

应用多重分形滤波技术提取致矿地球化学异常： 以西南“三江”南段 Cu、Zn 致矿异常提取为例

陈永清^{1,2}, 张生元³, 夏庆霖⁴, 李文昌⁵, 卢映祥⁵, 黄静宁¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

3. 石家庄经济学院经贸学院, 河北石家庄 050031

4. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

5. 云南省地质调查院, 云南昆明 650051

摘要: 西南“三江”南段位于印度板块与扬子板块的结合带, 是特提斯—喜马拉雅成矿域的重要组成部分。在多旋回的构造岩浆活动过程中, 形成了复杂的成矿地质地球化学背景和丰富的有色金属和贵金属矿产。正是这种复杂的地质地球化学背景, 使得应用地质统计学方法提取致矿地球化学异常遇到了挑战。为此, 多重分形滤波技术被引进, 试图从复杂的多重地球化学背景中有效地分离与成矿有关的 Cu、Zn 异常。研究表明: (1) 由于研究区存在多重地球化学背景, 克里格方法揭示的 Cu、Zn 剩余异常通常是受区域线形构造控制的区域异常, 多重分形滤波技术则揭示了与矿化有关的 Cu、Zn 局部致矿异常; (2) Cu 致矿异常的提取表明, 多重分形滤波技术能够克服某些岩性(譬如玄武岩)引起的 Cu 高背景的影响, 并从多重地球化学背景中有效提取致矿异常, 包括低背景中的弱异常和隐蔽异常; (3) 运用多重分形滤波技术清晰揭示了一系列 Zn 原始数据图上没有显示的、规模不等的 NNE 向 Zn 矿化异常带, 其中那条穿越整个研究区的 Zn 矿化异常带含有金顶巨型 Pb-Zn 矿床和一系列矿床、矿点、矿化点。整个研究工作是基于 MORPAS3.0 软件系统实现的。

关键词: 多重分形滤波技术; 多重地球化学背景; Cu-Zn 致矿异常; 西南“三江”成矿带。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2006)06-0861-06

收稿日期: 2006-03-06

Application of Multi-Fractal Filtering to Extraction of Geochemical Anomalies from Multi-Geochemical Backgrounds: A Case Study of the Southern Section of “Sanjiang Ore-Forming Zone”, Southwestern China

CHEN Yong-qing^{1,2}, ZHANG Sheng-yuan³, XIA Qing-lin⁴, LI Wen-chang⁵, LU Ying-xiang⁵, Huang Jing-ning¹

1. Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

3. School of Economics and Commerce, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Yunnan Geological Survey, Kunming 650051, China

Abstract: The southern section of “Sanjiang ore-forming zone” (the western Yunnan terrain), southwestern China, located at the joined belt between the Indian plate and Yangtze plate, is an important area of eastern Tethyan tectonic ore-forming domain. The polycyclic tectono-magmatic activities resulted both in the diversity of ore-forming geochemical background, and in the numerous base metal deposits and precious metal deposits, including a few such world-class deposits as the Jinding Pb-Zn deposit and the Laowangzhai Au deposit within the section. Such a complex geochemical background challenges us

基金项目: 国家“十五”科技攻关课题(No. 2003BA612A-02); 国土资源大调查项目(No. 200110200009)。

作者简介: 陈永清(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事矿产综合定量勘查与评价研究。E-mail: Fczyongqing@cgs.gov.cn

with the geostatistical extraction of geochemical anomalies for the mineralization purpose. For this, the multi-fractal filtering (S-A method) technique is introduced to isolate effectively the Cu and Zn anomalies related to mineralization in the complex multi-geochemical background. The following three research results are obtained in this study: (1) In the complicated geochemical background, the residual anomalies of Cu and Zn uncovered by Kriging are typical of the regional anomalies controlled by the regional linear fractural pattern; but the S-A method reveals the local anomalies of Cu and Zn associated with mineralization; (2) The separation of the Cu anomaly from its background demonstrates that the S-A method could effectively identify the high geochemical background of Cu from basalts and extract the Cu anomalies from multi-geochemical background, including weak and hidden Cu anomalies from their low background; (3) A few NNE-trending Zn mineralized and anomalous belts containing the super-large Jinding Pb-Zn deposit and a series of some other Pb-Zn deposits, that are absent at the Zn original data map, are clearly shown at the S-A anomalous map. This discovery presents us with not only new areas for prospecting Cu-Pb-Zn deposits but also new perspectives for the research into new ore-controlling factors, for the regional distribution of Pb-Zn deposits, which may include NNE-trending hidden fractures. All the research work is completed with the help of MORPAS3.0.

