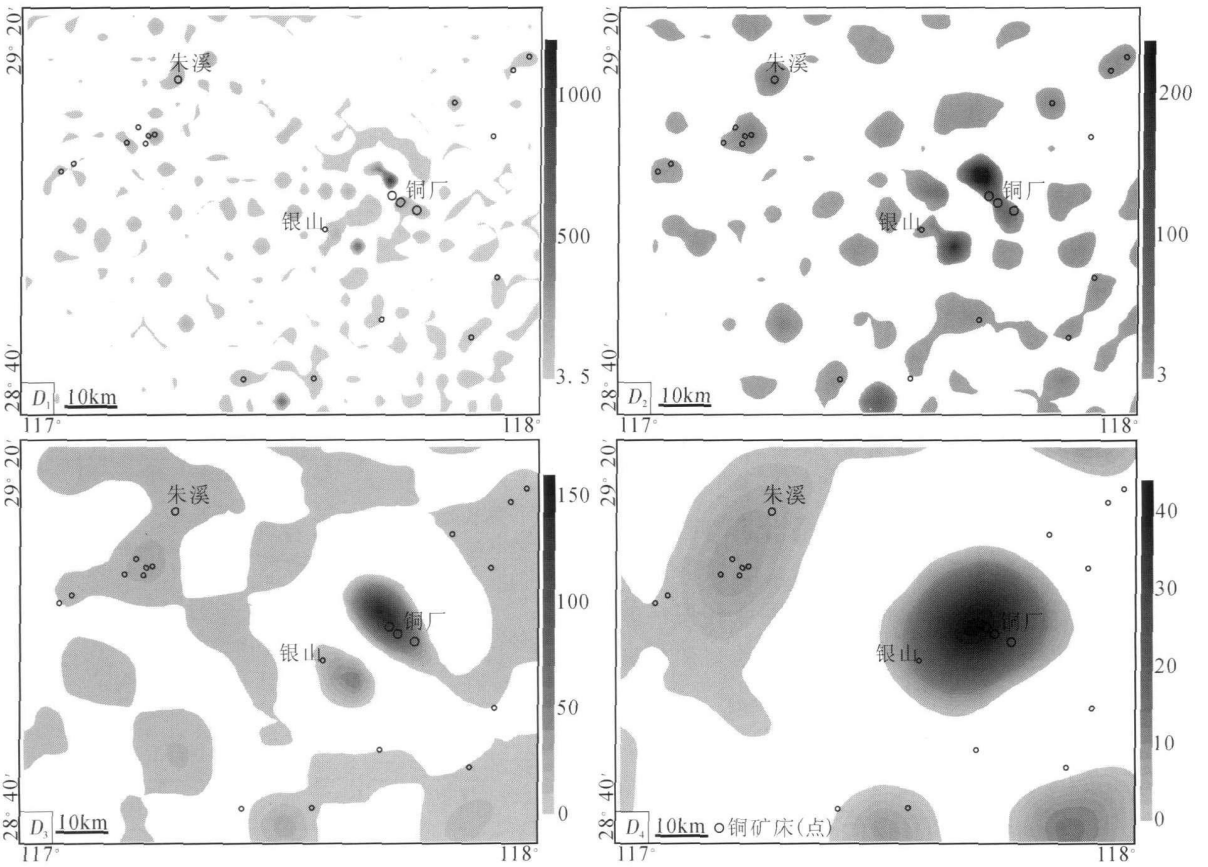


图5 德兴矿集区多尺度(D_1、D_2、D_3、D_4)Cu地球化学异常空间分布图

Fig 5 Spatial distribution map of multiscale Cu element anomalies of Dexing ore concentration area

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 结　论

本文以赣东北德兴矿集区铜元素地球化学数据为例，采用具有平移不变性的平稳小波变换进行异常的多尺度分解，讨论了最大小波分解阶数的确定、多尺度异常的提取方法和找矿远景区的圈定方法。随着小波分解阶数的增大，在累积频率—含量曲线图上，如果对应尺度的逼近的分布较均匀，没有出现明显的拐点，则可以作为最大尺度的背景，该分解阶数为最大分解阶数。各尺度的逼近不能直接代表该尺度的背景，各尺度的背景都是起伏的带而不是曲面，在多尺度细节累积频率—含量曲线图上，以拐点作为各尺度的异常下限。大尺度的细节主要反映区域性的控岩控矿信息，而异常的形态和规模对研究控矿地质因素很重要，直接将各细节的正值作为异常。小尺度的细节的正值分布过于复杂，分布规律不明显，因此一定要进行异常的提取，异常主要反映由矿化和蚀变引起的局部变化，具有重要的找矿价值。在各个尺度均表现为异常的区域具有找矿远景，特别是小尺度的局部异常，其不同尺度重叠区域是重要的找矿远景区。

参考文献:

[1] 陈建国，夏庆霖. 利用小波分析提取深层次物化探异常信息[J]. 地球科学，1999，24(5)：508－512.

[2] Zhang L P，Ruan T J. Application of wavelet analysis to interference elimination for geochemical hydrocarbon exploration [J]. Journal of China University of Geosciences，2000，11(1)：89－91.

[3] 雷丽，王绪本，倪师军，等. 小波分析在化探异常处理中的试验研究——以四川石棉田湾矿区为例[J]. 地质与勘探，2000，36(3)：56－59.

[4] 黄厚辉，郭科，唐菊兴. 基于小波多尺度分析的异常下限确定方法[J]. 地质找矿论丛，2007，22(4)：311－313.

[5] 於崇文. 江西德兴铜厂斑岩铜矿床的成矿成晕机理及其地球化学勘查意义的初步研究[J]. 地球科学，1981，6(2)：111－132.

[6] 叶庆同. 赣东北铅锌矿床成矿系列和成矿机理[M]. 北京：北京科学技术出版社，1987：1－114.

[7] 梅占魁. 德兴斑岩铜矿田原生异常地球化学特征[J]. 物探与化探，1988，12(4)：264－271.

[8] 陈光荣，杜杨松. 论银山铅锌铜矿与德兴铜矿的关系及其找矿方向[J]. 地质与勘探，1988，24(1)：9－13.

[9] 王成发. 乐德矿带成矿系列与成矿规律[J]. 矿产与地质，1992，6(4)：258－274.

[10] 张祖海，吴延之，黄定堂，等. 赣东北隐伏矿床大比例尺成矿预测[M]. 北京：地质出版社，1996.

[11] 吴学益，张开平，黄彩芳，等. 德兴地区超大型铜、金矿床成矿控制因素及其模拟实验[J]. 地质地球化学，2001，29(3)：206－213.

[12] 邓国萍. 赣东北乐华－德兴铜金多金属成矿带成矿特征及找矿预测[J]. 地质找矿论丛，2004，19(2)：83－86.

[13] Coifman R R，Donoho D L. Translation invariant denoising [M] // Antoniadis A，Oppenheim G. Wavelet and Statistics，Lecture Notes in Statistics 103. New York：Springer-Verlag，1995：125－150.

[14] Pesquet J C，Krim H C. Time-invariant orthonormal wavelet representations [J]. IEEE Trans Sign Proc，1996，44(8)：1964－1970.

[15] Nason G P，Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications [M] // Antoniadis A，Oppenheim G. Wavelet and Statistics，Lecture Notes in Statistics 103. New York：Springer-Verlag，1995：281－299.

[16] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition：the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，1989，11(7)：674－693.

[17] Lu J J，Hua R M，Yao C L. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit of Jiangxi Province，China [J]. Geochim Cosmochim Acta，2005，69(Supp. A)：882.

[18] Li X F，Watanabe Y，Mao J W，et al. Sensitive high-resolution ion microprobe U-Pb zircon and ^{40}Ar－^{39}Ar muscovite ages of the Yinshan deposit in the northeast Jiangxi Province，South China [J]. Resource Geology，2007，57(3)：325－337.

[19] Wang G Q，Xu J F，Jian P，et al. Petrogenesis of Adakitic porphyries in an extensional tectonic setting，Dexing，South China：Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. Journal of Petrology，2006，47(1)：119－144.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net