

doi:10.3799/dqkx.2011.036

应用奇异值分解(SVD)技术提取 鲁西铜石金矿田致矿重力异常

赵彬彬, 陈永清

中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 基于 MATLAB 平台编制的奇异值分解(SVD)程序有效地应用于铜石金矿田 1:50 000 重力数据分解。首先, 利用奇异值分解将重力数据分解为一系列的特征值空间; 然后运用多重分形技术确立反映不同层次控矿因素的特征空间值的临界值, 最后将这些具有不同控矿因素特征的特征空间值按一定的规则进行数据重构。结果获取三幅刻画不同尺度控矿因素的重力异常图像。(1)区域控矿地质因素是位于平邑火山沉积盆地(重力异常值 $-56 \sim -974 \mu\text{m/s}^2$)南西侧 NW 向基底隆起(重力异常值 $-55 \sim 567 \mu\text{m/s}^2$)的鞍谷部位(重力异常值 $-55 \sim 51 \mu\text{m/s}^2$), 这里为构造上的局部拉张区, 控制铜石杂岩体以及所有金矿床的整体分布, 是金成矿的有利地段。(2)局部控矿因素是具有重力负异常特征(重力异常值 $-339 \sim -11 \mu\text{m/s}^2$)的铜石杂岩体和围绕杂岩体形成的具有环形重力正异常(重力异常值 $37 \sim 345 \mu\text{m/s}^2$)接触交代带, 斑岩型金矿化位于岩体内部, 矽卡岩型金矿化形成于接触带中, 而隐爆角砾岩型和卡林型金矿化形成于接触交代带外围; 因此, 岩体及其环形接触交代带是金成矿的潜在地段。(3)具体控矿因素是 NE 和 NW 向重力异常反应的两个方向断裂交汇域, 几乎所有金矿化都位于这些交汇域, 因此, 这里是金成矿的远景地段。(4)铜石金矿田具有典型的多重因素控矿的复杂性特征。

关键词: 奇异值分解; 多重分形; 重力异常; 金矿化; 控矿因素; 铜石金矿田; 中国东部。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2011)02-0341-06

收稿日期: 2010-05-12

Singular-Value Decomposition (SVD) for Extraction of Gravity Anomaly Associated with Gold Mineralization in the Tongshi Gold Orefield, Western Shandong Province, East China

ZHAO Bin-bin, CHEN Yong-qing

School of the Earth Sciences & Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: A singular-value decomposition (SVD) program on a MATLAB platform was effectively used to handle gravity signals for the Tongshi gold field. Firstly, The gravity signals are firstly decomposed into different eigenimages with singular-value decomposition method. Secondly, the thresholds between the eigenvalues reflecting different layers of ore-controlling factors are established by multi-fractal method. Finally the eigenvalues with different layers of ore-controlling factors were rebuilt on certain mathematical rules. This yielded three layers of two-dimensional singular-value images that meticulously depict ore-controlling factors in different scales respectively. (1) The regional ore-controlling factor is a saddle valley with the gravity anomaly values varying from -55 to $51 \mu\text{m/s}^2$ of the NW trending swell with the gravity anomaly values varying from -55 to $567 \mu\text{m/s}^2$ on the SW side of the Mesozoic volcanic sedimentary basin with the gravity anomaly values varying from -56 to $-974 \mu\text{m/s}^2$. The saddle valley might be tectonically an extensional area where the Tongshi complex pluton and all gold deposits are located and thus this area is a favorable area for gold deposits. (2) The local ore-controlling factor is the Tongshi complex pluton with a negative circular gravity anomaly varying from -339 to $-11 \mu\text{m/s}^2$ and the ring contact metasomatic mineralization zone around the Tongshi complex with the positive gravity anomaly varying from 37 to $345 \mu\text{m/s}^2$. The porphyry gold occurrences are located within the Tongshi intrusive complex and Skarn iron-copper-gold occurrences are located in the inner contact metasomatic zone between the intrusive complex and its host rocks. Crypto-breccia and Carlin-type gold deposits are lo-

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40972232, 40772197); 国家高新技术研究“863”发展计划(No. 2006BAB01A03); “十一·五”国家科技支撑计划(No. 2006BAB01A01)。

作者简介: 赵彬彬(1983—), 男, 博士研究生, 地球探测与信息技术。E-mail: bbzhao@yahoo.com.cn

cated at the outer contact metasomatic zone between the intrusive complex and its host rocks. Thus the two areas are potential areas for gold deposits. (3) The concrete ore-controlling factor is crossing areas between the NE trending faults and NW trending faults reflected by the two trending gravity anomaly zones. Almost all gold deposits are located within crossing areas and thus these areas are prospective areas for gold deposits. (4) The Tongshi gold field has a typical complexity with multi-layers of ore-controlling factors.

Key words: singular-value decomposition; multi-fractal; gravity anomalies; gold mineralization; ore-controlling factors; Tongshi gold orefield; East China.

奇异性普遍存在于非线性自然过程中,如云层建造(cloud formation)、降雨、飓风、滑坡、地震、矿化等,而这些非线性过程可以用分形或多重分形来描述(Cheng, 2008). 整个地质过程可以看作是不同时间的各个地质过程的叠加,而非线性理论角度看,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,可以采用幂率(power-law)函数来度量(成秋明等, 2009a, 2009b). 如何从整个复杂的地质过程结果中分离出与成矿过程有关的信息是奇异性分析的最终目的.

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)作为线性代数的一种分解方法,能够将数据集 $\mathbf{X}$ 分解为一系列的特征空间. Vrabie(2004)和 Gliford(2005)利用 SVD 方法对信号和噪声进行分离. Freire and Ulrych(1988)利用 SVD 方法在垂直地震剖面(VSP)中分离上行波、下行波和噪声. Cagnoli and Ulrych(2001)用之来计算底涌云沉积(base surge cloud deposits)的探地雷达图像(ground-penetrating radar(GPR) image)的波反射总量.

与成矿有关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,往往集中在一些相应的特征空间中. 利用特征空间能量与特征值平方之间的分形和多重分形分布规律,采用幂率(power-law)函数实现不同特征空间之间的分离,从而进一步提取与矿化有关的异常信息.

本文将以鲁西隆起区铜石金矿田 1 : 50 000 重力数据为例,利用多重分形特征值分解实现重力数据的分离,从而揭示深部构造与金成矿之间的空间关系,并为找矿提供科学依据.

1 奇异值分解(SVD)基本原理

奇异值分解可以将矩阵 $\mathbf{X}$ 分解为左特征向量

矩阵、对角矩阵和右特征向量矩阵的乘积,如:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \quad (1)$$

其中对角矩阵 $\mathbf{S}$ 为奇异值矩阵, T 表示矩阵的转置. 矩阵 $\mathbf{S}$ 中存储的即为 $\mathbf{X}$ 的奇异值,并沿主对角线按降序排列,其值的大小为协方差矩阵 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 或 $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ 特征值(λ)的正平方根. 即:

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r), \quad (2)$$

其中, r 为矩阵 $\mathbf{X}$ 的秩, $r = \text{rank}(\mathbf{X})$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$, $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$.

奇异值分解也可表示为如下形式:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (3)$$

$\mathbf{u}_i$ 是 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 的第 i 个特征向量, $\mathbf{v}_i$ 是 $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ 的第 i 个特征向量, σ_i 是 $\mathbf{X}$ 的第 i 个特征值, $\mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$ 为 $m \times n$ 矩阵,是矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 i 个特征空间. 根据公式(3),如果利用矩阵 $\mathbf{X}$ 的所有特征值所对应的特征空间,就能够重构出原始的 $\mathbf{X}$,如果选取部分奇异值,就能够重构包含部分信息的子矩阵.

奇异值有以下性质:(1)奇异值分布按照主对角线呈降序排列;(2)奇异值 σ_i 代表了矩阵 $\mathbf{X}$ 投射到相应的特征空间 $\mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$ 的系数;(3)奇异值的平方与 Fourier 空间中的能谱密度值是一致的(Li, 2005).

由于奇异值矩阵呈降序排列,前几个奇异值又较大,所以前几个奇异值所对应的特征空间就包含了矩阵 $\mathbf{X}$ 的绝大部分能量. 每个特征空间所对应的能量百分比 P_i 计算如下(Freire and Ulrych, 1988; Li, 2005):

$$P_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{j=1}^r \sigma_j^2} = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^r \lambda_j}. \quad (4)$$

2 SVD 在铜石金矿田致矿重力异常信息提取中的应用

重力信息的一个显著特点是具有“透视性”,它不仅能够反映浅部的地质现象,而且通过对重力场

的分解,能够获取深部地质结构信息.重力信息的另一个特点是具有多解性,这是因为通常我们获取的重力数据测量的是不同规模、不同深度、不同形态和不同密度地质体组合的叠加场.这就要求我们根据地质体场的性质和特点,借助科学信息提取(分解)技术实现叠加场的分解,尽可能使场与地质体一一对应,并结合地质矿化信息等约束条件,获取目标信息,最终达到解决地质找矿疑难问题之目的.这里,笔者将 SVD 和多重分形方法相结合应用于铜石金矿田致矿重力异常信息提取,查明矿田深部地质结构,为隐伏矿体预测提供科学依据.

2.1 铜石金矿田地质矿化特征

铜石金矿田位于鲁西隆起区,平邑 NW 向中生代火山岩盆地的南西侧的隐伏基底区(图 1)(Chen *et al.*, 2001;陈永清等,2001).隐伏基底区下部是太古代绿岩带——泰山群山草峪组黑云斜长变粒岩,其上覆盖古生代碳酸盐岩.燕山期正长斑岩和闪长玢岩(统称铜石杂岩体)侵入于中生代火山岩盆地南西侧隐伏基底区,其⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 188.4~189.8 Ma(林景仟等,1996),锆石 SHRIMP U-Pb

年龄为 167.9~183 Ma(胡华斌等,2005).矿化以岩体为中心具有分带现象:杂岩体内发育斑岩型 Au 矿化,岩体与围岩接触带发育矽卡岩型 Fe-Cu-Au 矿化再向外碳酸盐岩中发育角砾岩型和卡林型 Au 矿化,其中,归来庄大型金矿床具有角砾岩型和卡林型 Au 矿化双重特征(Chen and Liu, 2000;祝德平等,2000;于学峰,2001).

2.2 重力异常信息提取

文中所用重力数据来源于山东地质矿产局第二地质队 1991 年铜石金矿田外围金矿普查所实施的 1:50 000 综合物探调查中的重力测量结果.其测量网距为 500 m×250 m,工作总精度为 ±232×10⁻² μm/s²,测量面积 408 km².铜石金矿田出露地质体密度参数由高至低依次为:泰山群(2.73~2.90 g/cm³)→寒武—奥陶纪碳酸盐岩(2.64~2.76 g/cm³)→闪长玢岩—正长斑岩(2.61~2.71 g/cm³)→侏罗—白垩纪火山沉积岩(2.46~2.53 g/cm³)(王世称等,2003).

下面对图 2 数据进行奇异值分解.
Freire and Ulrych(1988)定义了低通 X_{LP} ,带通

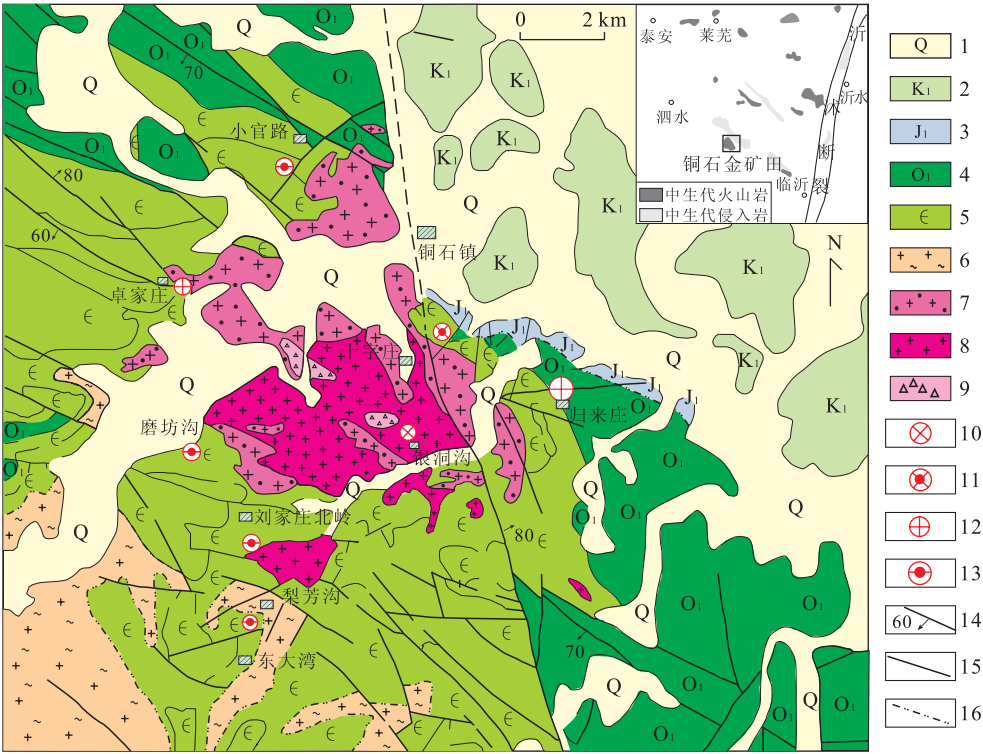


图 1 铜石金矿田地质矿产分布(据 Chen and Liu, 2000 修编)

Fig.1 Geological map of the Tongshi gold field

1. 第四纪沉积物;2. 白垩纪火山沉积岩;3. 侏罗纪火山沉积岩;4. 奥陶纪碳酸盐岩;5. 寒武纪碳酸盐岩;6. 太古代泰山群;7. 燕山期闪长玢岩;8. 燕山期正长斑岩;9. 隐爆角砾岩;10. 斑岩型金矿点;11. 矽卡岩型金矿点;12. 隐爆角砾岩型金矿床;13. 卡林型金矿床;14. 断裂;15. 地质界线;16. 不整合地质界线

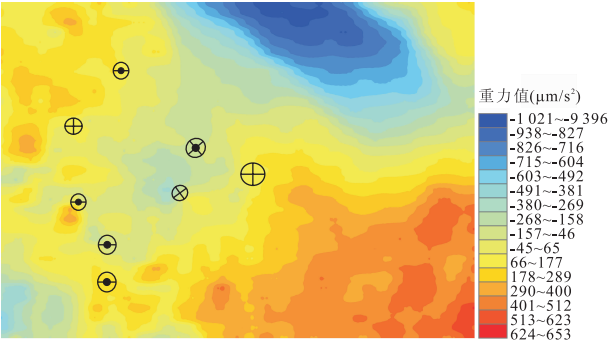


图 2 铜石金矿田 1 : 50 000 原始重力数据图像(金矿点图例见图 1)

Fig. 2 The original gravity data image surveyed at scale 1 : 50 000

$\mathbf{X}_{\text{LP}}$ 和 $\mathbf{X}_{\text{HP}}$ 高通 SVD 图像. 其形式如下:

$$\mathbf{X}_{\text{LP}} = \sum_{i=1}^{p-1} \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_{\text{BP}} = \sum_{i=p}^{q-1} \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_{\text{HP}} = \sum_{i=q}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (7)$$

其中 p, q 的选择取决于奇异值本身. 这里我们将用多重分形的方法来确定 p, q 的值. 奇异性过程可以导致矿化和矿物的堆积和富集,而这可以用幂率(power-law)模型(分形或多重分形模型)来刻画(Cheng, 2007, 2008). 对于矩阵 $\mathbf{X}$ 来说,可以认为投影到奇异值对应的特征空间的能量密度(能谱半径,类似于 Fourier 变换中的周期)为奇异值的平方(λ),于是奇异值大于 λ_i 的总能量(也称为在一个能谱半径(尺度)内得到的一个能谱测度)(李庆谋和成秋明, 2004)为:

$$E(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) = \sum_{k=1}^i \lambda_k, \quad (8)$$

能量所占百分比为:

$$P(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{t=1}^r \lambda_t}. \quad (9)$$

这样一个能谱半径内对应一个能量,也可以表述为在一定的能谱尺度下,能得到一个能量的测度. 对秩为 r 的矩阵,可以得到长度为 r 的能量测度随能谱尺度变化的序列对. 与 Fourier 变换中的能谱与频率的关系相类比,这样定义的尺度与能量测度之间可能具有分形规律,也即 λ 与 E (或者 P) 之间就可能存在分形规律(李庆谋和刘少华, 2003; 李庆谋和

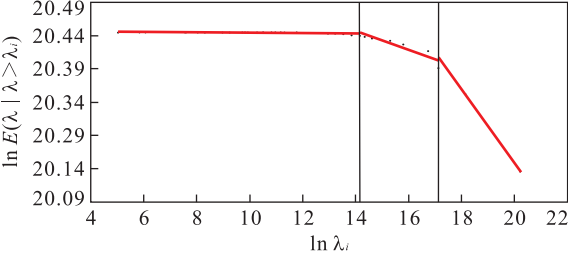


图 3 $\ln \lambda - \ln E(\lambda | \lambda > \lambda_i)$ 对数图

Fig. 3 $\ln - \ln$ plot of $\lambda - E$ with two break points

使用最小二乘法拟合 3 条具有不同斜率的线段,分割点 $p=3, q=9$, $\ln \lambda_3=17.13, \ln \lambda_9=14.17$

成秋明, 2004; Li, 2005), 即:

$$E \propto \lambda^a, \quad (10)$$

$$\text{或 } P(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) \propto \lambda^a. \quad (11)$$

由于在 $\lambda - E$ 双对数图中,可能存在不同的幂率关系(多重分形),可以根据曲线的斜率不同,用若干个直线段对曲线进行拟合. 而不同线段的交点即为 p, q 分界点(在有些情况下直线段不止 3 段,可以存在更多的分界点). 其中同一线段的奇异值所对应的特征空间重构结果与特定的地质过程相对应.

根据特征值空间能量百分比和奇异值平方之间存在的不同区段之间不同的幂率关系,来确定式(5, 6, 7)中的分割点 p 和 q . 图 3 为双对数图,横轴为奇异值平方的对数 $\ln \lambda_i$,纵轴为特征空间能量 $E(\lambda | \lambda > \lambda_i)$ 的自然对数,并以 $p=3, q=9$ 为分割点. 右侧段由 λ_1 和 λ_2 组成,占总能量的 91.1%,而由其重构的重力图像(图 4)往往能反映区域控矿因素;中间段由 $\lambda_3 \sim \lambda_8$ 组成,占总能量的 8.2%,由其重构的重力图像(图 5)往往反映局部控矿因素;左侧段由 $\lambda_9 \sim \lambda_{35}$ 组成(λ_{35} 以后所对应的特征空间所占能量微乎其微,可以忽略),约占总能量的 0.7%,由其重构的重力图像(图 6)往往反映具体的控矿因素.

结合图 1,图 4 表明铜石杂岩体及其相关金矿床分布于平邑火山沉积盆地(重力异常值 $-56 \sim -974 \mu\text{m/s}^2$)南西侧 NW 向隐伏基底隆起(重力异常值 $52 \sim 567 \mu\text{m/s}^2$)的鞍部(重力异常值 $-55 \sim 51 \mu\text{m/s}^2$),显然该部位为构造上的局部拉张区,是控制铜石杂岩体和金矿床形成的区域地质因素,是金成矿的有利地段. 图 5 揭示了铜石杂岩体(重力异常值 $-339 \sim -11 \mu\text{m/s}^2$)以及围绕该岩体形成的环形接触交代带(重力异常值 $37 \sim 345 \mu\text{m/s}^2$),斑岩型金矿化位于岩体内部,矽卡岩型金矿化形成于接触带中,而隐爆角砾岩型和卡林型金矿化形成于接触交代带外围. 因此,铜石杂岩体和环形接触交代带

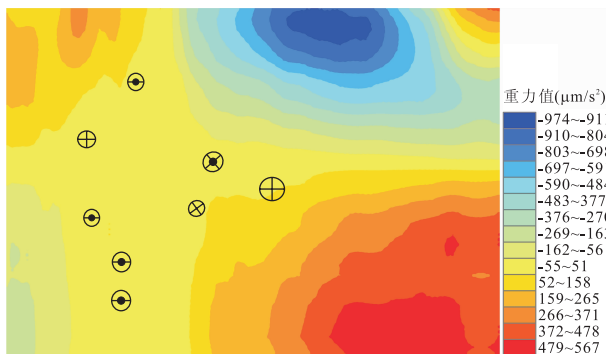


图 4 第 1、2 特征空间对应的重力图像(金矿床类型见图 1)

Fig. 4 Image corresponding to the 1st and 2nd eigenimages

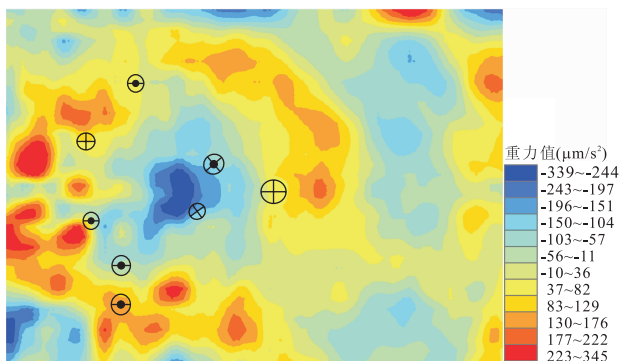


图 5 第 3 至第 8 特征空间所对应的重力图像(金矿床类型图例同图 1)

Fig. 5 Reconstructed image from the 3rd to 8th eigenimages

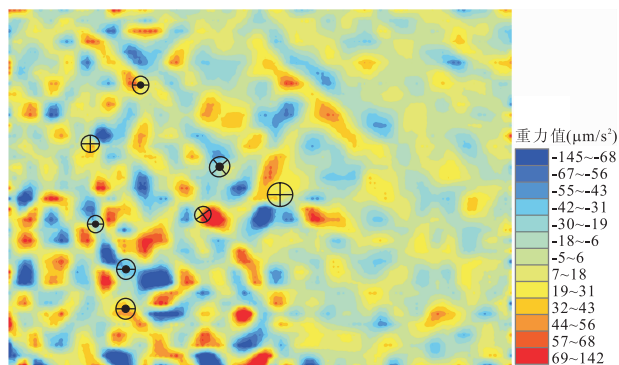


图 6 第 9 至第 35 特征空间所对应的重力图像(金矿床类型图例同图 1)

Fig. 6 Reconstructed image from the 9th to 35th eigenimages

是新的金矿床潜在地区. 图 6 进一步揭示所有类型金矿化均位于 NE 和 NW 向重力异常叠加区域, 表明金矿化受 NE 和 NW 向两组断裂的交汇域控制, 其交汇域是发现金矿床的有利地段. 上述研究表明铜石金矿田金矿化受控于多重控矿因素, 具有典型复杂性因素控矿特征.

3 结论

奇异性分析能够将具有复杂性特征的多重控矿因素有效分解, 本文在对鲁西铜石金矿田 1 : 5 万致矿重力异常分解的基础上, 依次提取不同特征的控矿因素. (1) 铜石金矿田位于平邑火山沉积盆地南西侧 NW 向基底隆起的鞍谷部位, 为区域构造上的局部拉张区, 是金成矿的有利地段. (2) 具有负重力异常特征的铜石杂岩体和围绕杂岩体形成具有正重力异常特征的环形接触交代带. 斑岩型金矿化位于岩体内部, 矽卡岩型金矿化形成于接触带中, 而隐爆角砾岩型和卡林型金矿化形成于接触交代带外围. (3) 所有矿化类型均位于 NE 和 NW 向重力异常带交汇域, 这些交汇域是寻找金矿床的远景地段.

References

- Cagnoli, B., Ulrych, T. J., 2001. Singular value decomposition and wavy reflections in ground-penetrating radar images of base surge deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 48(3): 175—182. doi: 10. 1016/S0926—9851(01)00089—1
- Chen, Y. Q., Liu, H. G., 2000. Delineation of potential mineral resources region based on geo-anomaly unit. *Journal of China University of Geosciences*, 11(2): 158—163.
- Chen, Y. Q., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2001. Application of the geo-anomaly unit concept in quantitative delineation and assessment of gold ore targets in western Shandong uplift terrain, eastern China. *Natural Resources Research*, 10(1): 35—49. doi: 10. 1023/A: 1011581414877
- Chen, Y. Q., Zhao, P. D., Liu, H. G., 2001. Accumulation and evolution of ore-forming composition of gold deposits in the western Shandong uplift terrain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(1): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1—2): 314—324.
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Math. Geosci.*, 40(5): 503—532.
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2009a. Application of singularity theory in prediction of tin and cop-

- per mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China; weak information extraction and mixing information decomposition, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2):232—242 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Zhang, S. Y., et al., 2009b. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China; information integration and delineation of mineral exploration targets, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2):243—252 (in Chinese with English abstract).
- Freire, S. L. M., Ulrych, T. J., 1988. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling, *Geophysics*, 53(6):778—785. doi:10.1190/1.1442513
- Glifford, G. D., 2005. Singular value decomposition & independent component analysis for blind source separation, HST582J/6. 555J/16. 456J, Biomedical signal and Image Processing, Spring 2005.
- Hu, H. B., Mao, J. W., Niu, S. Y., et al. 2005. Study on ore-forming fluids of the Guilaizhuang gold deposits in Pingyi, western Shangdong. *J. Mineral. Petrol.*, 25(1):38—44 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. M., 2005. GIS-based multifractal/inversion methods for feature extraction and applications in anomaly identification for mineral exploration(Ph. D. thesis). York University, Toronto, Canada. 211.
- Li, Q. M., Cheng, Q. M., 2004. Fractal singular value (Egin-value) decomposition method for geophysical and geochemical anomaly reconstruction, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1):109—118 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. M., Liu, S. H., 2003. Geophysical signal decomposition by singular method and application in GIS, *Process in Geophysics*, 18(1):97—102 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J. Q., Tan, D. J., Jin, Y., 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Mesozoic igneous activities in western Shandong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3):213—220 (in Chinese with English abstract).
- Vrabie, V. D., Mars, J. I., Lacoume, J. L., 2004. Modified singular value decomposition by means of independent component analysis, *Signal Processing*, 84(3):645—652.
- Wang, S. C., Liu, Y. Q., Yi, P. H., et al., 2003. Gold deposits and the synthetic information metallogenic prognosis in gold deposit concentrated area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yu, X. F., 2001. Ore-forming series and model of Tongshi gold field in Pingyi, Shangdong Province. *Shangdong Geology*, 17(3—4):59—64 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. P., Zhang, X. M., Li, S. Q., et al., 2000. The mineralization types of Tongshi district of secondary volcanic complex rock mass in Pingyi County and their geological feature of mineralization. *Gold*, 21(8):8—11 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈永清, 赵鹏大, 刘红光, 2001. 鲁西金矿成矿组分的聚集与演化. 地球科学——中国地质大学学报, 26(1):41—48.
- 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等, 2009a. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 34(2):232—242.
- 成秋明, 赵鹏大, 张生元, 等, 2009b. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 综合信息集成与靶区圈定. 地球科学——中国地质大学学报, 34(2):243—252.
- 胡华斌, 毛景文, 牛树银, 等, 2005. 鲁西平邑归来庄金矿床成矿流体研究. 矿物岩石, 25(1):38—44.
- 李庆谋, 成秋明, 2004. 分形奇异(特征)值分解方法与地球物理和地球化学异常重建. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1):109—118.
- 李庆谋, 刘少华, 2003. GIS环境下地球物理信号的奇异值分解、多维分形特征与应用. 地球物理学进展, 18(1):97—102.
- 林景仟, 谭东娟, 金烨, 1996. 鲁西地区中生代火成活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 岩石矿物学杂志, 15(3):213—220.
- 王世称, 刘玉强, 伊丕厚, 等, 2003. 山东省金矿床及金矿床密集区综合信息成矿预测. 北京: 地质出版社.
- 于学峰, 2001. 山东平邑铜石金矿田成矿系列及成矿模式. 山东地质, 17(3—4):59—64.
- 祝德平, 张晓梅, 李守全, 等, 2000. 平邑县铜石次火山杂岩体区金矿化类型及其成矿地质特征. 黄金, 21(8):8—11.