Key words: multi-fractal filtering techniques; multi-geochemical background; Cu-Zn geochemical anomalies; Sanjiang ore-forming zone of southwestern China.

西南“三江”南段位于印度板块与扬子板块的结合带,是特提斯—喜马拉雅成矿域的重要组成部分。在多旋回的构造岩浆活动过程中,形成了复杂的成矿地质地球化学背景和丰富的有色金属和贵金属矿产(图 1)。成矿地质地球化学背景的复杂性和矿床类型的多样性,尤其是二叠纪峨嵋山玄武岩引起的 Cu 等元素的高背景(陈永清等,2003),使得用传统的数据处理方法,譬如地质统计学方法提取致矿异常遇到了挑战。这里引进幂率谱—面积分形滤波技术(the power spectrum-area fractal method,简称 S-A)从其多重地球化学背景中提取 Cu、Zn 异常,取得了预期的效果。这种新开发的滤波技术已被成功地应用于加拿大多个地区地球化学、地球物理和遥感致矿异常信息的提取(Cheng *et al.*, 2000; Cheng, 2001, 2004; Xu and Cheng, 2001)。该方法的特点是在从复杂的地质矿化总体中提取致矿异常时既考虑矿化地质体幂率谱各向异性尺度不变性特征,又考虑其奇异性特征。

1 多重分形滤波基本原理

地壳在纵向和横向的非均质性,其物质结构的各向异性通常具有分形结构和自相似特征(Herzfeld and Overbeck, 1999; 成秋明, 2006),这种特征在频率域中能够表达为下列幂律关系:

$$A(>S) \propto S^{-\beta}, \quad (1)$$

这里 S 是能谱密度(energy spectrum density), A 是大于能谱密度某一临界值(S_0)的面积。不同的 β 值

在 $\log A(>S)-\log(S)$ 图上能够获取,这取决于分形滤波器的构置。通常在 $\log-\log$ 图上,所有直线段服从关系式(1)。不同的直线段代表了不同的分形关系,两条直线的交点所对应的横坐标值(能谱密度值)被视为确定分形滤波器的阈值。借助这些阈值,可以构造异常滤波器、背景滤波器。在频率域上运用不同的滤波器,并将其变换到空间域上以实现将异常和背景进行分离。这种分离异常和背景的 S-A 方法能通过 GeoDas(Cheng, 2002)和 MORPAS3.0(陈永清等,2006)软件系统加以实现,本次研究工作是基于后者完成的。

2 Cu 地球化学异常提取

为了对比应用不同的方法提取 Cu 异常的效果,首先编制了 Cu 原始含量图(图 2a)。该图表明 Cu 高含量主要分布在二叠纪峨嵋山玄武岩区域(对比图 2a 和图 1)。玄武岩中 Cu 的平均含量为 196×10^{-6} ,是世界玄武岩 Cu 平均含量的 2.25 倍;而在保山地块的上寒武统 Cu 的平均含量仅为 25×10^{-6} (陈永清等,2003, 2005)。这表明位于玄武岩区的某些大规模的所谓 Cu 异常是由玄武岩引起的。然后,在 $5 \times 5 \text{ km}^2$ 和 $25 \times 25 \text{ km}^2$ 的滑动窗口内分别使用反距离加权插值法(IDW)计算插值,再将插值结果相减得到 Cu 剩余异常图(图 2b)。该图反映了受区域线形构造控制的 Cu 区域地球化学异常,因为这些异常的分布趋势与研究区断裂带在空间上具有高度的一致性,皆呈 SN 向(研究区西部怒江、澜沧江

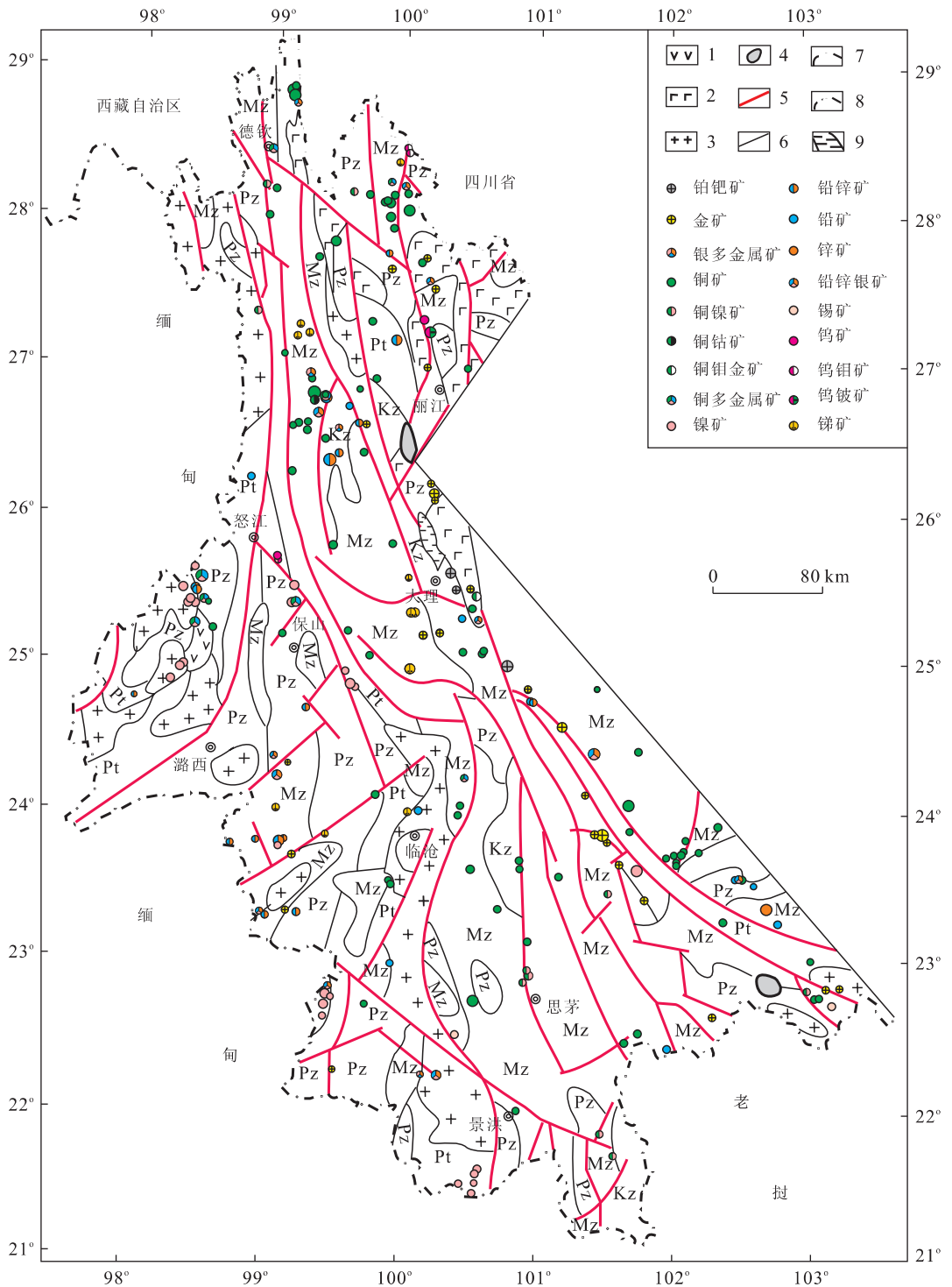


图1 西南“三江”南段地质矿产简图(据云南省地质调查院 1:50 万数字地质图编绘,2003)

Fig. 1 Geological map and the distribution of the known mineral deposits in southern region of “Sanjiang ore-forming zone”, southwestern China

Kz. 新生代碎屑岩、局部夹火山岩; Mz. 中生代碎屑岩、碳酸盐岩、局部夹火山岩; Pz. 古生代碳酸盐岩、碎屑岩、夹火山岩; Pt. 元古宇变质岩; 1. 新近纪—古近纪安山岩; 2. 二叠纪玄武岩; 3. 中酸性岩体; 4. 基性岩体; 5. 断层; 6. 地质界线; 7. 国界; 8. 省界; 9. 湖泊

流域)和NW-SE向(哀牢山断裂带和红河流域)分布(对比图2b和图1)。最后,应用S-A法获取了 $\ln A(>S)-\ln S$ 关系图(图3)。该方法确保了如图3中所表明的S和A之间的幂律关系,不同斜率的直

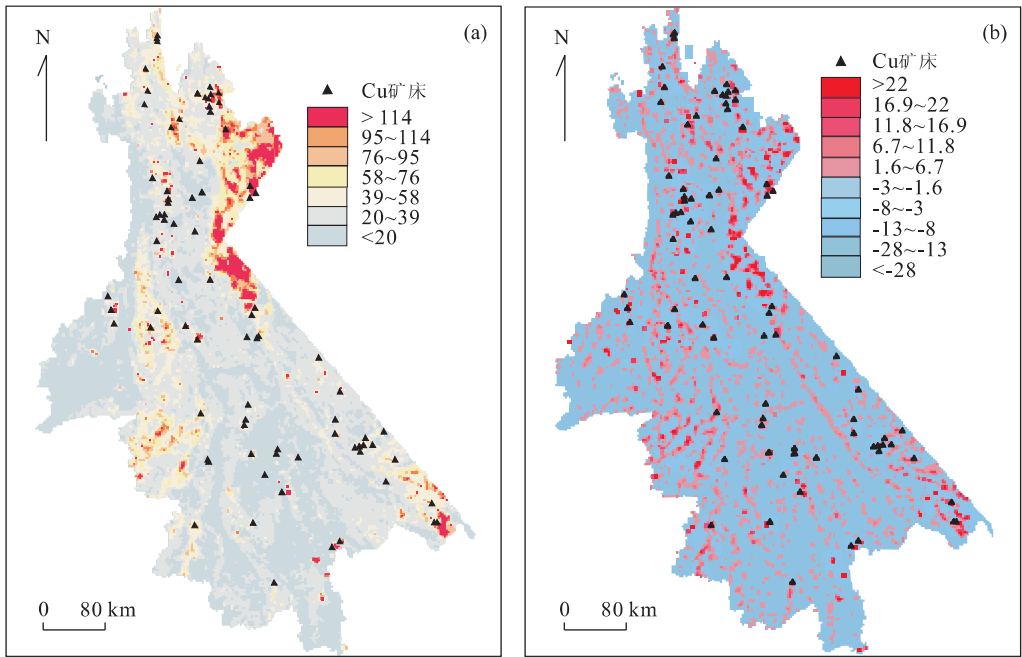


图 2 (a)Cu 原始含量;(b)IDW 方法获取的 Cu 剩余异常

Fig. 2 (a) Cu original concentration; (b) Cu residual anomaly using the IDW method

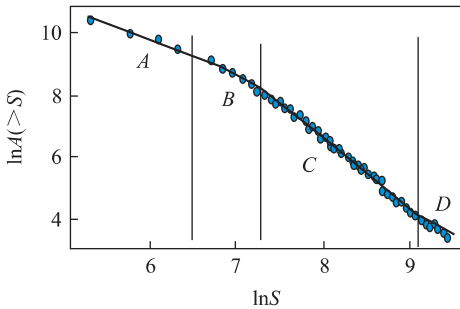


图 3 Cu 的 $\ln A(>S)$ - $\ln S$ 图

Fig. 3 In-ln plot showing the relationships between power spectrum value S and area $A(>S)$ on Cu. 使用最小二乘法模拟 4 条具有不同斜率的线段,并分别获取 3 个临界点: $\ln S_0=9.05, \ln S_1=7.3, \ln S_2=6.5$

线段代表了不同的自相似性特征,它们通常对应空间域中不同的地球化学背景和异常模式。例如,图 3 中,用最小二乘法模拟的右边两条线段的交点确立的阈值 $\ln S_0=9.05$ 。 $S<S_0$ 通常代表异常, $S>S_0$ 代表背景。通常,出于圈定和评价靶区的目的,我们只对异常感兴趣。通过逆 Fourier 变换,并取 $\ln S_0=9.05$ 作为阈值绘制 Cu 异常图(图 4)。该图表明,大多数已知 Cu 矿床分布在 Cu 异常区,同时提供了一些新的 Cu 异常区(找矿远景区)。与图 2a 含量相比,在图 4 中,与 Cu 矿化有关的弱 Cu 异常被增强,图 2a 中没有显示的许多与 Cu 矿化有关的所谓隐

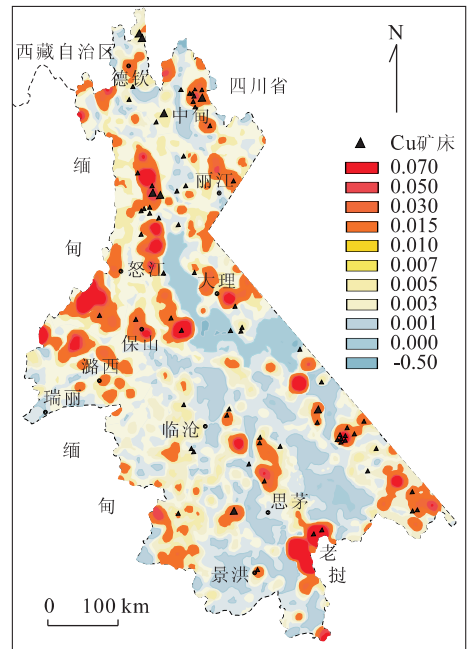


图 4 SA 方法获取的 Cu 异常

Fig. 4 Cu anomaly obtained using the SA method

蔽 Cu 异常被揭示;而在图 2a 中由玄武岩引起的所谓 Cu 的区域性异常,在图 5a 中呈现 Cu 的高背景。这表明,多重分形滤波技术能够从多重地球化学背景中有效地提取致矿地球化学异常。

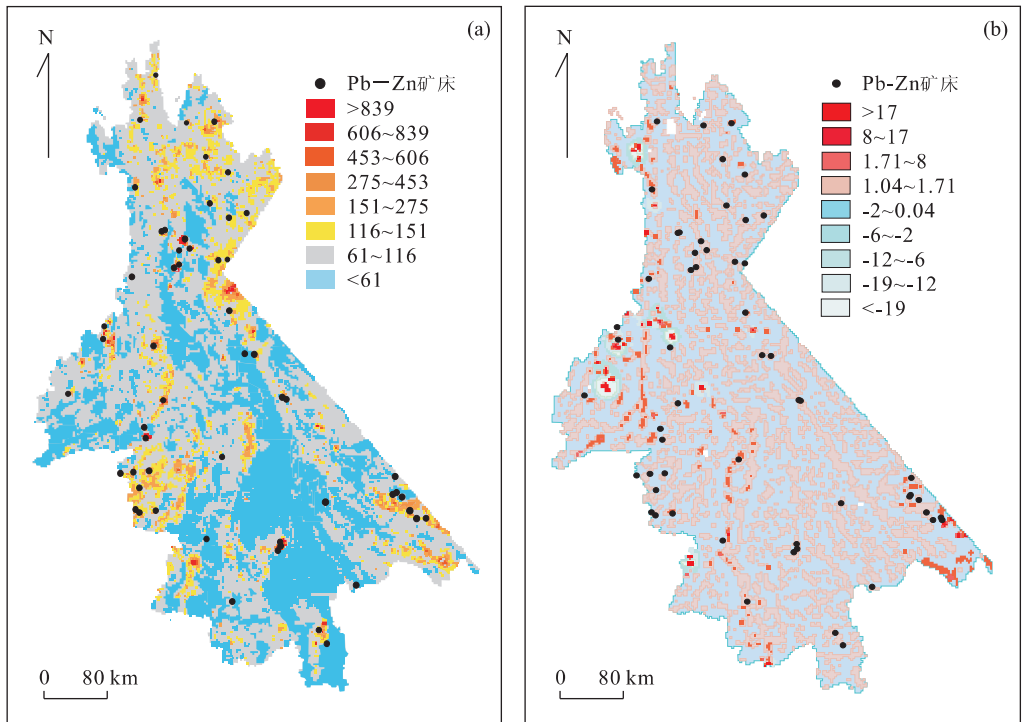


图 5 (a)Zn 原始含量;(b)IDW 方法获取的 Zn 剩余异常

Fig. 5 (a) Zn original concentration; (b) Zn residual anomaly using the IDW method

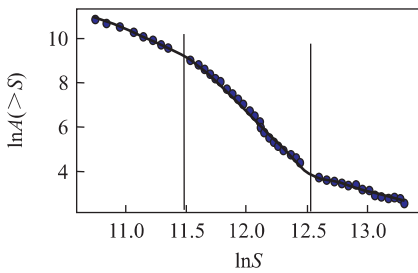


图 6 Zn 的 $\ln A(>S) - \ln S$ 图

Fig. 6 $\ln - \ln$ plot showing the relationships between power spectrum value S and area $A(>S)$ on Zn 使用最小二乘法模拟 3 条具有不同斜率的线段,并分别获得 2 个临界点: $\ln S_0 = 12.52, \ln S_1 = 11.49$

3 Zn 地球化学异常提取

类似于研究 Cu 的程序,绘制 Zn 原始含量图(图 5a)、Zn 剩余异常图(图 5b)、 $\ln A(>S) - \ln(S)$ 幂律关系图(图 6)和应用 S-A 方法获取的 Zn 异常图(图 7)。和 Cu 剩余异常图一样,图 5b 表明 Zn 区域异常与 Cu 区域异常具有类似的空间分布,皆受 SN 向和 NW-SE 向区域大断裂控制。在图 6 上,取 $\ln S_0 = 12.52$ 作为阈值,应用 S-A 方法绘制 Zn 异常分布图(图 7)。图 7 表明:(1)已知 Zn 矿床空间分布

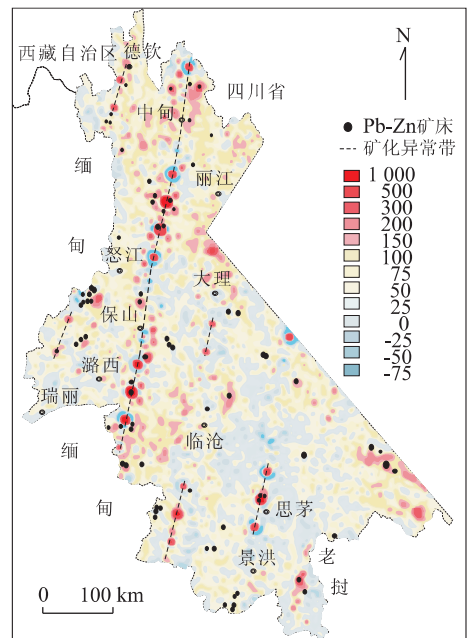


图 7 S-A 方法获取的 Zn 异常

Fig. 7 Zn anomaly obtained using the S-A method

与 Zn 异常具有较高的一致性;(2)更有意义的是,新发现一系列 NNE 向的规模不等的 Pb-Zn 矿化异常带;其中最重要的是那条穿越全区的 NNE 向的 Zn 矿化异常带,在该带上,分布有包括金顶巨型矿

床在内的一系列 Pb-Zn 多金属矿床、矿点和矿化点。Zn 矿床和 Zn 异常具有等距分布、分段集中的特点。这一发现不仅为研究区 Pb-Zn 多金属矿床的勘查开辟了新的区域,而且为研究该类矿床区域分布的控制因素(NNE 向构造控矿)提出了新的课题。

4 结论

成矿作用是地壳局域范围内发生的一种物质和结构上的非均一化过程。其产物(矿床)是典型的具有各向异性的异常地质体。大型、超大型矿床通常产在地壳结构和物质组成复杂的区域(Gorelov, 1982),其地球物理场和地球化学场在时空尺度上都是高度变化的。这就使我们很难用经典的地质统计学去准确刻画这种背景和异常的复杂关系。这是因为传统的地质统计学方法只能描述或模拟其变化性在一个数量级、至多不超过二个数量级的变化范围(Lovejoy *et al.*, 2005),因此,我们必须求助谱分析和其他分形以及多重分形模型等强有力工具去客观揭示这种复杂规律。

本次研究表明:(1)在复杂的多重地球化学背景下,地质统计学方法揭示的 Cu、Zn 剩余异常是受区域线形构造控制的区域异常;而多重分形滤波技术则揭示了与矿化相关的 Cu、Zn 局部异常,其异常与已知矿床在空间分布上具有较高的一致性。(2)Cu 异常的有效提取表明,多重分形滤波技术能够克服玄武岩引起的高背景,从而有效提取不同背景上的异常,包括低背景区的弱异常和隐蔽异常;从而为该区 Cu 矿勘查提供新的靶区。(3)多重分形滤波技术揭示了一系列规模不等的 NNE 向的 Zn 矿化异常带;这一发现不仅为研究区 Pb-Zn 多金属矿床的勘查开辟了新的区域,而且为研究该类矿床区域分布的控制因素(NNE 向构造控矿)提供了新的启示。

References

- Chen, Y. Q., Chen, J. G., Wang, X. Q., 2006. GIS based integrated quantitative assessment of mineral resources. *Geological Bulletin of China* (in Press, in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Lu, Y. X., Xia, Q. L., 2005. Geochemical characteristics of the Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan area, Yunnan Province, and its genetic model and ore prospecting pattern. *Geology in China*, 32(1):90-99 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Xia, Q. L., Liu, H. G., 2003. Geochemical characteristics of Pt-Pd-Cu ore-bearing formations in eastern Yunnan

- and analysis of their ore potentiality. *Geology in China*, 30(3):225-234 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2001. Selection of multifractal scaling breaks and separation of geochemical and geophysical anomalies. *Journal of China University of Geosciences*, 12(1):54-59.
- Cheng, Q. M., 2002. Geodata analysis system (GeoDas) for mineral exploration; User's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDas held at York University, November 1-3. 289 (<http://www.gisworld.org/geodas>).
- Cheng, Q. M., 2004. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*, 36(3):345-360.
- Cheng, Q. M., 2006. Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3):337-348 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., Xu, Y. G., Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum analysis for geochemical anomaly separation. *Nature Resources Research*, 9(1):43-56.
- Gorelov, D. A., 1982. Quantitative characteristics of geologic anomalies in assessing ore capacity. *International Geology Review*, 24(4):457-465.
- Herzfeld, U. C., Overbeck, C., 1999. Analysis and simulation of scale-dependent fractal surfaces with application to seafloor morphology. *Computer & Geosciences*, 25(9):963-978.
- Lovejoy, S., Schertzer, D., Gagnon, J. S., et al., 2005. Multifractal simulation of the earth's surface and interior; Anisotropic singularities and morphology. In: Cheng, Q. M., Bonham-Carter, G., eds., *Proceeding of IAMG: GIS and spatial analysis*, 1:37-54.
- Xu, Y. G., Cheng, Q. M., 2001. A multifractal filter technique for geochemical data analysis from Nova Scotia, Canada. *Geochemistry: Exploration, Analysis and Environment*, 1(2):1-12.

附中文参考文献

- 陈永清, 陈建国, 汪新庆, 2006. 基于 GIS 的矿产资源综合定量评价. *地质通报* (待刊).
- 陈永清, 卢映祥, 夏庆霖, 2005. 云南保山核桃坪铅锌矿床地球化学特征及其成矿模式与找矿模型. *中国地质*, 32(1): 90-99.
- 陈永清, 夏庆霖, 刘红光, 2003. 滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造地球化学特征及其含矿性分析. *中国地质*, 30(3): 225-234.
- 成秋明, 2006. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性—广义自相似性—分形谱系模型与方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 337-348.