

奇异值分解技术及地球化学块体方法 在南黄岗—甘珠尔庙成矿带找矿中的应用

周 顶^{1,2} 陈永清¹ 赵彬彬³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;2. 武警黄金部队第六支队,河南 三门峡 472000;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要:以黄岗—甘珠尔庙成矿带南部1:20万化探扫面数据为基础,借助奇异值分解技术及地球化学块体方法,提取了该区地球化学综合异常及评价该区锡、锌矿的成矿潜力。通过研究得出如下结论:(1)不同方向构造的交汇部位、构造截切地球化学异常的部位或不同方向异常的叠加部位,是寻找钼、锡、钨、铜、铅、锌等矿床的有利地段;(2)区内多数矿床的赋存状态与二叠纪地层有密切的空间关系,特别是二叠纪地层与岩体的接触带或二叠纪地层与其他时代地层的接触带并发育断裂构造的部位;(3)研究区内共圈定了Sn地球化学块体1个,区域异常1个,局部异常8个;Zn地球化学亚块体1个,区域异常1个,局部异常7个。并以1 000 m作为块体厚度,计算了该区潜在锡资源量为211.92万t,潜在锌资源量为146.42万t;(4)通过对该区地球化学块体及异常结构的分析,并根据该区锡、锌矿的成矿条件来确定远景区的等级,本文共圈定了Sn成矿Ⅰ类远景区3个,Ⅱ类远景区4个,Ⅲ类远景区2个;Zn成矿Ⅰ类远景区3个,Ⅱ类远景区2个,Ⅲ类远景区2个。

关键词:奇异值分解;地球化学块体;黄岗—甘珠尔庙成矿带;远景区

中图分类号:P32;P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0621-17

由于地质成矿过程的长期性、复杂性、叠加性,记录该过程的数据集往往具有非平稳及非线性结构的特征^[1-7]。传统的数据处理方法,如地质统计学等,并不适用于处理非平稳、非线性的数据。奇异性普遍存在于非线性自然过程中,如地震、矿化、降雨等,而这些非线性过程可以用分形或多重分形来描述^[6]。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,该过程中所产生的结果如矿床、成矿异常等均具有分形或多重分形分布规律,可以采用幂率(power-law)函数来度量^[8]。基于奇异性原理,成秋明^[4,6,8]和李庆谋等^[7,9]发展了多重分形方法,称之为多重分形奇异值分解(multi-fractal

singular value decomposition, MSVD)。近年来,奇异值分解技术在提取与成矿有关的物化探异常信息方面有了广泛应用^[7, 10-13],并取得了较好的效果,为下一步找矿提供了参考依据。

然而,一个矿产的形成不仅与其成矿的环境有关,还与成矿所需的物质供应情况有重要关系。在通过各种手段对异常区域进行研究之后,如何圈定成矿远景区,如何对各远景区的资源潜力进行评价?谢学锦院士在中国区域化探扫面数据的基础上提出了利用化探扫面数据圈定地球化学块体方法,并通过块体内已探明的矿产资源量等信息确定该区某类矿床的成矿率,根据成矿率预测快体内资

收稿日期:2013-06-25;改回日期:2013-10-16

基金项目:国家自然科学基金“超大型矿床成矿复杂性特征与成矿动力学机制探索”(41272365)和“数据挖掘与找矿靶区资源潜力模拟非线性技术研究”(40972232)联合资助。

作者简介:周顶,男,1987年生,硕士生,矿产普查与勘探专业;E-mail:zhoudingcugb@126.com。

通讯作者:陈永清,男,1960年生,博士,教授,博士生导师,主要从事矿产资源定量勘查与评价研究及教学工作;E-mail:cugb_yqchen@126.com。

源潜力情况^[14-15]。目前,地球化学块体方法在资源潜力预测等方面应用较广泛^[16-21],且具有重要意义。

本文主要以黄岗—甘珠尔庙成矿带南部1:20万化探扫面数据为例,利用奇异值分解技术,实现地球化学数据的分离,从而揭示成矿与各地质要素之间的空间关系。并根据奇异值分解技术的应用成果,利用地球化学块体方法圈定与评价远景区,为下步优选远景区及找矿工作提供科学依据。

1 奇异值分解的原理

奇异值分解可以将矩阵分解为一系列的特征值空间,而得到的特征值表现为分形或多重分形的特征,因此该方法可用于特征图像的提取和矿产勘查中致矿异常的识别^[9]。奇异值分解可以将矩阵 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:

$$X = USV^T \quad (1)$$

其中对角矩阵 S 为奇异值矩阵,存储的即为矩阵 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 XX^T 或 $X^T X$ 特征值(λ)的正平方根。即:

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

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

奇异值分解也可表示为如下形式:

$$X = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (3)$$

其中 u_i 是 XX^T 的第 i 个特征向量, v_i 是 $X^T X$ 的第 i 个特征向量, σ_i 是 X 的第 i 个特征值, $u_i v_i^T$ 为 $m \times n$ 矩阵,是矩阵 X 的第 i 个特征空间。

基于奇异值的以下性质:奇异值的分布按主对角线呈降序排列;奇异值 σ_i 代表了矩阵 X 投射到相应的特征空间 $u_i v_i^T$ 的系数;奇异值的平方与 Fourier 空间中的能谱密度值一致^[9]。结合公式(3),认为前几个奇异值所对应的特征空间就包含了矩阵 X 的绝大部分能量,而每个特征空间所对应的能量百分比 P_i 的计算公式如下^[9, 22]:

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

2 地质背景

黄岗—甘珠尔庙多金属成矿带位于内蒙古东南部,属于古亚洲成矿域内蒙古—大兴安岭成矿省大兴安岭南段多金属成矿带的一部分,是大兴安岭地区重要的锡、铅锌(铜)多金属成矿带。目前,在该成矿带及其邻区已发现的铜、锡、钼等多金属矿床有黄岗梁锡铁矿床、大井铜锡多金属矿床、莫古吐锡矿床及查木罕钨钼矿床等;铅锌银多金属矿床有拜仁达坝、好来哈达、白音查干等。该成矿带上矿床的分布明显受区域构造—岩浆作用控制,在空间上往往成群或成带分布^[23-25]。

该成矿带南部出露的地层有古元古界、志留系、二叠系、三叠系、侏罗系等(图1),二叠系、侏罗系是本区最主要的地层,分布广泛,且已知金属矿床的空间分布与二者关系密切。该区自古生代到中生代经历过古亚洲构造—成矿域与环太平洋构造—成矿域的转换和强烈叠加^[26-29],各期次岩浆岩较发育,且以中酸性侵入岩为主,多受断裂构造控制。区内构造较复杂,断裂构造以NE向、NW向及近EW向为主,褶皱构造以NE向的背斜、向斜为主;深大断裂有黄岗梁—甘珠尔庙大断裂、新林镇—天山断裂,控制了该区的构造—岩浆格局。

在古生代时期,该区处于华北板块北缘造山带—兴蒙造山带构造环境^[30],以挤压应力体制下的构造—岩浆活动为主,初步形成了以EW向、NE向的压扭性断裂构造及碰撞造山型岩浆岩为主的构造—岩浆体系^[31-32]。从中侏罗世到早白垩世则进入了伸展构造体制^[26-27, 33],该区伸展造山过程具有明显的阶段演化性,演化阶段发生了大规模的火山喷发和岩浆侵位活动,并在晚侏罗世—早白垩世早期构造—岩浆作用最为强烈,形成了以NE、NW向张性断裂^[34]及与拉张环境有关的A型花岗岩^[35-36]为主的构造—岩浆体系。另外,伸展构造作用对早期的构造进行叠加改造,为成矿元素的活化、再富集提供了热源、矿源及赋矿空间,从而形成了该区构造—岩浆—成矿作用为一体的耦合体系,造就了本区优越的成矿地质条件,具有较好的找矿前景。

论文研究所用的1:20万水系沉积物的测量结果来源于《区域化探全国扫面计划》(RGNR)的部分成果,研究区控制面积约13 120 km²。前人^[34, 37-38]研

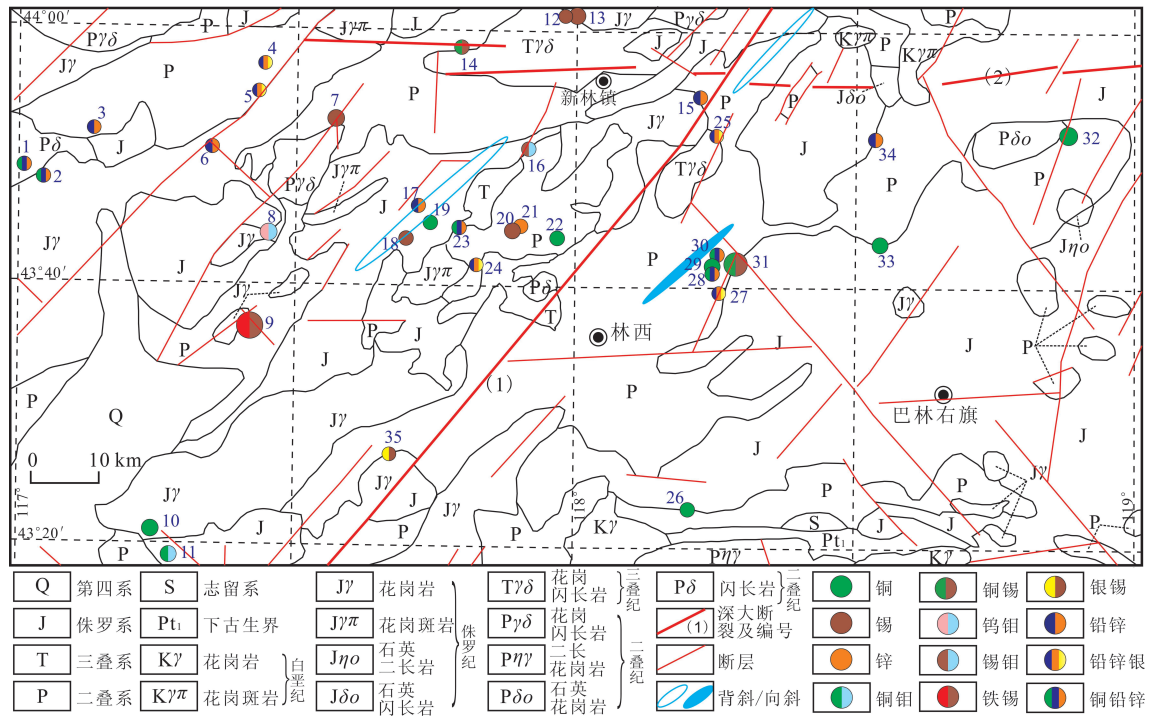


图1 赤峰北部地质简图^①

深大断裂:(1)—黄岗梁—甘珠尔庙大断裂;(2)—新林镇—天山大断裂;

矿床(点)编号及名称:1—敖包山铜铅锌多金属矿床;2—哈尔楚鲁图铜铅锌多金属矿床;3—白音查干铅锌矿床;4—乌尼克吐铅锌银矿点;5—好来哈达铅锌银矿点;6—乌勒格尔吉达坂铅锌矿床;7—安乐锡多金属矿床;8—查木罕钨钼矿床;9—黄岗梁铁锡矿床;10—转心湖铜矿床;11—永胜铜钼矿床;12—郭家营子锡矿床;13—宝盖沟锡矿床;14—天合园铜锡矿点;15—五十家子铅锌矿床;16—曹家屯锡钼矿床;17—敖包吐沟脑铅锌矿床;18—白音皋锡矿床;19—贾营子铜矿床;20—莫古吐锡矿床;21—大莫古吐锌矿床;22—富林铜矿点;23—黄土梁铜铅锌矿床;24—哈达吐铅锌银矿床;25—龙头山铅锌银矿床;26—水泉沟铜矿床;27—三道西村铅锌银矿床;28—大石山铜铅锌矿点;29—富源铜矿床;30—徐家营子铜铅锌矿点;31—大井铜锡矿床;32—敖尔盖铜多金属矿床;33—塔本沟铜矿床;34—雅马吐铅锌矿床;35—账房沟银锡矿床

Fig.1 Simplified geological map of northern Chifeng, Inner Mongolia

Deep faults: (1)—Huanggangliang—Ganzhu'er miao deep fault; (2)—Xinlin Town—Tianshan deep fault

Ore deposits (spots) No. and name: 1—Aobaoshan Cu—Pb—Zn polymetallic deposit; 2—Ha'erchulutu Cu—Pb—Zn polymetallic deposit; 3—Baiyinchagan Pb—Zn deposit; 4—Wuniketu Pb—Zn—Ag ore spot; 5—Haolaihada Pb—Zn—Ag ore spot; 6—Wulege'erjidaban Pb—Zn deposit; 7—Anle Sn polymetallic deposit; 8—Chamuhan W—Mo deposit; 9—Huanggangliang Fe—Sn deposit; 10—Zhuaxinxinhu Cu deposit; 11—Yongsheng Cu—Mo deposit; 12—Guojiayingzi Sn deposit; 13—Baogaigou Sn deposit; 14—Tianheyuan Cu—Sn ore spot; 15—Wushijiazhi Pb—Zn deposit; 16—Caojiatun Sn—Mo deposit; 17—Aobaotugouao Pb—Zn deposit; 18—Baiyingao Sn deposit; 19—Jiayingzi Cu deposit; 20—Mogutu Sn deposit; 21—Damogutu Zn deposit; 22—Fulin Cu deposit; 23—Huangtuliang Cu—Pb—Zn deposit; 24—Hadatu Pb—Zn—Ag deposit; 25—Longtoushan Pb—Zn—Ag deposit; 26—Shuiquangou Cu deposit; 27—Sandaoxicun Pb—Zn—Ag deposit; 28—Dashishan Cu—Pb—Zn ore spot; 29—Fuyuan Cu deposit; 30—Xujiayingzi Cu—Pb—Zn ore spot; 31—Dajing Cu—Sn deposit; 32—Ao'ergai Cu polymetallic deposit; 33—Tabengou Cu deposit; 34—Yamatu Pb—Zn deposit; 35—Zhangfangou Ag—Sn deposit

究结果表明,研究区构造-岩浆活动及成矿作用均表现了多期多阶段性及叠加性的特点。必须应用MSVD分解技术提取致矿异常信息,并结合矿化信息等约束条件,获取目标找矿信息,为下步找矿工作提供依据。

3 地球化学异常提取

本文选取Ag、As、Au、Bi、Cu、Hg、Mo、Pb、Sb、Sn、W、Zn等元素的含量进行处理。首先,进行因子分析,确定元素的共生组合特征,然后借助于奇异

①内蒙古自治区地质矿产勘查开发院编制. 1:500 000《赤峰市矿产资源分布图》. 2001.

值分解(SVD)技术对因子得分进行处理,分解地球化学综合异常。

本文采用R型因子分析对元素的组合特征进行研究。为检验这批数据是否适合进行因子分析,首先对其进行KMO和Bartlett's球度检验,KMO检验值越接近于1,意味着变量间的相关性越强,越适合做因子分析,且各因子具有代表性;其值越接近于0,变量间相关性越弱,越不适合做因子分析。一般KMO检验值<0.60则认为不太适合做因子分析。由表1可知KMO检验值为0.85,大于0.60,认为适合于因子分析。Bartlett's球度检验给出的相伴概率Sig为0.00,小于显著性水平0.05,因此拒绝Bartlett's球度检验的零假设,认为这批数据存在一定的相关性,适合进行因子分析(表1)。

从表2中可以看出,前四个主因子的累计方差贡献达到66.36%,可认为这四个因子已经包含了原

始变量的大部分信息。初始因子载荷中各因子载荷的分异度不高,特征表现不明显。经正交旋转后,因子载荷的分异变得相对清晰:F1为As-Bi-Mo-Sn-W因子组合;F2为Ag-Cu-Pb-Sb-Zn组合;F3为Hg;F4为Au。

从因子分析的元素组合来看,F1为As-Bi-Mo-Sn-W因子组合,以高温元素组合为主,表明该区可能存在钨锡钼矿化(如黄岗梁铁锡矿床、查木罕钨钼矿床等)。F2为Ag-Cu-Pb-Sb-Zn因子组合,以中温元素组合为主,反映了该区的铜铅锌银矿化的存在(如敖包吐沟脑铅锌矿床、黄土梁铜铅矿床、哈达吐铅锌银矿床、大井铜锡矿床等)。结合前人对该区成矿规律的研究,本文重点对F1和F2因子的因子得分进行奇异值分解,以获取研究区Mo-Sn-W及Ag-Cu-Pb-Zn矿化信息。

由图2~3可知,F1、F2因子得分异常多分布在黄岗—甘珠尔庙深断裂与新林镇—天山深断裂交汇部位的西南部,总体呈NE向展布,少数呈NW向展布;部分异常严格受断裂构造控制,呈NE向带状分布。推测该区As-Bi-Mo-Sn-W(F1)、Ag-Cu-Pb-Sb-Zn(F2)异常的分布主要与区域性的黄岗—甘珠尔庙深断裂、新林镇—天山深断裂及与之有关的构造-岩浆活动有关。

下面对F1、F2因子的得分数据进行奇异值分解。

Freir等^[22]定义了低通 X_{LP} ,带通 X_{BP} 和高通 X_{HP} SVD图像。其形式如下:

$$X_{LP} = \sum_{i=1}^{p-1} \sigma_i u_i v_i^T \quad (5)$$

$$X_{BP} = \sum_{i=p}^{q-1} \sigma_i u_i v_i^T \quad (6)$$

$$X_{HP} = \sum_{i=q}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (7)$$

其中 p, q 为分割点, r 为特征空间个数。 p, q 的选择取决于奇异值本身,本文将用多重分形的方法来确定 p, q 的值。对于矩阵 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)^[7,9]为:

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

能量所占百分比为:

表1 KMO及Bartlett's检验结果

Table 1 Results of KMO and Bartlett's test

取样足够度的KMO度量	Bartlett's球度检验		
	近似卡方分布	df	Sig.
0.85	13860.45	66.00	0.00

注:近似卡方分布为:近似服从 $N(n, 2n)$ 分布, n 为卡方分布的自由度 df ; df 为自由度; Sig.为相伴概率。

表2 各元素旋转因子载荷表

Table 2 Factor loading of each element

成分	旋转因子组合			
	F1	F2	F3	F4
Ag	0.318	0.741	-0.069	0.012
As	0.697	0.390	0.181	0.192
Au	0.074	-0.036	-0.029	0.880
Bi	0.757	0.106	-0.100	0.137
Cu	-0.051	0.487	0.417	0.427
Hg	-0.036	-0.071	0.873	-0.045
Mo	0.629	0.150	0.260	-0.208
Pb	0.267	0.799	-0.088	-0.132
Sb	0.376	0.483	0.439	0.273
Sn	0.648	0.284	-0.131	0.013
W	0.798	0.201	-0.008	0.018
Zn	0.230	0.819	0.120	0.072
累计方差贡献/%	24.045	46.046	56.739	66.364

注:以特征值 $\lambda > 0.9$ 为选取因子个数的标准。

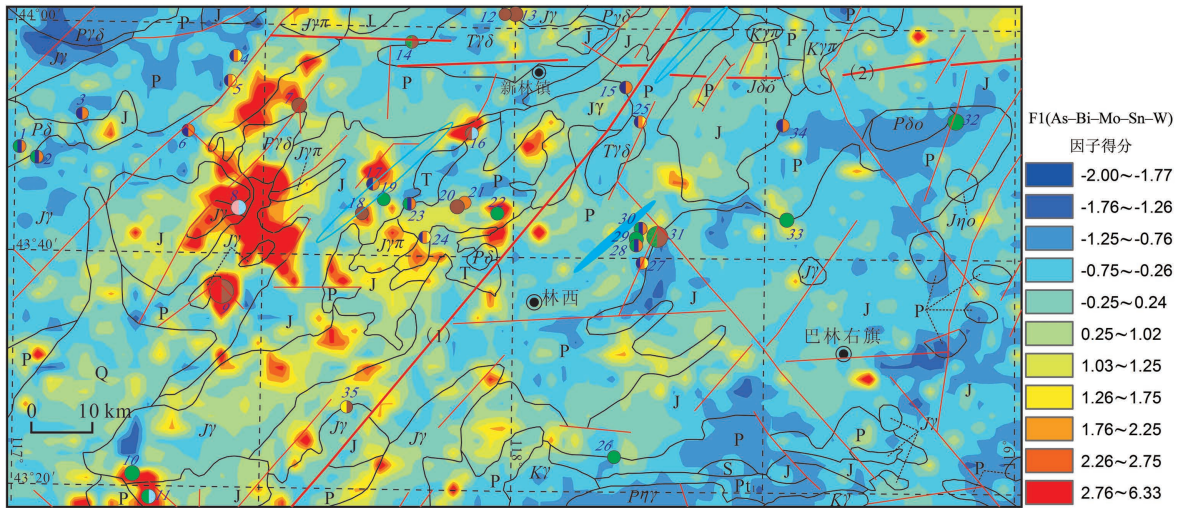


图2 F1(As-Bi-Mo-Sn-W)因子得分原始数据图像
Fig.2 Original factor score data image of F1 factor

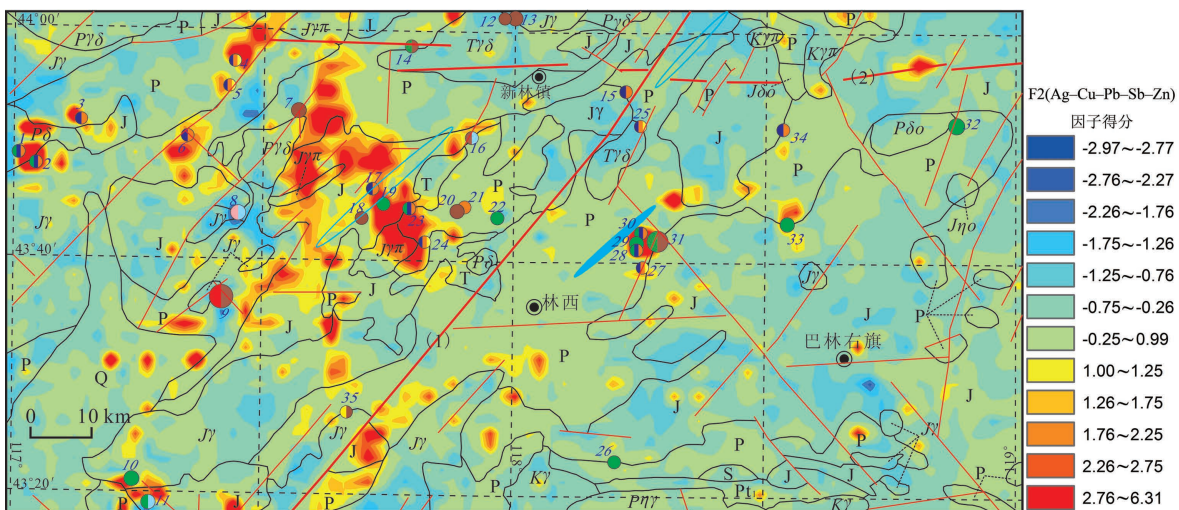


图3 F2(Ag-Cu-Pb-Sb-Zn)因子得分原始数据图像
Fig.3 Original factor score data image of F2 factor

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

即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则具有分形规律,而 λ 与 E (或者 P) 之间就存在分形规律^[7,9,39],即:

$$E \propto \lambda^\alpha \quad (10)$$

或

$$P(\lambda|\lambda \geq \lambda_i) \propto \lambda^\alpha \quad (11)$$

其中 α 为分维数,在双对数图中,表示为拟合直线的斜率。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,基于最小二乘法中“直线拟合偏差的加权平方和为最小”的原则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4和图5为F1、F2因子得分数据相应的 λ - E 双对数图,横轴为奇异值平方的自然对数 $\ln(\lambda_i)$,纵轴为特征空间能量 $E(\lambda|\lambda>\lambda_i)$ 的自然对数。

F1因子得分的双对数图中,分别以 $p=4, q=15$ 为分割点。其右侧段由 $\lambda_1\sim\lambda_3$ 组成,占总能量的56.0%,能够代表因子得分原始数据的大部分信息,而由其重构的F1因子得分图像与原始数据图像近一致,能反映区域控矿因素;中间段由 $\lambda_4\sim\lambda_{14}$ 组成,占总能量的31.0%,由其重构的因子得分图像(图6)往往反映局部控矿因素;左侧段由 $\lambda_{15}\sim\lambda_{41}$ 组成,所占能量一般较少(约占总能量的13.0%,可能代表噪声部分,本文不做分析),可忽略不计。同样,F2因子得分的双对数图中,分别以 $p=5, q=16$ 为分割点。其右侧段由 $\lambda_1\sim\lambda_4$ 组成,占总能量的60.3%;中间段由 $\lambda_5\sim\lambda_{15}$ 组成,占总能量的29.5%,由其重构的因子得分图像(图7)亦能反映局部控矿因素;左侧段由 $\lambda_{16}\sim\lambda_{41}$ 组成,约占总能量的10.2%,可忽略不计。

从图6中可以看出,锡矿床(点)的分布多受NE向或NW向的断裂构造控制,局部具有等间距线性分布的特点(如黄岗梁铁锡矿床—白音皋锡矿床—曹家屯锡钼矿床、安乐锡多金属矿床—天合园铜锡矿点—宝盖沟锡矿床)。其中,安乐锡矿分布在NE向及近SN向断裂的交汇部位,该处发育近SN向、NE向的异常,且被断裂所截,推测这主要与安乐锡矿区内NE向的控矿断裂及近SN向的容矿断裂有关^[40]。黄岗梁铁锡多金属矿床分布在侏罗系花岗岩与二叠纪地层接触带部位的弧形异常内,且该异常

被NE向、NW向断裂所截,这与该矿床属于受燕山早期花岗岩与二叠纪地层的接触带控制的矽卡岩型矿床^[41-42]的结果相吻合。大井铜锡多金属矿床分布在NE向与NW向断裂的交汇部位,具有明显的构造控矿特点,这与该区内发育的NW、NE向的容矿断裂有关^[43]。查木罕钨钼矿床则分布在NE向异常与近SN向异常的叠加部位,且与燕山期的花岗岩有密切的空间关系,表明该岩体为查木罕钨钼矿床的控矿因素(赋矿围岩^[44])。永胜铜钼矿床分布在NW向断裂与近SN向异常交汇的部位,而曹家屯锡钼矿床则分布在NE向断裂与近等轴状异常的交汇部位。

从图7可以看出,铜、铅、锌等多金属矿床的分布亦多受二叠纪地层、岩体及断裂构造等多重地质因素共同控制。如大井铜锡多金属矿床、敖尔盖铜矿床、乌尼克吐铅锌银矿点、好来哈达铅锌银矿点等多分布在二叠纪地层与岩体的接触带或二叠纪地层与其他时代地层(如侏罗系地层)的接触带并发育断裂构造的部位;部分铜、铅、锌等多金属矿床则分布在不同时代岩体的接触带附近,如敖包山铜铅锌多金属矿床、哈尔楚鲁图铜铅锌多金属矿床、龙头山铅锌银矿床等。另外,在不同方向异常的叠加部位或者不同方向的构造与异常的交汇部位亦是寻找铜、铅、锌等矿床的有利部位,如转心湖铜矿床、永胜铜钼矿床、敖包吐沟脑铅锌矿床、贾营子铜矿床等。

由此可知,该区钨、锡、钼等多金属矿床及铜、铅、锌、银多金属矿床的分布具有受岩体、断裂(或褶皱)构造及(或)二叠纪地层等多重地质因素控制的特点。在不同方向构造的交汇部位、不同方向的

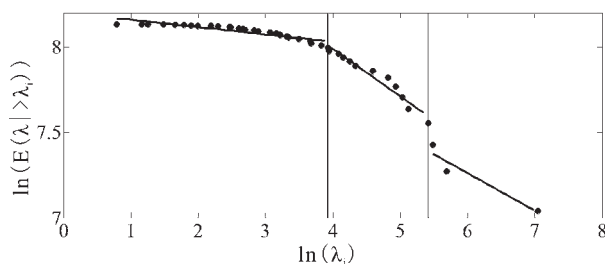


图4 F1因子得分的 $\ln(\lambda)$ - $\ln(E)$ 对数图
(使用最小二乘法拟合3条具有不同斜率的线段,
分割点 $p=4, q=15$)

Fig.4 $\ln(\lambda)$ versus $\ln(E)$ plot of F1 factor score with
two break points, $p=4, q=15$

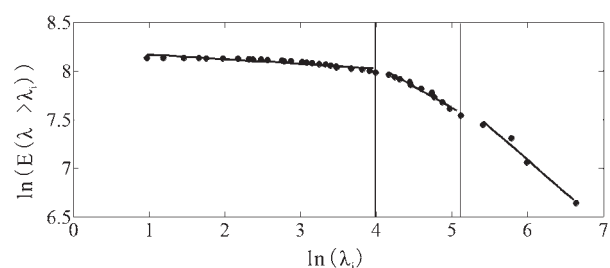


图5 F2因子得分的 $\ln(\lambda)$ - $\ln(E)$ 对数图
(使用最小二乘法拟合3条具有不同斜率的线段,
分割点 $p=5, q=16$)

Fig.5 $\ln(\lambda)$ versus $\ln(E)$ plot of F2 factor score with
two break points, $p=5, q=16$

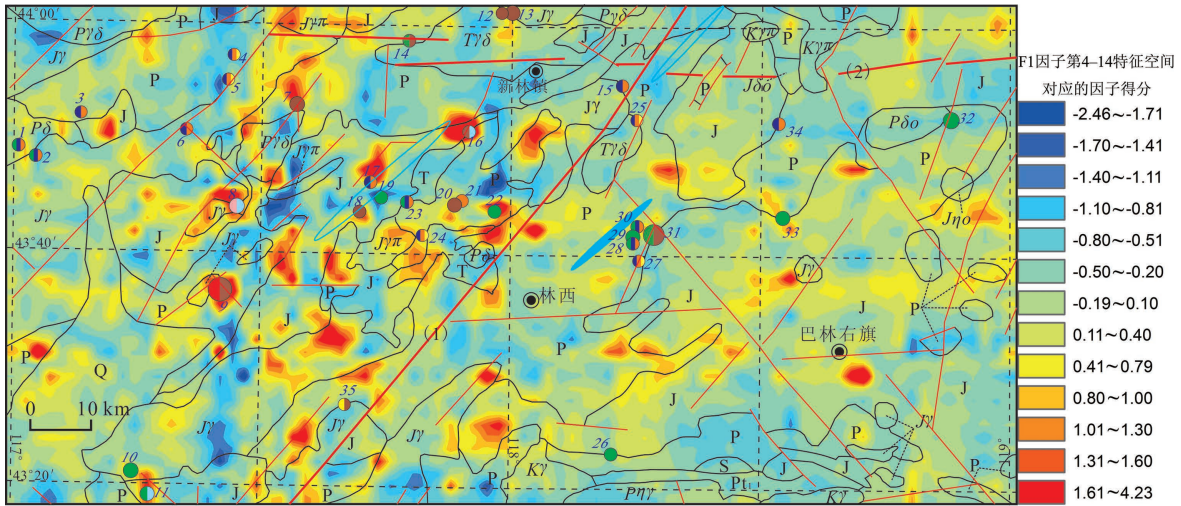


图6 F1(As-Bi-Mo-Sn-W)因子第4—14特征空间对应的因子得分图像
 Fig.6 Reconstructed image of F1 factor score from 4th to 14th eigenspace

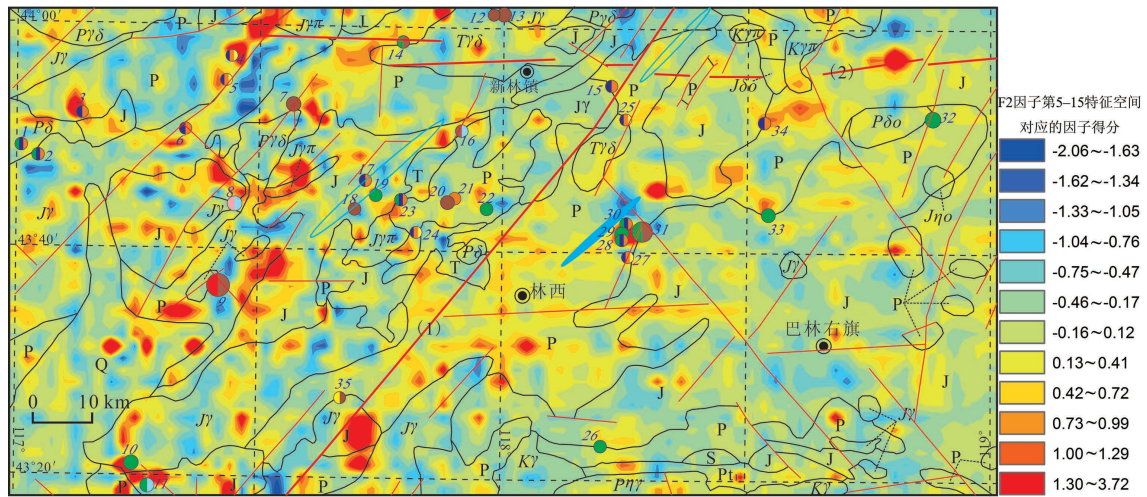


图7 F2(Ag-Cu-Pb-Sb-Zn)因子第5—15特征空间对应的因子得分图像
 Fig.7 Reconstructed image of F2 factor score from 5th to 15th eigenspace.

构造与异常的交汇部位、不同方向异常的叠加部位,是寻找Mo、Sn、W、Cu、Pb、Zn、Ag等矿床的有利地段,尤其是热液型矿床;二叠纪地层与岩体的接触带或二叠纪地层与其他时代地层的接触带并发育断裂构造的部位,亦是寻找Mo、Sn、W、Cu、Pb、Zn、Ag等矿床的有利地段,尤其是矽卡岩型矿床或者接触交代型矿床(如黄岗梁铁锡矿床、哈达吐铅锌银矿床)。

对比F1、F2因子得分原始数据图(图2~3),经过奇异值分解技术提取后的地球化学异常图(图6~7)与已知矿床(点)、断裂构造、地质体等地质要素

的空间对应关系更加明显,更具有规律性,能够很好地指导下一步找矿工作。因此,借助奇异值分解技术提取地球化学异常,有助于提取与成矿有关的矿化信息,为下一步圈定及优选成矿远景区、提高找矿效率等提供参考依据。

4 地球化学块体的圈定与分布

由图2~3可知,As-Bi-Mo-Sn-W、Ag-Cu-Pb-Sb-Zn综合异常多分布在黄岗—甘珠尔庙深断裂以西。该处在区域上位于大兴安岭南段的主脊部位,以产锡、铅、锌矿等为主,是中国北方唯一

的大型锡矿集中区^[32]。因此,本文以研究区内1:20万化探扫面数据为基础,在谢学锦院士^[4]提出的地球化学块体成矿理论模式谱系指导下,主要对F1、F2因子中的Sn、Zn元素地球化学块体进行系统的研究。

4.1 地球化学块体下限的确定及分级

地球化学块体下限的确定对于地球化学块体的圈定具有重要作用。通常对研究数据进行统计计算,迭代剔除离群点,然后利用平均值加1.5倍的标准差作为Sn元素块体的下限,用 $0.1 \times \lg x$ (x 为分析值)作为逐步提高的块体分级值,并借助MapGis绘图软件勾绘出块体的二维分布图及地球化学块体的圈定和金属量的计算。经统计计算,获得Sn地球化学块体下限约为 4.5×10^{-6} ,其余块体分级值依次为 5.6×10^{-6} 、 7.1×10^{-6} 、 8.9×10^{-6} 、 11.2×10^{-6} 、 14.1×10^{-6} ; Zn地球化学块体下限为 100×10^{-6} ,其余块体分级值依次为 125×10^{-6} 、 157×10^{-6} 、 197×10^{-6} 、 248×10^{-6} 、 312×10^{-6} 。考虑到奇高值的不稳定性和单个样品点可能带来的异常畸变,本文将低于3个采样点的地球化学异常($< 12 \text{ km}^2$)放弃。近年来,许多典型矿床的勘探深度已逾1 000 m,如研究区附近的花敖包特铅锌银多金属矿床的钻孔内Bi、Mo、Sn、W、Ag、Cu、Pb、Zn等元素在地下700多米以下仍有异常,并向下延伸,且异常强度、规模可观^[45]。因此,本文在研究该区地球化学块体的过程中,块体的厚度采用1 000 m,并对块体内潜在资源量进行预测。

4.2 地球化学块体特征

根据地球化学块体理论,将研究区内面积大于1 000 km²地球化学区定义为地球化学块体,面积在100~1 000 km²的地球化学区定义为区域异常,面积 $< 100 \text{ km}^2$ 的地球化学区定义为局部异常。区内共圈定了Sn地球化学块体1个,区域异常1个,局部异常8个;Zn地球化学亚块体1个,区域异常1个,局部异常7个(表3~4)。为了追索研究区内地球化学块体浓集的趋势,依据前人所建立的编码系统^[46],将I级块体编号定为1、2、……,II级子块体编号为1-1、1-2、……,III级子块体编号为11-1、11-2、……等。Sn、Zn地球化学(亚)块体及异常的内部结构如图8、图9所示。

地球化学块体及异常多分布在NE向黄岗—甘珠尔庙深断裂西部,以NE向带状分布为主,少数呈NW向带状分布及近椭圆状分布,局部可见NE向异常与NW向异常叠加,呈树枝状。该区Sn、Zn异常总体受NE向黄岗—甘珠尔庙深断裂控制,且其形态、空间分布位置均分别与F1、F2因子得分原始数据图相对应;同时,也反映出因子分析的结果具有代表性。其中,1号Sn地球化学块体面积可达2 368.03 km²,平均值为 19.34×10^{-6} ,当下限值从 4.5×10^{-6} 提高至 5.6×10^{-6} 时,可分解出1个子块体(编号为1-1),1个区域异常(编号1-2),6个局部异常(编号1-3~编号1-8);随着下限值的提升,异常继续浓缩分解,层次特征明显,结构复杂(图10),可圈定出6

表3 Sn地球化学块体及地球化学异常的资源潜力

Table 3 Resource potential of Sn geochemical blocks and geochemical anomalies

编号	面积 /km ²	块体平均 品位/ 10^{-6}	1 km 厚度岩块内 可供应金属量/万 t	浓集度单位面积内 金属供应量/(万 t/km ²)	已探明 储量/万 t	成矿率 /%	代表性 矿床	潜在资源量 /万 t
1	2 368.03	19.34	8 438.58	3.56	47.38	0.56	黄岗梁, 等	175.40
2	79.22	36.95	539.49	6.81			永胜	14.24
3	171.44	10.22	322.87	1.88				8.52
4	65.68	21.35	258.47	3.94	1.17	0.45	宝盖沟, 等	5.65
5	23.58	22.45	97.56	4.14	2.58	2.64	大井, 等	
6	39.57	9.03	65.84	1.66				1.74
7	21.31	9.70	38.10	1.79			曹家屯	1.01
8	31.98	10.88	64.14	2.01				1.69
9	29.08	8.98	48.15	1.66				1.27
10	50.15	9.80	90.61	1.81				2.39
总计	2 880.04		9 963.80		51.13			211.92

表4 Zn地球化学块体及地球化学异常的资源潜力
Table 4 Resource potential of Zn geochemical blocks and geochemical anomalies

编号	面积 /km ²	块体平均品位/10 ⁻⁶	1km 厚度岩块内 可供应金属量/万 t	浓集度单位面积内 金属供应量/(万 t/km ²)	已探明 储量/万 t	成矿率 /%	代表性 矿床	潜在 资源量/万 t
1	867.07	205.50	41 791.04	48.20	24.94	0.06	黄土梁, 等	100.43
2	75.16	201.79	3 557.27	47.33			乌尼克吐, 等	10.67
3	44.57	192.66	2 014.02	45.19				6.04
4	111.88	151.31	3 970.41	35.49				11.91
5	47.18	307.11	3 398.48	72.03	7.3	0.21	徐家营子, 等	2.90
6	71.46	136.60	2 289.50	32.04	2.05	0.09	乌勒格尔吉达坂	4.82
7	32.48	146.24	1 114.10	34.30				3.34
8	17.57	542.61	2 236.08	127.27	6.74	0.30	敖包山, 等	
9	34.62	258.67	2 100.39	60.67			白音查干	6.30
总计	1 301.99		62 471.29		41.03			146.42

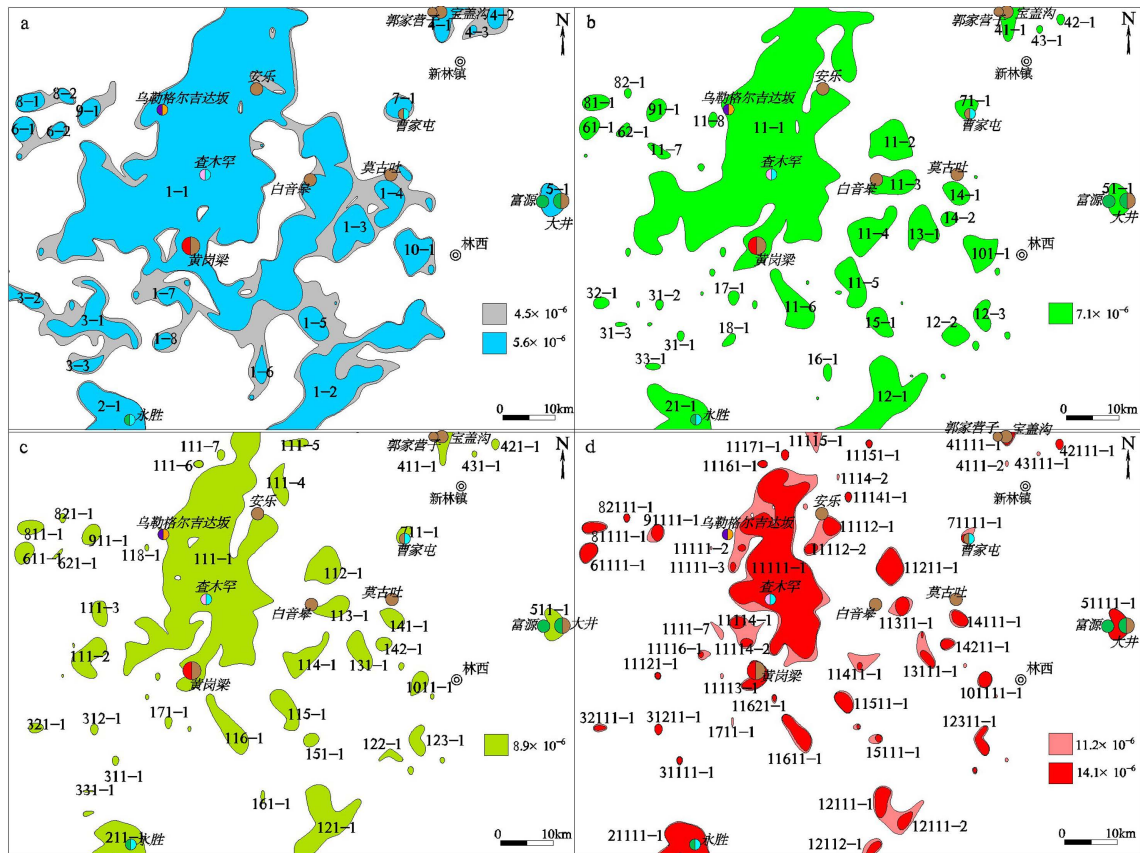


图8 Sn元素地球化学块体分布图
Fig.8 The distribution of geochemical blocks of Sn

个等级的异常。目前,该块体内分布的已知锡矿床(点)有黄岗梁、安乐、莫古吐、白音皋等。1号Zn地球化学亚块体面积达867.07 km²,平均值为205.50×10⁻⁶,1 000 m厚度岩块内可提供Zn金属量

约41 791.04万t;随着下限值的提升,异常继续浓缩分解,层次特征明显(图11),可圈定出6个等级的异常。目前,该块体内分布的已知(伴生)锌矿床(点)有黄岗梁、黄土梁、哈达吐等。

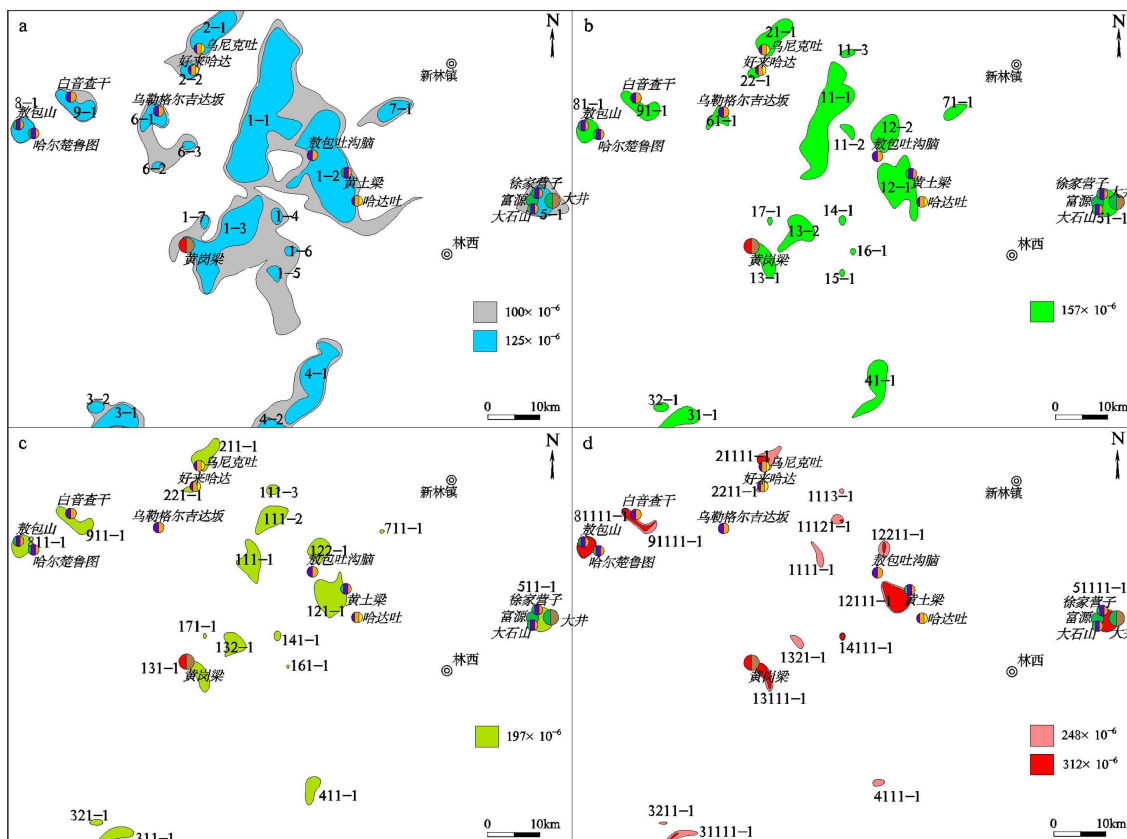


图9 Zn元素地球化学块体分布图
Fig.9 The distribution of geochemical blocks of Zn

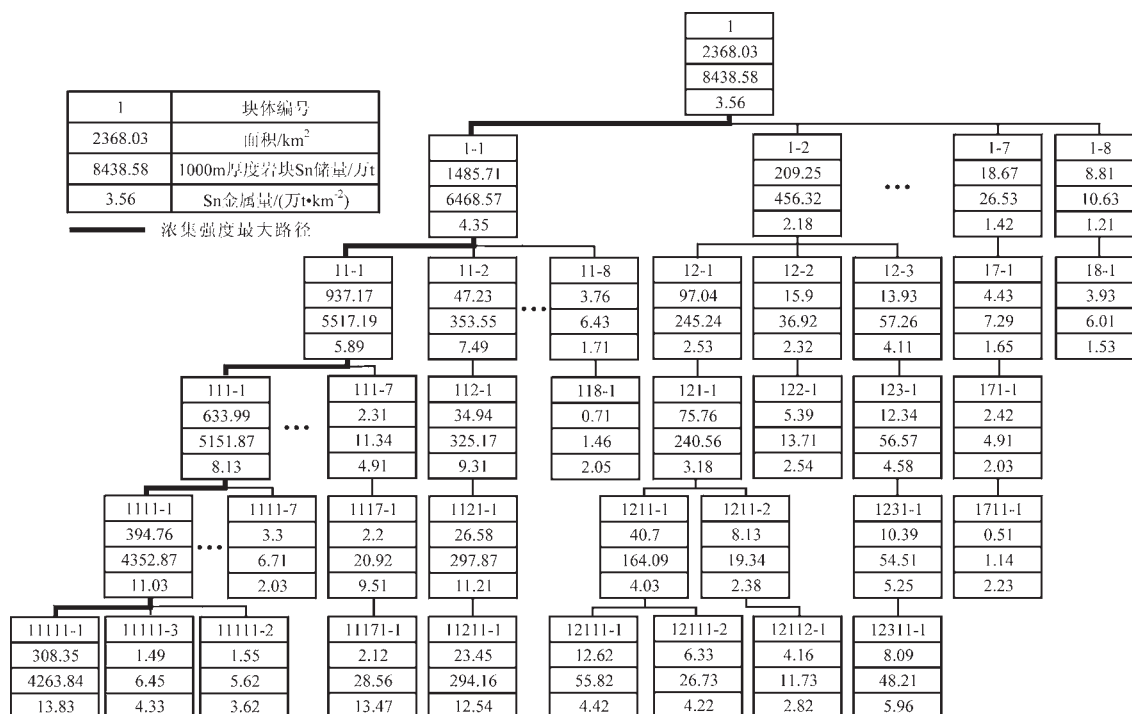


图10 1号块体Sn地球化学谱系图
Fig.10 Phenogram of No. 1 Sn geochemical block

由Sn地球化学块体谱系图(图10)可以看出,沿主要浓集线路可追踪到11111-1号Sn地球化学子块体,目前该子块体内仅包含查木罕等矿床,说明该块体还具有很大的找矿潜力。Zn地球化学亚块体谱系图(图11)中,沿主要浓集路线可追踪到12111-1号Zn地球化学子块体。目前该子块体附近仅分布有黄土梁多金属矿床,且该矿床分布在该子块体外侧,亦说明Zn的找矿潜力较大。

4.3 成矿率的确定

成矿率的确定通常是假定在当前该区域所形成的所有矿产都已经勘探,那么这种矿产的所有探明储量与金属供应量的比值即为该种金属的成矿率(Mc)。具体计算方法^[47-48]为 $Mc=R/Me$ 。其中:R为该区域某种金属的所有探明储量;Me为该区域内块体或子块体该金属的金属供应量,用如下公式计算: $Me=S \times \rho \times Cm \times Dh$ 。公式中:S为化学块体面积, ρ 为区内岩石密度(假设 $2.58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),Cm为平均品位,Dh为块体厚度(本文用1 000 m厚度来计算地球化学块体金属供应量)。

考虑岩石中元素含量在转化成水系沉积物过程中多数元素在水系沉积物呈现次生富集状态^[49-50],

需要有一个校正系数来还原。不同大地构造单元及不同景观条件的差异,统一元素的校正系数往往有少许差异,本文用内蒙-吉黑地区的校正系数(Sn:1.4,Zn:1.1)^[49]将Sn、Zn水系沉积物含量校正到岩石的含量。获得的块体及异常内的金属供应量如表3~4所示。

成矿率的计算受研究区内块体或异常范围内的工作程度及已探明的储量影响。在该区1号Sn地球化学块体的成矿率为 $Mc=47.38 \text{ 万 t} / 8 \text{ 438.58 万 t} = 0.56\%$;而5号局部异常区内工作程度较高,分布有大井、富源等铜多金属矿床,其成矿率Mc为2.64%。根据各块体或异常的浓集强度及成矿地质条件对比,本文用5号异常的成矿率预测研究区内潜在Sn资源量为211.92万t。针对区内潜在的Zn资源量用8号异常的成矿率(0.30%)进行估算,获得的Zn潜在资源量为146.42万t。

4.4 成矿远景区的确定

结合奇异值分解技术在该区的应用结果以及对研究区内典型矿床的研究,可以得出成矿条件如下:

- (1)研究区内NE向的黄岗-甘珠尔庙深断裂

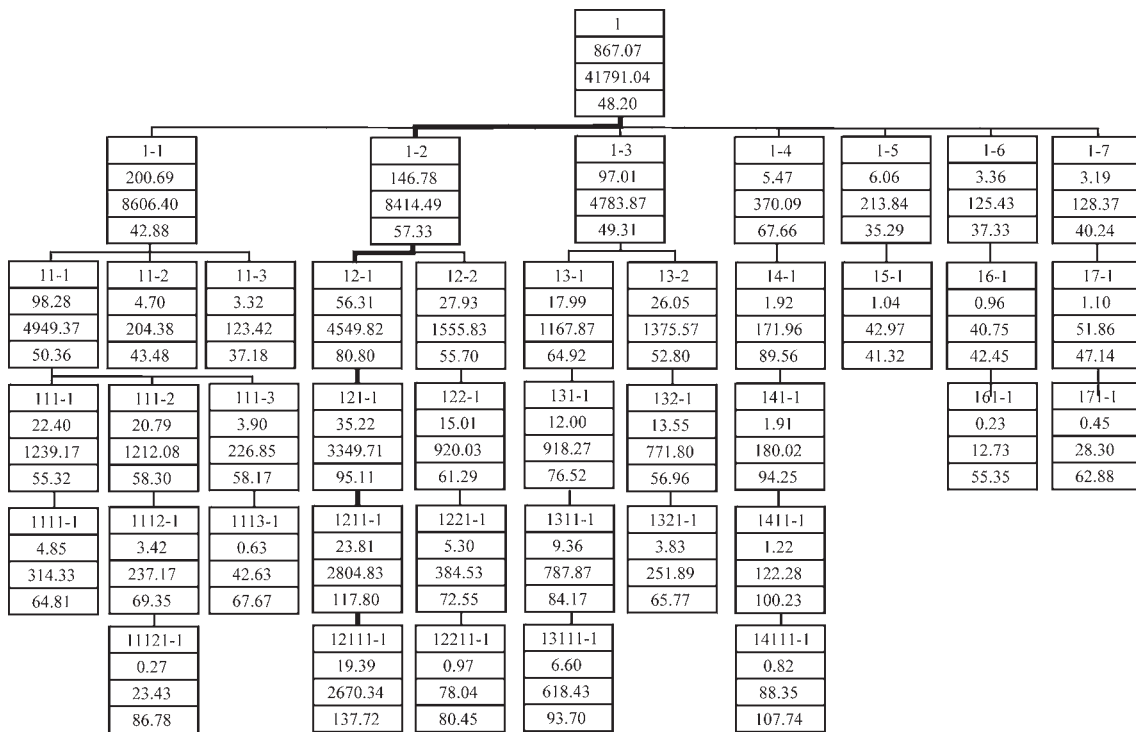


图11 1号块体Zn地球化学谱系图
Fig.11 Phenogram of No. 1 Zn geochemical block

是区域性的控岩、控矿构造,矿床的空间位置主要受其NE向、NW向、近EW向的次级断裂控制。区内构造-岩浆的多期活动,为成矿元素的活化、富集提供了热源、矿源及赋矿空间,形成了构造-岩浆-成矿作用为一体的耦合体系。

(2)区内多数矿床的赋存状态与二叠纪地层有密切的空间关系,特别是二叠纪地层与岩体或二叠纪地层与其他时代地层的接触带并发育断裂构造的部位,如黄岗梁矽卡岩型铁锡矿床、哈达吐铅锌银矿床等。

(3)奇异值分解技术在该区的应用结果显示,矿床多分布在不同方向构造的交汇部位、不同方向的构造与异常的交汇部位及不同方向异常的叠加部位,特别是热液型矿床。

通过对该区Sn地球化学块体及异常结构的分析,可以看到在5级、6级块体级别下,多数锡矿床主要分布在块体或异常的边缘部位。因此,本文选用5级块体分级下限 11.2×10^{-6} 所圈定的子块体或子异

常作为远景区(剔除低于3个采样点的地球化学异常($<12 \text{ km}^2$)),并根据该区锡矿的成矿条件来确定远景区的等级。本文共圈定了Sn成矿I类远景区3个,II类远景区4个,III类远景区2个。各远景区具体情况见表5。

同样,Zn地球化学块体及异常在4级块体级别下,多数锌(多金属)矿床(点)的分布不受子块体或子异常控制,仅少数分布在块体或异常的边部。因此,本文选用4级块体分级下限 197×10^{-6} 所圈定的子块体或子异常作为远景区(剔除小于 12 km^2 的异常),共圈定了Zn成矿I类远景区3个,II类远景区2个,III类远景区2个。Zn成矿远景区具体情况见表6。

综上,F1、F2因子得分异常(图1~2)与Sn、Zn异常(图8~9)具有较好的空间对应关系,说明因子分析结果具有较好的代表性。而从图2~3及图6~7与已知矿床(点)、断裂构造、地质体等地质要素的空间对应关系可以看出,奇异值分解技术提取的地球

表5 Sn地球化学子块体及子异常地质特征

Table 5 Geological characteristics of Sn geochemical sub-blocks and sub-anomalies

编号	面积 /km ²	金属量 /万 t	地质特征	潜在资源量 /万 t	远景区 等级
1111-1	394.76	4 352.87	侏罗纪、二叠纪岩浆岩及NE向、NW向断层	114.92	I
1111-2	26.96	101.3	侏罗纪岩浆岩、断层,异常呈NE向,与近SN向断裂交汇	2.67	I
1111-4	23.01	73.68	二叠纪、侏罗纪地层及侏罗纪岩浆岩	1.95	II
1121-1	26.58	297.87	侏罗纪地层及NE向断裂构造、背斜构造,异常被断裂所截	7.86	II
1141-1	12.5	30.18	二叠纪地层、侏罗纪地层、近EW向断裂	0.80	II
1161-1	21.03	122	侏罗纪地层、侏罗纪花岗岩	3.22	III
1211-1	40.7	164.09	侏罗纪花岗岩、侏罗纪地层、二叠纪地层	4.33	II
1311-1	13.2	36.8	二叠纪地层、三叠纪地层	0.97	III
2111-1	44.6	531.29	侏罗纪花岗岩、侏罗纪地层、二叠纪地层、NW向断裂	14.03	I

表6 Zn地球化学子块体及子异常地质特征

Table 6 Geological characteristics of Zn geochemical sub-blocks and sub-anomalies

编号	面积 /km ²	金属量 /万 t	地质特征	潜在资源量 /万 t	远景区 等级
111-1	22.40	1 239.17	NE向断裂,二叠纪花岗闪长岩、侏罗纪花岗斑岩	3.72	II
111-2	20.79	1 212.08	二叠纪地层、侏罗系地层	3.64	III
121-1	35.22	3 349.71	二叠纪地层、侏罗纪地层、侏罗纪花岗斑岩、背斜构造	10.05	I
122-1	15.01	920.03	NE向断裂构造	2.76	III
131-1	12.00	918.27	二叠纪地层、侏罗纪地层、NW向断裂,边部发育侏罗纪花岗岩	2.75	I
132-1	13.55	771.80	二叠纪地层、侏罗纪地层,附近发育NE向断裂及侏罗纪花岗岩	2.32	II
311-1	13.01	870.09	二叠纪地层、侏罗纪地层、NW向断裂,边部发育侏罗纪花岗岩	2.61	I

化学异常(图6~7)更能反映其与地质要素之间的空间对应关系,说明奇异值分解技术从另一层面上提取异常、反映找矿规律等方面具有较好的效果。而基于奇异值分解技术总结出的找矿规律应用到Sn、Zn远景区的圈定上,具有一定的实际意义。且综合对比圈定的Sn、Zn远景区(图8-d、图9-c)与奇异值分解技术提取的地球化学异常(图6~7)也具有一定的空间对应关系。因此,基于奇异值分解技术反映出的找矿规律及成矿条件而圈定的远景区具有一定的找矿潜力。

5 结论

本文以黄岗—甘珠尔庙成矿带南部1:20万化探扫面数据为基础,借助奇异值分解技术及地球化学块体方法,提取该区地球化学综合异常及评价该区锡、锌矿的成矿潜力,并圈定远景区。通过研究,得出以下几点认识:

(1)不同方向构造的交汇部位、构造截切地球化学异常的部位或不同方向异常的叠加部位,是寻找锡、钨、铜、铅、锌等矿床的有利地段。

(2)区内多数矿床的赋存状态与二叠纪地层有密切的空间关系,特别是二叠纪地层与岩体的接触带或二叠纪地层与其他时代地层的接触带并发育断裂构造的部位。

(3)共圈定了Sn地球化学块体1个,区域异常1个,局部异常8个;Zn地球化学亚块体1个,区域异常1个,局部异常7个。并以1000 m作为块体厚度,计算了该区潜在锡资源量为211.92万t,潜在锌资源量为146.42万t。

(4)通过对该区地球化学块体及异常结构的分析,并根据该区锡、锌矿的成矿条件来确定远景区的等级。本文共圈定了Sn成矿Ⅰ类远景区3个,Ⅱ类远景区4个,Ⅲ类远景区2个;Zn成矿Ⅰ类远景区3个,Ⅱ类远景区2个,Ⅲ类远景区2个。

参考文献(References):

[1] Cheng Qiuming. The perimeter-area fractal model and its application in geology[J]. *Mathematical Geology*, 1995, 27(7): 64-77.

[2] Cheng Qiuming. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 65: 175-194.

[3] 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 procession 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).

[4] Cheng Qiuming. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns[J]. *Mathematical Geology*, 2004, 36(3): 345-360.

[5] 成秋明. 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[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(3): 337-348.

Cheng Qiuming. Non-linear mineralization prediction theory: Singularity—Generalized self-similarity—Fractal spectrum (3S) models[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(3): 337-348(in Chinese with English abstract).

[6] Cheng Qiuming. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments [J]. *Mathematical Geosciences*, 2008, 40(5): 503-532.

[7] 李庆谋, 成秋明. 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[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(1): 109-118.

Li Qingmou, Cheng Qiuming. Fractal singular-value (Egin-value) decomposition method for geophysical and geochemical anomaly reconstruction[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(1): 109-118(in Chinese with English abstract).

[8] 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 prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Weak information extraction and mixing information decomposition[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(2): 232-242(in Chinese with English abstract).

[9] Li Qingmou. GIS-based Multifractal/ Inversion Methods for Feature Extraction and Applications in Anomaly Identification for Mineral Exploration[D]. Doctor of Philosophy Thesis, York University, Toronto, Canada, 2005: 211.

[10] Cheng Qiuming. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32: 314-324.

[11] Zuo Renguang, Cheng Qiuming, Agterberg Frederik P., et al. Application of singularity mapping technique to identification of local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, Western China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101: 225-235.

- [12] 赵彬彬, 陈永清. 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[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(2): 341–346.
Zhao Binbin, Chen Yongqing. Singular-value decomposition (SVD) for extraction of gravity anomaly associated with gold mineralization in the Tongshi gold ore field, western Shandong province, east China[J]. Earth Science —Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 341–346(in Chinese with English abstract).
- [13] Guowen Wang, Shouting Zhang, Changhai Yan, et al. Application of the multifractal singular value decomposition for delineating geophysical anomalies associated with molybdenum occurrences in the Luanchuan ore field(China) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 86: 109–119.
- [14] 谢学锦. 用新观念与新技术寻找巨型矿床[J]. 科学中国人, 1995, (5): 14–16.
Xie Xuejin. New concept and new technique in searching for giant ore deposit[J]. Scientific Chinese, 1995, (5): 14–16(in Chinese with English abstract).
- [15] 谢学锦, 向运川. 巨型矿床的地球化学预测方法[C]//谢学锦, 等. 进入21世纪的勘查地球化学. 北京: 地质出版社, 1999: 61–91.
Xie Xuejin, Xiang Yunchuan. The geochemical prediction methodology of giant ore deposit[C]//Xie Xuejin, et al. The exploration geochemistry into 21st century. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 61–91(in Chinese).
- [16] 李随民, 吴景霞, 栾文楼, 等. 地球化学块体方法在冀北金矿资源潜力估算中的应用[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 444–449.
Li Suimin, Wu Jingxia, Luan Wenlou, et al. The application of geochemical block method to gold resource assessment in northern Hebei Province[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 444–449(in Chinese with English abstract).
- [17] 师淑娟, 宫进忠, 张洁. 河北省铅锌矿源层与地球化学块体[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 276–282.
Shi Shujuan, Gong Jinzhong, Zhang Jie. Lead-zinc source beds and geochemical blocks in Hebei Province[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(2): 276–282(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘长征, 陈岳龙, 赵娟, 等. 青海西南部地球化学块体特征及找矿潜力分析[J]. 资源与矿产, 2011, 13(S1): 168–175.
Liu Changzheng, Chen Yuelong, Zhao Juan, et al. Features and exploration potential of geochemical blocks in southwestern Qinghai[J]. Resources & Industries, 2011, 13(S1): 168–175(in Chinese with English abstract).
- [19] 刘学敏, 王学求, 徐善法, 等. 华南陆块铜的地球化学块体与成矿省的关系[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 59–69.
Liu Xuemin, Wang Xueqiu, Xu Shanfa, et al. Relationship of copper geochemical blocks and metallogenic provinces in south China Continent[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 59–69 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孙卫志, 张灯堂, 孟宪锋, 等. 豫西矿集区 Au、Mo 地球化学块体分布特征及资源潜力分析[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 349–358.
Sun Weizhi, Zhang Dengtang, Meng Xianfeng, et al. Characteristics of Au and Mo geochemical blocks and an analysis of resource potential in the west Henan ore concentrated area[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 349–358(in Chinese with English abstract).
- [21] 李堃, 刘凯, 汤朝阳, 等. 湘西黔东地区 Zn 地球化学块体特征及锌资源潜力估算[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1270–1277.
Li Kun, Liu Kai, Tang Chaoyang, et al. Characteristics of zinc geochemical blocks and assessment of zinc resource potential in western Hunan and eastern Guizhou Province[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1270–1277(in Chinese with English abstract).
- [22] Freire S L M, Ulrych T J. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling[J]. Geophysics, 1988, 53(6): 778–785.
- [23] 芮宗瑶, 施林道, 方如恒, 等. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 314–363.
Rui Zongyao, Shi Lindao, Fang Ruheng, et al. Nonferrous Metals Ore Geology in the North Margin of North China Block and Its Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 314–363(in Chinese).
- [24] 赵一鸣, 张德全, 等. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 1–318.
Zhao Yiming, Zhang Dequan, et al. Metallogeny and Prospective Evaluation of Copper-polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 1–318(in Chinese).
- [25] 方曙, 王永祥, 李立新. 大兴安岭东南部太平山地区断裂控矿作用及控矿应力场[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 107–114.
Fang Shu, Wang Yongxiang, Li Lixin. Ore-controlling role of fractures and ore-controlling stress field in Taipingshan area, Eastern Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1): 107–114(in Chinese with English abstract).
- [26] Meng Qingren. What drove late Mesozoic extension of the

- northern China-Mongolia tract?[J]. *Tectonophysics*, 2003, 369: 155-174.
- [27] 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 等. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩地壳生长的时代和方式[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 441-460.
- Liu Wei, Pan Xiaofei, Xie Liewen, et al. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hinggan Mts.: when and how continental crust grew?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 441-460(in Chinese with English abstract).
- [28] 邱瑞照, 周肃, 谭永杰, 等. 中国北方大陆及邻区岩石圈演化及与大规模成矿作用关系[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 544-563.
- Qiu Ruizhao, Zhou Su, Tan Yongjie, et al. Relationship of the evolution of the lithosphere to large-scale mineralization in the continent of northern China and adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 544-563(in Chinese with English abstract).
- [29] 武新丽, 毛景文, 周振华, 等. 大兴安岭中南段布敦化铜矿床H-O-S-Pb同位素特征及成矿指示[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1812-1829.
- Wu Xinli, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, et al. H-O-S-Pb isotopic components of the Budunhua Cu deposit in the middle-south part of the Da Hinggan Mountains and their implications for the ore-forming process[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1486-1500(in Chinese with English abstract).
- [30] 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 85-93.
- Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 85-93(in Chinese with English abstract).
- [31] 李述靖, 张维杰, 耿明山, 等. 蒙古弧地质构造特征及形成演化概论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 145.
- Li Shujing, Zhang Weijie, Geng Mingshan, et al. Introduction to Geological Characteristics and Form Evolution of Mongolia Arc Structure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 145(in Chinese).
- [32] 刘建明, 张锐, 张庆洲. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 269-277.
- Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Qingzhou. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 269-277(in Chinese with English abstract).
- [33] Xiao Wenjiao, Windley Brian F, Hao Jie, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069.
- [34] 王京彬, 王玉往, 王丽娟. 大兴安岭南段中生代伸展成矿系统[J]. *矿床地质*, 2002, 21: 241-244.
- Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Lijuan. Mesozoic extension-metallogenic system in southern part of Da Hinggan Mountains, China[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21: 241-244(in Chinese with English abstract).
- [35] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- [36] 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟铜矿区A型花岗岩地球化学和构造背景[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 879-889.
- Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Wu Huaying, et al. Geochemistry study and tectonic background of A type host granite in Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 879-889(in Chinese with English abstract).
- [37] 张德全, 赵一鸣. 大兴安岭及邻区铜多金属矿床论文集[C]. 地震出版社, 1993: 50-64.
- Zhang Dequan, Zhao Yiming. The Proceedings of Copper polymetallic deposit in Da Hinggan Mts and its adjacent area[C]. Beijing: Seismological Press, 1993: 50-64(in Chinese).
- [38] 张喜周, 张振邦. 内蒙大兴安岭南段地质构造与成矿[J]. *矿产与地质*, 2003 (增刊), 17(97): 298-301.
- Zhang Xizhou, Zhang Zhenbang. Geological structure and metallogeny in the southern section of Daxing'anling, Inner Mongolia[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003 (supp.), 17(97): 298-301(in Chinese with English abstract).
- [39] 李庆谋, 刘少华. 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[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(1): 97-102.
- Li Qingmou, Liu Shaohua. Geophysical signal decomposition by singular method and application in GIS[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(1): 97-102(in Chinese with English abstract).
- [40] 王开华. 内蒙古安乐锡多金属矿床特征及成矿模式[J]. *矿产与地质*, 1998, 12(68): 404-409.
- Wang Kaihua. Geological features and metallogenic model of Anle tin-polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Resources and Geology*, 1998, 12(68): 404-409(in Chinese with English abstract).
- [41] 王丽娟, 岛崎英彦, 王京彬, 等. 黄岗梁矽卡岩型铁锡矿床成矿

- 流体及成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(7): 553-562.
- Wang Lijuan, Hidehiko SHI MAZAKI, Wang Jingbin, et al. Ore-forming fluid and mineralization of Huanggangliang Skarn type Fe-Sn deposit [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(7): 553-562(in Chinese with English abstract).
- [42] 翟德高, 刘家军, 杨永强, 等. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩、成矿时代与构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 513-523.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Yang Yongqiang, et al. Petrogenetic and metallogenic ages and tectonic setting of the Huanggangliang Fe-Sn deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(4): 513-523 (in Chinese with English abstract).
- [43] 张信. 大井铜-锡多金属矿床地质特征及其成因[J]. 矿产与地质, 2007, 21(4): 415-420.
- Zhang Xin. Geological characteristics of the Dajing copper-tin polymetallic deposit and its genesis[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(4): 415-420(in Chinese with English abstract).
- [44] 王明艳, 何玲. 内蒙古查木罕钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(1): 49-56.
- Wang Mingyan, He Ling. Re-Os dating of molybdenites from Chamuhan W-Mo deposit, Inner Mongolia and its geological implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(1): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- [45] 陈永清, 韩学林, 赵红娟, 等. 内蒙敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 36(2): 236-246.
- Chen Yongqing, Han Xuelin, Zhao Hongjuan, et al. Characteristics of Primary Halo Zonation and Prediction Pattern of Deep Orebody of the Huaobaote Pb-Zn-Ag Polymetallic Deposit, Inner Mongolia[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 36(2): 236-246(in Chinese with English abstract).
- [46] 刘大文, 谢学锦, 严光生, 等. 地球化学块体的方法技术在山东金资源潜力预测中的应用[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 169-174.
- Liu Dawen, Xie Xuejin, Yan Guangsheng, et al. The application of geochemical blocks methods to gold resources assessment in Shandong Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(2): 169-174(in Chinese with English abstract).
- [47] 刘大文, 周晓东, 谢学锦. 应用于矿产资源评价的地球化学块体方法技术[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 80.
- Liu Dawen, Zhou Xiaodong, Xie Xuejin. Geochemical block methods applied in mineral resources evaluation[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 80(in Chinese with English abstract).
- [48] 刘大文, 谢学锦. 基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 25-32.
- Liu Dawen, Xie Xuejin. Evaluation of China's tin resources potential based on the geochemical block concept[J]. Geology in China, 2005, 32(1): 25-32(in Chinese with English abstract).
- [49] 刘大文, 向运川, 连长云, 等. 水系沉积物中的金属元素在中国东部不同构造单元的分布特征[J]. 地质与勘探, 2002 (增刊), 38: 156-163.
- Liu Dawen, Xiang Yunchuan, Lian Changyun, et al. The distribution of metals in stream sediment in different tectonic zones, Eastern China[J]. Geology and Prospecting, 2002 (supp.), 38: 156-163(in Chinese with English abstract).
- [50] 迟清华. 岩石化学元素丰度在地球化学块体研究中的意义[J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 428-430.
- