

# 张家口地区矿化元素异常信息提取与集成

李随民<sup>1</sup> 崔美娟<sup>1</sup> 魏明辉<sup>2</sup> 韩腾飞<sup>3</sup> 李永峰<sup>4</sup>  
韩玉丑<sup>4</sup> 陈树清<sup>2</sup> 李玉红<sup>2</sup> 李紫烨<sup>1</sup>

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000;  
3. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081; 4. 河北省地矿局, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 本文以局部奇异性方法为手段, 结合证据权模型中点-面空间相关关系显著性指标  $t$  值, 确定了成矿元素局部奇异性最优的  $\alpha$  阈值, 据此圈出了单元元素异常分布区域。同时采用基于广义自相似性原理的 S-A 方法对复合异常进行分解, 得出区域背景场和异常场的空间分布。研究显示, 上述方法圈定的异常区域与已知矿床及区域成矿条件吻合程度较高, 能有效地提取和增强元素弱异常, 所圈异常区域可靠程度较高, 具有找矿意义。

**关键词:** 多重分形技术; 弱异常提取; 张家口

**中图分类号:** P588.125      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1925-10

勘查地球化学中最重要的任务是确定异常区域。传统的数理统计方法采用全区统一异常下限值来圈定异常, 该方法忽略了研究区内不同岩性、构造单元对元素含量分布的影响。该方法可以圈出范围较大、异常强度较高的区域, 但对于一些弱小异常则效果较差, 该类异常受所在区域的岩性影响较大。随着地质找矿工作的进展, 化探异常中一些所谓“高、大、全”的异常越来越少, 面临更多的是弱小异常的识别和提取, 即所谓成矿弱信息的识别和提取<sup>[1-2]</sup>。据此, 在勘查地球化学数据处理中研究者提出了多种解决方法, 如地质体单元法、趋势面分析法、模糊决策树技术<sup>[3]</sup>等。近年来, 许多有关分形和多重分形的方法也引入地球化学数据处理中以确定和圈定异常, 如成秋明<sup>[4-11]</sup>、陈永清<sup>[12]</sup>、张炎<sup>[13-16]</sup>、姜德波<sup>[17]</sup>、Agterberg<sup>[18]</sup> 等将多重分形理论引入到化探数据处理, 用以指示成矿有利地段, 该理论已经在国内外众多地区, 如中国西南三江、钦州湾-杭州湾、新疆东天山、加拿大 Nova Scotia 省东部等地得到了广泛应用。通过实际应用证明了分形方法比传统统计法更

有效。尤其是基于多重分形理论为基础的奇异性技术可以识别复杂的叠加场或复杂背景场中的弱异常。本文以张家口地区 1:20 万化探数据为例, 采用局部奇异性分析法圈定弱异常, 采用 S-A 广义自相似法对复合异常进行, 取得了较好的效果, 所圈的异常区域可指导野外勘查工作。

## 1 研究区地质概况

张家口地区处于西伯利亚板块、华北板块、太平洋板块相互交叉与联合作用的特殊三角地带, 由于地质作用的演化, 形成区内以东西、北东、北西向 3 组主要断裂带在空间上交叉的构造格局。

张家口地区以东西向尚义—赤城深大断裂带为界, 包括两个 II 级构造单元, 断裂以北为内蒙地轴, 南部为燕山裂陷带(图 1)。北部出露地层主要为古元古代红旗营子群变质结晶基底和燕山期火山岩, 以缺失中新元古代—古生代沉积盖层为特征。南部出露地层主要为太古宙桑干群变质结晶基底和中新元古代碳酸盐岩盖层。张家口地区燕山期岩浆活动

收稿日期: 2013-01-11; 改回日期: 2013-09-17

基金项目: 河北省国土资源厅项目(2011055548 和 2013045650)共同资助。

作者简介: 李随民, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要矿床学方面的教学和研究工作; E-mail: smli71@163.com。

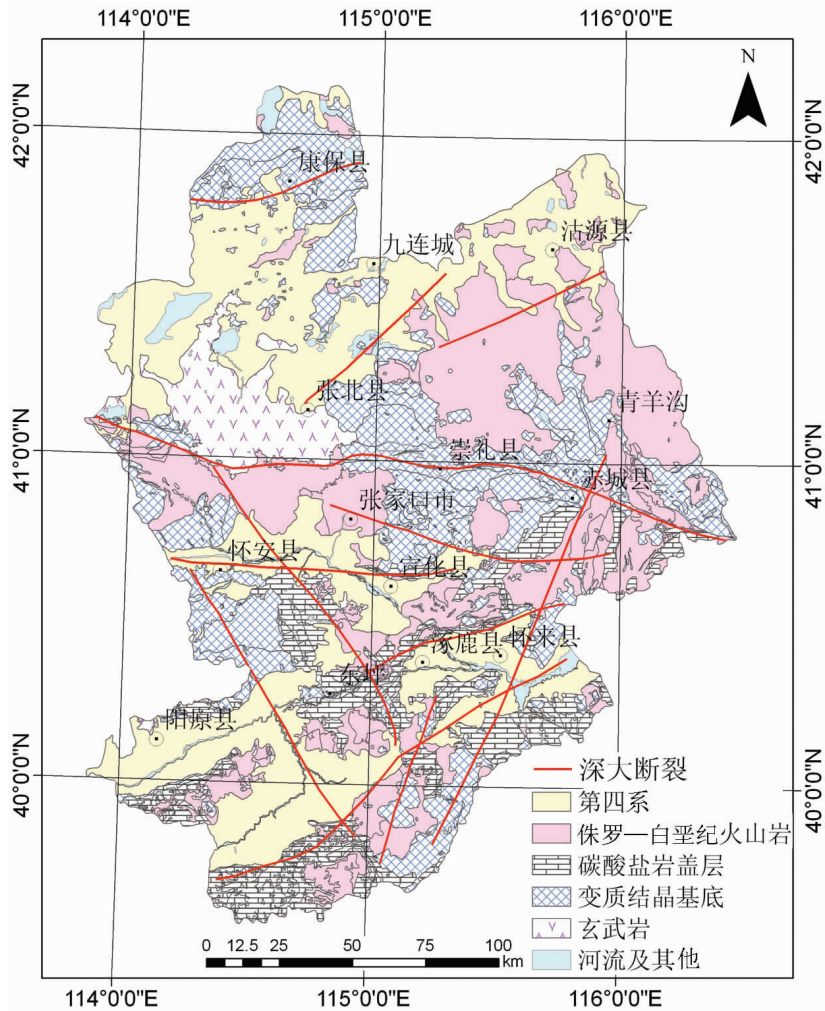


图1 张家口地区区域地质简图  
 Fig.1 Geological sketch map of Zhangjiakou area

频繁,侵入岩体分布广泛,岩性以中-酸性为主。玄武岩主要出露在断裂北部的张北县附近,形成时间为古近—新近纪。

张家口北部结晶基底主要由古元古代红旗营子群组成,自元古宙末期,地台基底形成以来,长期处于裸露状态。区域地质资料对比显示,红旗营子群向西与内蒙(阴山地区)古元古代渣尔太群,向东与辽宁辽河群相当<sup>①</sup>。该套地层与铅锌银多金属矿床关系密切。燕山期岩浆岩在本区最发育。包括四个旋回,总的趋势由弱到强,每个旋回从火山岩开始,以中深成侵入岩结束。北部区域内燕山期火山岩与铅锌银多金属矿床有密切的成因联系,如蔡家营多金属矿床、三义庄铁-锌-钼矿床、贾家营钼矿床、青羊

沟铅锌矿床等。

南部燕山裂陷带变质结晶基底由太古宇桑干群组成,主要分布在怀安、宣化一带,为一套具有麻粒岩相变质程度的片麻岩-麻粒岩岩系。主要由中酸性麻粒岩所组成,其原岩为英云闪长岩和奥长花岗岩。从区域地层对比来看,它大体相当于冀东地区的迁西群。宋瑞先等(1994)<sup>[20]</sup>认为桑干群化家营组和涧沟河组的接合部上下层位的角闪质岩石及部分麻粒岩为冀西北张家口地区金矿的矿源层,全区90%以上的金矿床(点)都赋存于这个层位或由其衍生而来的继承性岩体(水泉沟二长岩体)之中。沉积盖层主要为中-新元古代古滨海相碳酸盐岩地层。部分铅锌银多金属矿床分布于盖层的白云岩中。

①王金锁. 冀北西部银矿成矿地质条件及找矿方向(河北地质三队内部资料),1992.

## 2 异常提取与靶区圈定

成秋明<sup>[4,6]</sup>认为,从非线性理论角度看,成矿过程可以看作是一种奇异性地质过程,奇异性过程可以导致在很小的时间或者空间范围内能量的巨量释放或者物质的超常堆积和富集,奇异性过程中所产生的结果如矿床、成矿异常等具有分形和多重分形分布规律。可以采用幂函数来度量。基于多重分形理论所定义的奇异性指数( $\Delta \alpha$ )可以用来度量异常的局部标度性(scaling)和奇异性(singularity)。由此而发展的局部奇异性分析方法可用于多尺度地球化学、地球物理和其他类型局部异常的圈定和奇异性程度的度量。

假设在体积为  $V$  的含矿岩石内的金属量为  $\mu V$ ,那么金属浓度可以表达为  $C(V)=\mu(V)/V$ 。当  $V$  改变时,数量  $\mu(V)$  和  $C(V)$  也随之改变;如当体积  $V$  减小时,金属量  $\mu(V)$  也随之减少;然而金属浓度  $C(V)$  的变化趋势却要取决于矿石的性质。如果它们服从多重分形规律,则金属量  $\mu(V)$  和金属浓度  $C(V)$  有以下幂律关系:

$$\mu(V)=cV^{\frac{\alpha}{3}}$$

$$C(V)=cV^{\frac{\alpha}{3}-1}$$

式中: $\mu(V)$ 是体积  $V$  内的总金属量; $C(V)$ 是体积  $V$  内的平均浓度; $\alpha$ 是幂律关系的指数,也称分形维数; $c$ 是常数。分形维数  $\alpha$  可以通过一组体积  $V$  和对应的  $C(V)$  在双对数坐标上,使用最小二乘法拟合直线的方式来获得。上述两公式是针对三维体积  $V$  的。针对于二维空间问题,使用面积  $A$  代替体积  $V$ ,面积金属浓度  $\rho(A)$  代替体积金属浓度  $C(V)$ ,这样幂律关系便可以表达为以下公式:

$$\mu(A)=cA^{\frac{\alpha}{2}}$$

$$\rho(A)=cA^{\frac{\alpha}{2}-1}$$

研究区奇异性指数的空间分布可以通过分形维数谱函数  $f(\alpha)$  来表达,该函数表明:如果元素的浓度值可以被看作具有恒定均值的平稳随机变量,那么  $\alpha \approx 2$  代表着一种非奇异性,无奇异的地区对应于背景场,背景地段一般在地球化学图中占绝大部分范围<sup>[11]</sup>。 $\alpha < 2$  的位置可能表明元素的异常富集, $\alpha > 2$  的位置可能表示元素的异常贫化。当  $\alpha \ll 2$

时,矿化强度的增强,将造成成矿元素的显著富集,从而有可能达到工业品位<sup>[4-5,18]</sup>。

在实际应用中可以在网格化的数据上,基于移动窗口计算出奇异性指数。

### 2.1 局部奇异性分析与局部异常圈定

本次研究使用的 1:20 万化探数据来自中国地质调查局。采样密度为 1~2 个/km<sup>2</sup>,然后按 4 km<sup>2</sup> 网格组合 1 个样品,每个组合样测试 39 种元素。张家口研究区共计 6 960 个组合样品。其中 Pb、Zn、Ag 等元素的样品 Q-Q (全部对数变换) 图分析显示(图 2~4),主成矿元素的大部分样品服从对数正态分布,但少部分数据(主要体现在右端截尾极高值)明显偏离对数正态分布线。从空间统计观点来看,在一个地球化学图上较均匀取样的大多数正常数据( $\Delta \alpha \approx 0$ )符合正态分布或对数正态分布,少部分数据( $\Delta \alpha \neq 0$ ,两端截尾极高值和极低值)可能符合分形分布<sup>[21]</sup>。

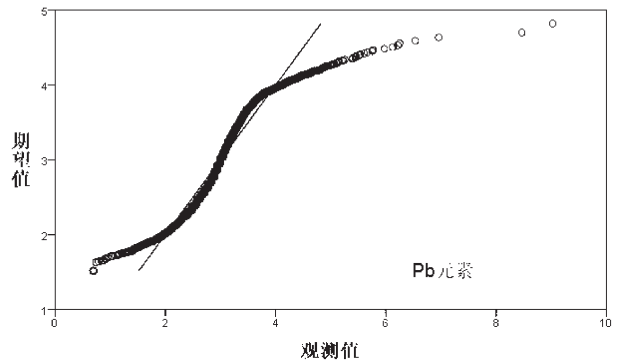


图 2 Pb 元素质量浓度 Q-Q 图  
Fig.2 Q-Q chart of Pb element concentrations

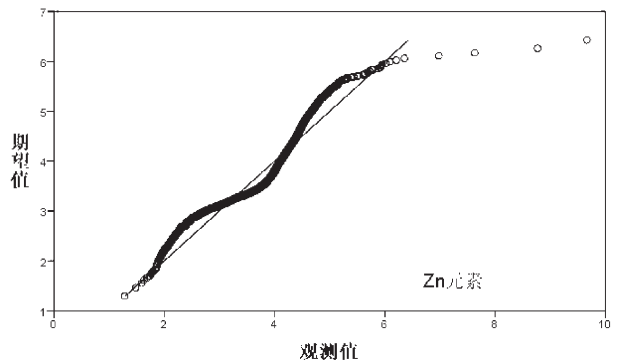


图 3 Zn 元素质量浓度 Q-Q 图  
Fig.3 Q-Q chart of Zn element concentrations

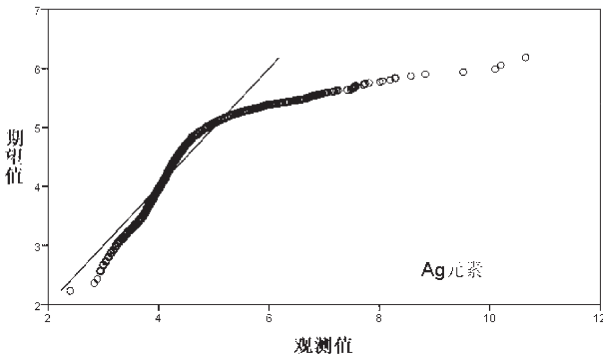


图 4 Ag 元素质量浓度 Q-Q 图

Fig.4 Q-Q chart of Ag element concentrations

为计算张家口成矿元素的局部奇异性指数,在 GeoDAS 软件,以组合样品位置为中心,依次形成不同大小的方形窗口,计算每个窗口内的平均元素密度,然后在双对数图上绘制平均密度与窗口大小的关系图,再对窗口中所获得的数据进行最小二乘法线性回归,回归直线的斜率即可作为奇异性指数的估计值( $\Delta \alpha$ )。将每个采样点位上计算的局部奇异性指数进行作图即可形成局部奇异性指数图。

证据权法提供了度量点-面空间相关关系显著性的指标  $t$  值<sup>[2]</sup>, $t$  值越大,说明空间相关关系越强,通常  $t > 1.96$  可以认为空间相关性具有统计显著性。以往的研究中较多利用该功能确定矿床(点)与断层或岩体之间的最佳缓冲区间,以此确定最佳找矿部位。本次为了确定最优的  $\alpha$  阈值,也采用证据权法所提供的学生统计量( $t$  值,学生分布值,  $t = C/S(C)$ ) 确定。具体实现过程为:对  $\alpha$  取不同的阈值进行二值化处理,形成离散数据栅格文件,将研究区已知铅锌银多金属矿床作为训练点集,进行证据权法计算确定最优  $\alpha$  阈值。

采用证据权法计算的 Pb、Zn、Ag 元素最优  $\alpha$  阈值分别为:Ag 元素局部奇异值  $\alpha$  为 1.78 时, $t$  值达到最大,为 3.2996;Pb 元素局部奇异值  $\alpha$  为 1.83 时, $t$  值达到最大,为 3.1634;Zn 元素局部奇异值  $\alpha$  为 1.87 时, $t$  值达到最大,为 1.9752。据此,分别圈出了 Pb、Zn、Ag 元素的奇异值异常图。对原始化探数据中 Pb、Zn、Ag 元素含量采用反复迭代法剔除特异值后,根据“均值+2 倍均方差”计算了张家口主成矿元素异常下限值:Pb、Zn、Ag 三种元素异常下限值分别为  $32 \times 10^{-6}$ 、 $95 \times 10^{-6}$ 、 $130 \times 10^{-6}$ 。在上述元素异常下限值的基础上,采用 2 倍下限值为中带,4 倍下

限值为内带的方法分别圈定了各元素的异常内带、中带和外带。并将两种方法圈定的异常区域进行了对比(图 5~10),结果表明,传统统计方法所圈的异常与奇异性方法所圈区域均与已知矿床具有较高的相关性,但相比而言,奇异性方法所圈异常区域范围较小,且在未知区域也圈定了多处异常区域,具有较好的预测性。

### 2.2 局部奇异性分析与组合局部异常的圈定

为了采用 Pb、Zn、Ag 元素数据来圈定综合异常,对上述元素的奇异值( $\alpha$  值)进行了主成分分析,第一主成分占到全部方差的 72.8%,表明第一主成分构成的综合局部奇异性图(图 11)可以较完整地反映张家口地区的局部奇异性空间异常模式。综合局部奇异性图不仅在已知多金属矿区上有清晰显示,而且在尚义—赤城深大断裂以南区域(燕山裂陷带)内有数处异常出现。该区域出露岩性以变质结晶基底为主的古老变质岩为主,是形成多金属矿床的主要矿源层。因此应特别注意该区域的多金属找矿工作。

构造是热液型矿床形成和分布的重要条件。与矿有关的断裂构造往往会对地球化学异常起到一定控制作用。为分析所圈异常与构造之间的关系,本次提取了 1:20 万地质图上的断裂,并进行 5 km 缓冲区分析,结果显示,张家口已知 31 个多金属矿床(点)有 25 个落入 5 km 缓冲区范围内,占到已知矿床数目的 80.6%,说明断层对矿床的控制作用十分显著(图 12)。其中距离断层 1.5 km 范围内为找矿的最佳区域,证据权模型计算的  $t$  值为 2.9352,显示出矿点与该范围区域具有显著的空间相关性。在 GIS 平台也提取了断层交叉点,研究表明断层交叉点与异常的空间分布之间也具有显著的空间相关性(该成果将另文发表)。上述断层及交叉点与异常之间的相关性从另一方面也说明了采用局部奇异性方法所圈异常可能为矿致异常。

### 3 复合异常的分解与圈定

综合异常图是应用数学计算方法(如:累加、累乘、比值、加权、主成分分析等)对元素组进行处理、按照相关规则圈定的综合性图件。是相关系数较高的一组元素按某种方法进行异常区叠加,形成能够反映成矿过程的综合异常区,该异常图是圈定预测区的基础。无论是累计、累乘或其他方法,均无法有

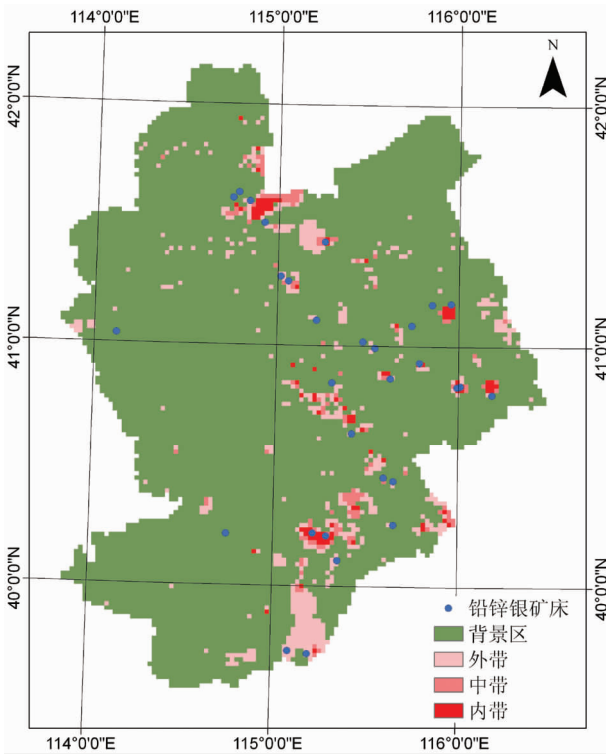


图 5 采用传统统计方法圈定的 Ag 元素异常区  
Fig.5 Ag anomalies delineated by traditional statistical method

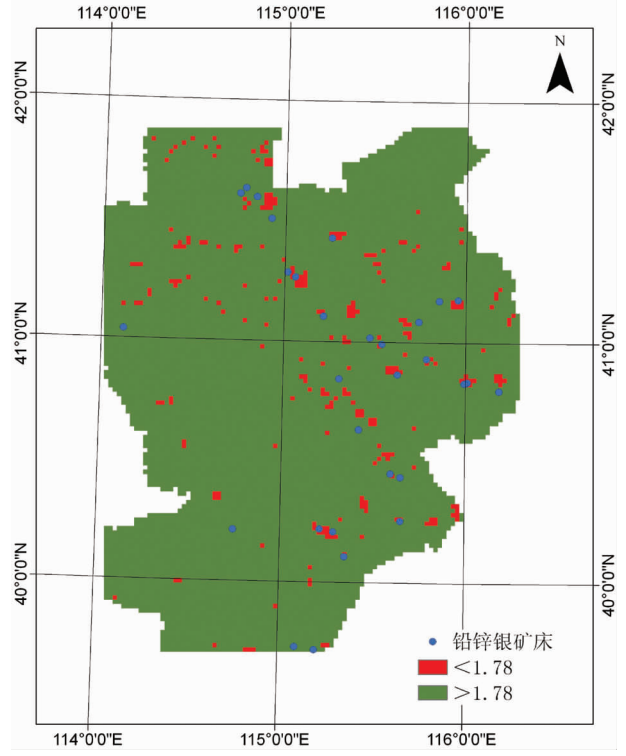


图 6 采用局部奇异性方法圈定的 Ag 元素异常区  
Fig.6 Ag anomalies delineated by singularity method

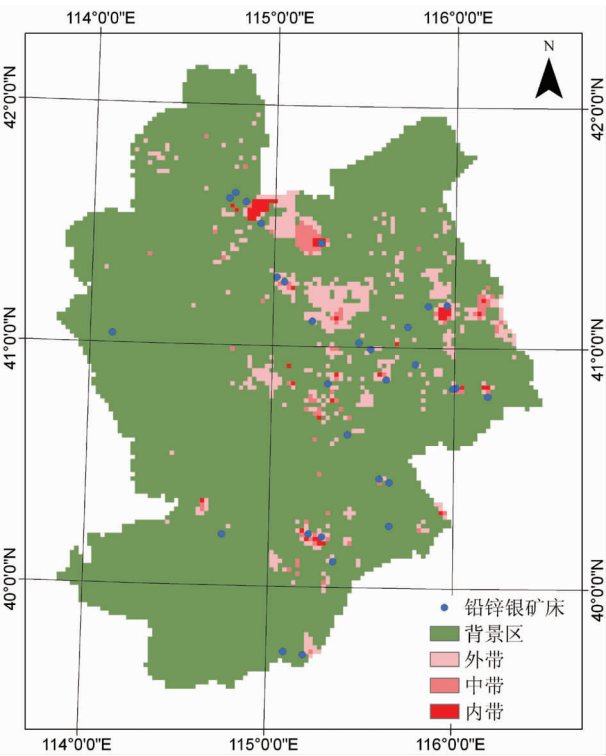


图 7 采用传统统计方法圈定的 Pb 元素异常区  
Fig.7 Pb anomalies delineated by traditional statistical method

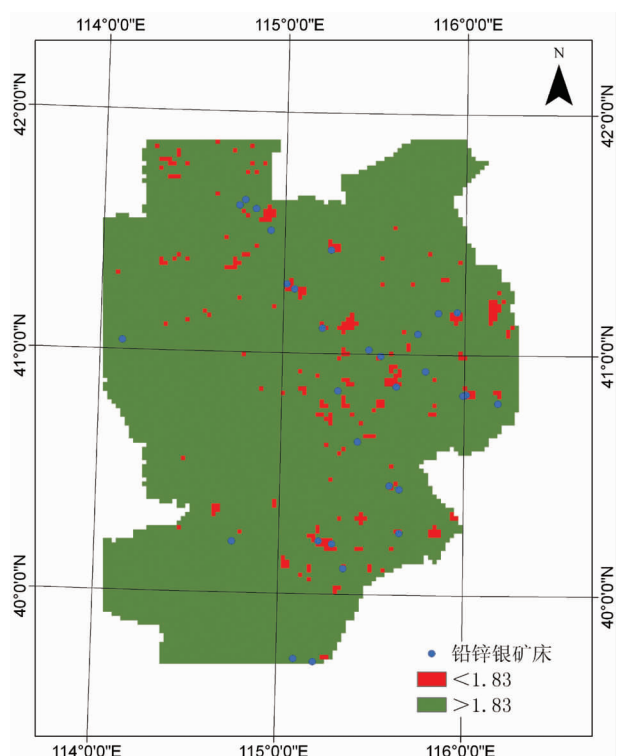


图 8 采用局部奇异性方法圈定的 Pb 元素异常区  
Fig.8 Pb anomalies delineated by singularity method

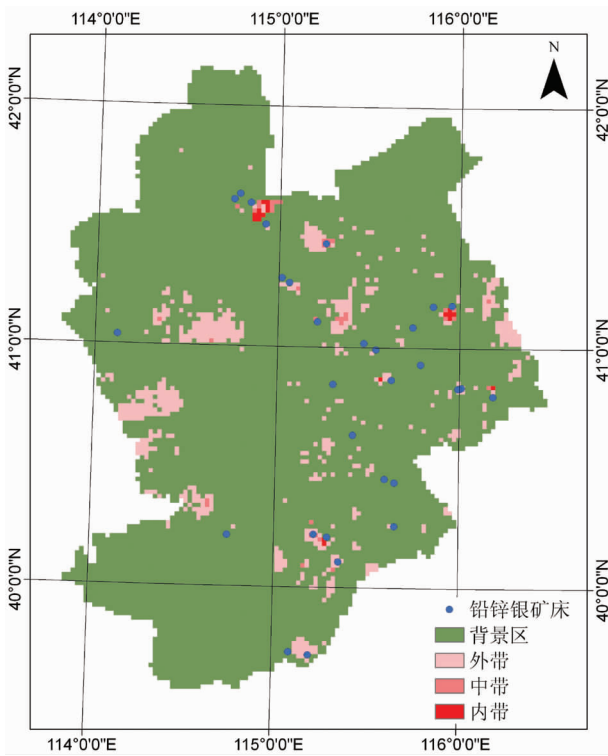


图 9 采用传统统计方法圈定的 Zn 元素异常区  
Fig.9 Zn anomalies delineated by traditional statistical method

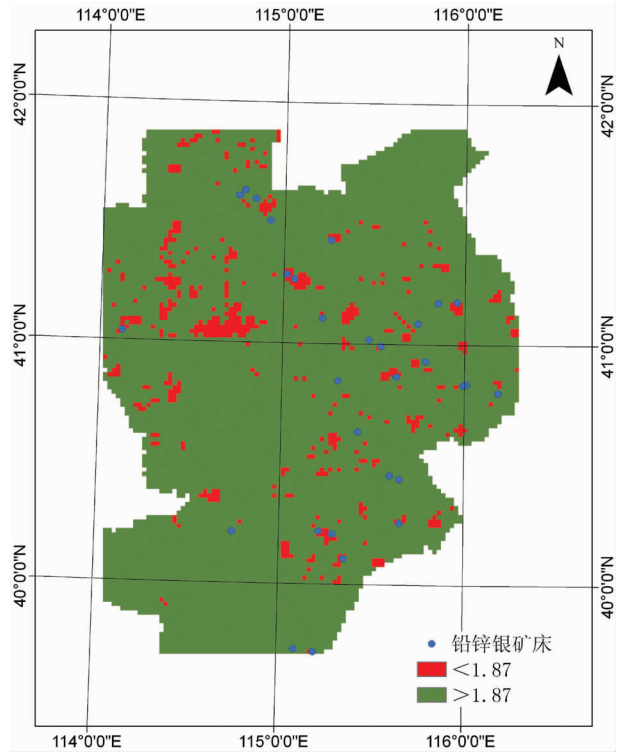


图 10 采用局部奇异性方法圈定的 Zn 元素异常区  
Fig.10 Zn anomalies delineated by singularity method

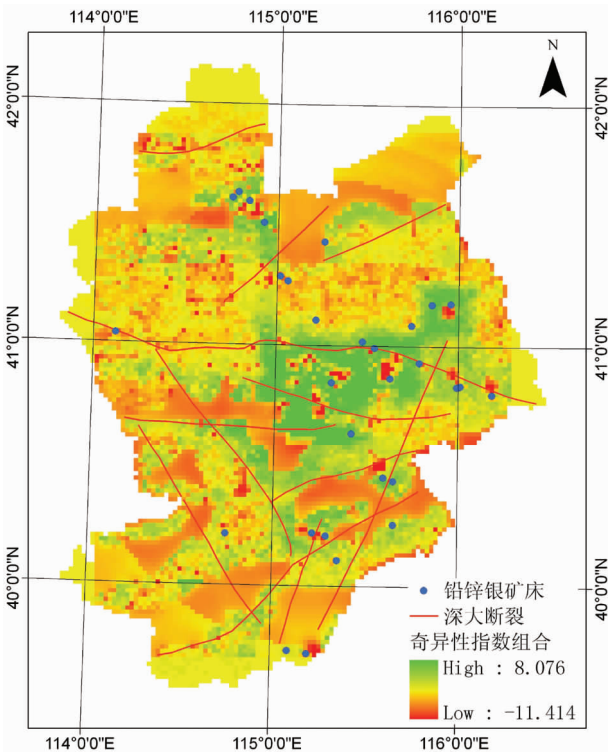


图 11 对多元素奇异值进行主成分分析结果  
Fig.11 Principal component analysis of singularity of multielements

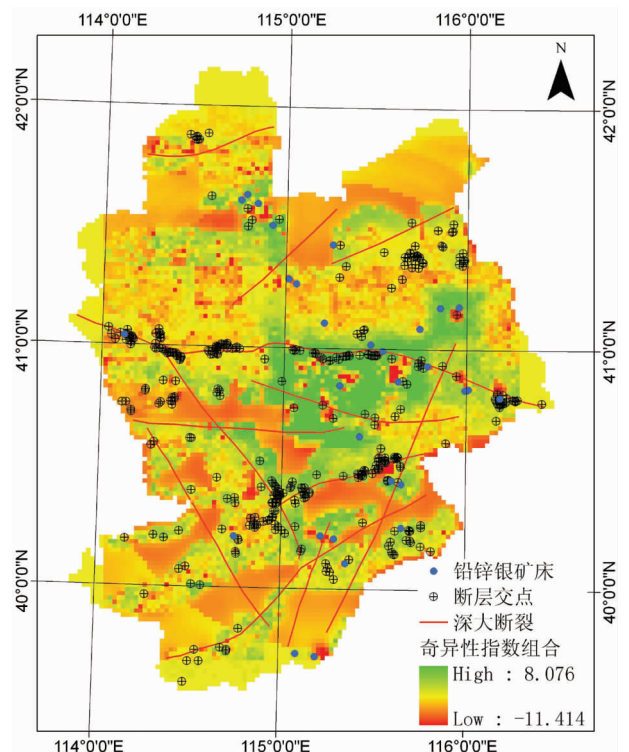


图 12 对多元素奇异值与断裂及交叉点空间关系图  
Fig.12 The relationship between the singularity of multielements and faults as well as the intersection of faults

效剔除区域背景的影响。以应用较多的因子或主成分分析方法为例, 因子分析或主成分分析的前提是多个变量之间具有显著的相关性, 只有多个变量之间具有相关性, 才能使用因子分析方法将原始变量的信息进行重新组构, 形成数目较少, 但能够反映原来变量大部分信息的公因子。因此, 在地质研究中每一个公因子具有特定地质成因意义。公因子得分图虽是某次特殊地质作用(成矿作用)空间元素变化规律的显示, 但其变化规律也受区域地质背景的控制。如何将区域背景从公因子得分图上进行分离一直以来受到勘查地球化学家的重视。近些年来随着非线性分形理论的应用研究, 人们发现不同的地质过程所产生的异常模式还会表现为不同的尺度标度性、异向性、广义自相似性等差异<sup>[5]</sup>。合理地定量刻划异常的这些性质无疑会对异常识别有所帮助。成秋明<sup>[7,10,11]</sup>近年来基于广义自相似性原理而提出的“能谱分析”或“S-A”方法在该问题的解决上取得了较大进展。该方法的基本原理是在能谱空间中确定地球化学背景和异常所对应的不同自相似性, 从而对复合和叠加地球化学背景和异常进行分解。具体来说, 这个方法可将地球化学图从空间域经过傅里叶变换转换到频率域, 在频率域中基于广义自相似性构建分形滤波器, 最后将经过分形滤波后的信息经逆傅里叶变换转换回到空间域, 从而得到被分解后的背景图和异常图。

复合异常分解与圈定实现过程: 首先利用原始化探数据采用 IDW 法插值形成 Pb、Zn、Ag 元素栅格图层, 采用主成分分析法计算特征值分布。可以看出, 第一主成分(PC1)占到全部信息的近 68.3%(图 13), 第二主成分(PC2)占到总体的 20.8%, 前两个主成分占了变异的 89.1%。为了充分利用第一和第二主成分分析结果, 本次将 PC1 和 PC2 组合计算了一个组合主成分 PC1&2(图 14)。

采用 S-A 异常分解方法对第一、二主成分组合的 PC1&2 成分的得分图进行了异常与背景的分解。其步骤为:

通过傅里叶变换将组合成分载荷图转换到频率域, 形成相分布图和能谱分布图, 得到能谱密度(S)与累积面积(A)关系图(图 15); 能谱密度与累积面积关系可采用三条直线根据最小二乘法拟合。其中第一段代表了背景区, 第二段为局部异常区, 第三段为成矿异常区。3 个区间以能谱密度阈值  $S=$

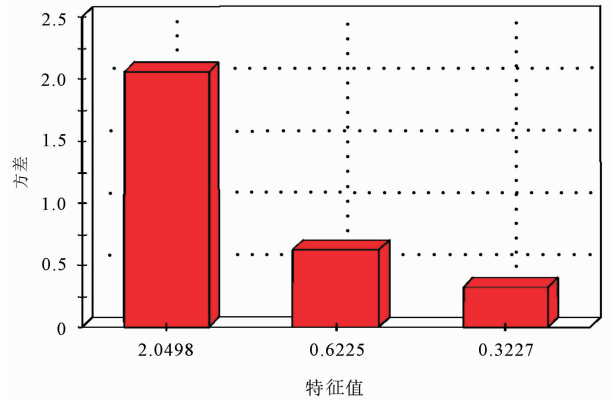


图 13 主成分的相对重要性

Fig.13 The relative importance of the principal component

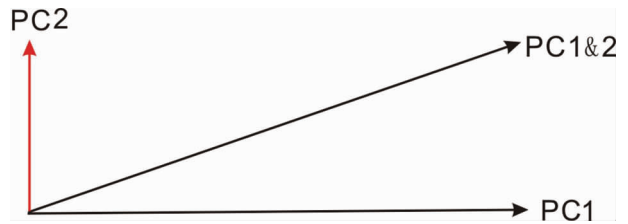


图 14 第一、二主成分组合示意图

Fig.14 Element Factor loadings on the first principal component

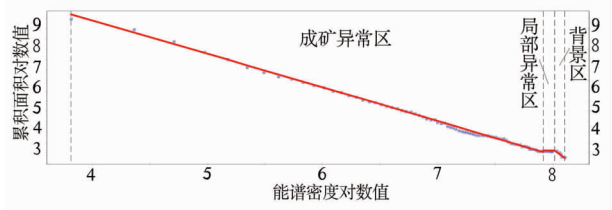


图 15 PC1&2 成分中载荷的 S-A 曲线图

Fig.15 S-A plot of the PC1&2 component

2734.21 和  $S= 3024.24$  分开; 第一段取值区间内能谱密度与面积的关系为:  $\log[A(\geq S)]=37.675^{-4.312}$ , 此段拟合结果的标准误差仅为 0.0023; 第二段能谱密度与面积的关系为:  $\log[A(\geq S)]=3.096S^{-0.00056}$ , 此段拟合结果的标准误差为  $2.78 \times 10^{-10}$ ; 第三段取值区间内能谱密度与面积的关系为:  $\log[A(\geq S)]=15.9S^{-1.625}$ , 此段拟合结果的标准误差为 0.00397。

以  $S=2734.2$  构造 2 个滤波器, 能谱密度小于 2734.2 的能谱范围称为异常滤波器, 能谱密度大于 2734.2 的能谱范围称为背景滤波器。由构造的异常滤波器和背景滤波器可将组合主成分载荷图分解为背景图(图 16)和异常图(图 17)。背景场图高值区与

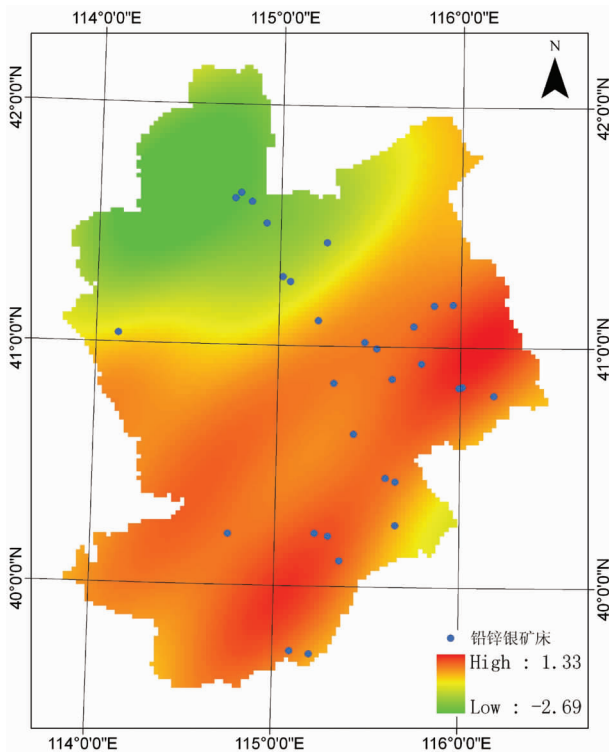


图 16 分解 PC1 & 2 主成分载荷背景场  
Fig.16 Background values of scores on the combination principal component

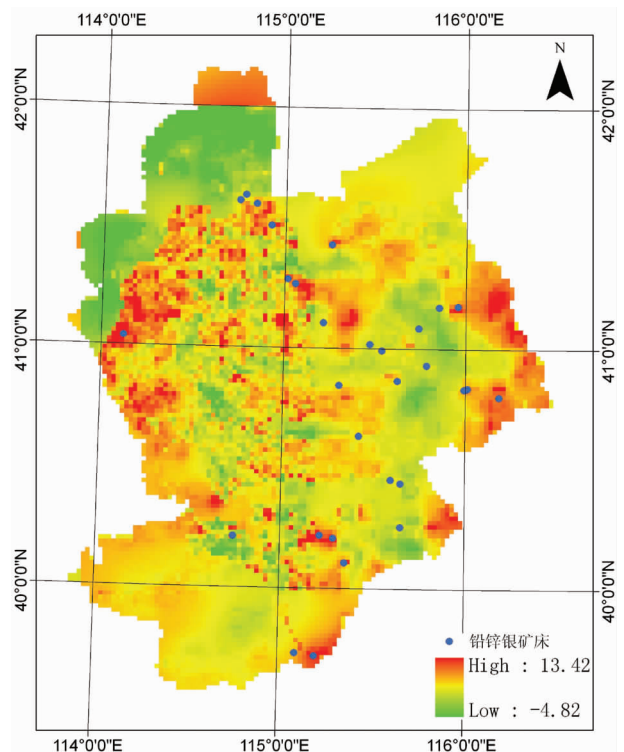


图 17 分解 PC1 & 2 主成分载荷异常场  
Fig.17 Anomalies of scores on the combination principal component

北东向上黄旗—乌龙沟深大断裂相对应，该断裂带控制了燕山期大河南—大海陀岩浆岩带的分布。区域背景场显示燕山期构造—岩浆岩带对张家口多金属成矿起着重要的控制作用，这与以往的认识相吻合<sup>[23-26]</sup>。异常场中除与已知矿床相吻合的高值区外，也存在未发现矿床的多个高值区，应为今后找矿重点关注的区域。

### 4 结论

- (1) 与传统统计方法所圈的异常相比，局部奇异性方法所圈异常范围相对较小，且能在未知区域圈出多处异常，具有较好的提取和增强弱异常的能力。
- (2) 张家口主成矿元素异常与断裂关系密切，说明多金属矿床的形成受断层控制作用较强，同时也预示着采用局部奇异性方法所圈异常可能为矿致异常。
- (3) 采用基于广义自相似性原理的“S-A”方法对复合异常进行了解析，圈出的背景与北东向构造—岩浆岩带相对应，而异常场除与已知矿床高度

吻合外，亦有数处高值异常圈出，可通过野外工作进一步查证。

### 参考文献 (References):

- [1] 谢学锦, 任天祥, 严光生, 等. 进入 21 世纪中国化探发展路线图 [J]. 中国地质, 2010, 37(2): 245-267.  
Xie Xuejing, Ren Tianxiang, Yan Guangsheng, et al. 21st Century's roadmap for exploration geochemistry in China [J]. Geology in China, 2010, 37(2): 245-267(in Chinese with English abstract).
- [2] 奚小环, 李敏. 中国区域化探若干基本问题研究: 1999—2009 [J]. 中国地质, 2012, 39(2): 267-282.  
Xi Xiaohuan, Li Min. Regional geochemical exploration in China: From 1999 to 2009 [J]. Geology in China, 2012, 39 (2): 267-282 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王明志, 董方灵, 梁群峰, 等. 模糊决策树技术在化探异常提取中的应用 [J]. 中国地质, 2011, 38(3): 762-769.  
Wang Mingzhi, Dong Fangling, Liang Qunfeng, et al. The application of fuzzy decision tree to extracting geochemical anomalies [J]. Geology in China, 2011, 38(3): 762-769(in Chinese with English abstract).
- [4] 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.
- Cheng Qiuming, Zhao Pengda, Chen Jianguo, et al. Application of singularity theory in predication of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Weak information extraction and information decomposition [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34 (2): 232-242 (in Chinese with English abstract).
- [5] Cheng Qiuming. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China [J]. Ore Geology Review, 2007, 32: 314-324.
- [6] 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与进展[J].地学前缘,2009,16(2):185-198.
- Cheng Qiuming, Zhang Shengyuan, Zuo Renguang, et al. Progress of multifractal filtering techniques and their applications in geochemical information extraction [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 185-198 (in Chinese with English abstract).
- [7] 成秋明.空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价[J].地球科学:中国地质大学学报,2004,29(6):733-744.
- Cheng Qiuming. Quantifying the generalized self-similarity of spatial patterns for mineral resources assessment [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29 (6): 733-744 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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):311-318.
- Cheng Qiuming. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2000, 25 (3): 311-318 (in Chinese with English abstract).
- [9] 成秋明.非线性矿床模型与非常规矿产资源评价[J].地球科学:中国地质大学学报,2003,28(4):1-10.
- Cheng Qiuming. Non-Linear mineralization model and information processing methods for prediction of unconventional mineral resources [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(4): 1-10(in Chinese with English abstract).
- [10] 成秋明.地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(2):307-316.
- Cheng Qiuming. Singularity modeling of geoanomalies and recognition of anomalies caused by buried sources[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36 (2): 307-316 (in Chinese with English abstract).
- [11] Cheng Q M. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. J. Geochem. Explor., 1999, 65: 175-194.
- [12] 陈永清,张生元,夏庆霖,等.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[J].地球科学:中国地质大学学报,2006,31(6):861-866.
- Chen Yongqing, Zhang Shengyuan, Xia Qinglin, et al. 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[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 861-866(in Chinese with English abstract).
- [13] 张焱,周永章.多重地球化学背景下地球化学弱异常增强识别与信息提取[J].地球化学,2012,41(3):278-291.
- Zhang Yan, Zhou Yongzhang. Recognition and extraction of geochemical weak anomalies based on multiple geochemical background[J]. Geochimica, 2012, 41(3): 278-291(in Chinese with English abstract).
- [14] 张焱,周永章.奇异性理论在钦杭成矿带(南段)庞西桐银金矿产资源预测中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3558-3564.
- Zhang Yan, Zhou Yongzhang. Application of singularity theory in prediction of silver and gold mineral deposits in Qinzhou - Hangzhou tectonic joint belt Pangxidong area, Guangdong, China [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3558-3564(in Chinese with English abstract).
- [15] 张焱,成秋明,周永章,等.分形插值在地球化学数据中的应用[J].中山大学学报(自然科学版),2011,50(1):133-137.
- Zhang Yan, Cheng Qiuming, Zhou Yongzhang, et al. Assessment of fractal interpolation method in geochemical exploration [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50 (1): 133-137 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张焱,周永章,王正海,等.广东庞西桐地区地球化学组合异常识别与提取[J].地球学报,2011,32(5):533-540.
- Zhang Yan, Zhou Yongzhang, Wang Zhenghai, et al. The recognition and extraction of geochemical composite anomalies: A case study of Pangxidong area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(5): 533-540(in Chinese with English abstract).
- [17] 姜德波,肖克炎,左仁广,等.奇异性填图技术在新疆东天山黄山-镜儿泉镍铜成矿带中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):705-714.
- Lou Debo, Xiao Keyan, Zou Renguang, et al. Application of singularity mapping technique on identifying local anomalies by debris geochemical data—A case study from Huangshan - Jingerquan Ni-Cu belt in eastern Tianshan, Xinjiang, western China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 705-714(in Chinese with English abstract).
- [18] Zuo Renguang, Cheng Qiuming, Agterberg F P, et al. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101, 225-235.
- [19] 白瑾主编.华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M].北京:地质出版社,1993:1-112.
- Bai Jin (ed.). Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the North Margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-112(in Chinese).
- [20] 宋瑞先,王有志,王振鹏,等.河北金矿地质[M].北京:地质出版社,1994.

- Song Ruixian, Wang Youzhi, Wang Zhenpeng, et al. Gold Geology of Hebei[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 9-255(in Chinese).
- [21] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 51: 109-130.
- [22] Bonham-Carter G F, Agterberg F P. Weights of Evidence: A Mew Approach to Mappig Mineral Potential, Statistical Applications in the Earth Sciences [M]. Canada: Geological Survey of Canada, 1990: 171-183.
- [23] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 华北地块北缘中段铅锌银矿床成矿作用讨论[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(2): 105-111.
- Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. On the metallogenic aspects of Pb-Zn-Ag deposits in the middle north margin of North China block[J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25(2): 105-111(in Chinese with English abstract).
- [24] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约——以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例 [J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(4): 193-200.
- Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. Pb isotope characteristics of Pb-Zn-(Ag) deposits in the middle north margin of North China block: Constraints on source process[J]. Progress in Precambrian Research, 2001, 24 (4): 193-200 (in Chinese with English abstract).
- [25] 任耀武. 红旗营子群研究——冀北铅锌银矿床的矿源层[J]. 华北地质矿产杂志, 1997, 12(1): 44-51.
- Ren Yaowu. A study on Hongqiyingzi Group——the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in north Hebei [J]. J. Geol. & Min. Res. North China, 1997, 12 (1): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李随民. 河北省张家口北部铅锌银多金属矿床成矿规律及找矿方向研究[R]. 中国地质大学(武汉)博士后出站报告, 2008.
- Li Suimin. Metallogenic Regularities and Prospecting Direction of Lead-Zinc-Silver Polymetallic Deposit in Northern Zhangjiakou Region, Hebei Province [R]. China University of Geosciences (Wuhan) Postdoc. Report. 2008 (in Chinese with English abstract).

## The extraction and integration of geochemical anomaly information from Zhangjiakou area, Hebei Province

LI Sui-min<sup>1</sup>, CUI Mei-juan<sup>1</sup>, WEI Ming-hui<sup>2</sup>, HAN Teng-fei<sup>3</sup>,  
HAN Yu-chou<sup>4</sup>, CHEN Shu-qin<sup>2</sup>, LI Yu-hong<sup>2</sup>, LI Zi-ye<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang College of Economy, Shiliazhuang 050031, Hebei, China; 2. No. 3 Geological Party, Hebei Bureau of Geological Exploration, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 3. Geological Survey Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, Hebei, China; 4. Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

**Abstract:** Using the local singularity method, the authors determined the optimal alpha threshold based on the point-surface space related significant index t value of the weight of the evidence method, and delineated the distribution of single element anomalies. At the same time, based on the generalized self-similarity principle, the authors used the S-A method to decompose the complex anomaly, and detected the spatial distribution of the regional background field and the anomalous field. Because the delineated anomalies are well consistent with known Pb-Zn-Ag polymetallic deposits, they can provide geochemical evidence for delineating target areas. Research shows that the local singularity method and the fractal filtering method can effectively enhance the weak anomalies, extract the ore-forming anomalies, and help explore concealed ore bodies in Zhangjiakou area.

**Key words:** mulit-fractal model; weak anomaly extraction; Zhangjiakou area

**About the first author:** LI Sui-min, male, born in 1971, doctor and professor, mainly engages in the study of deposit geology and deposit geochemistry; E-mail: smli71@163.com.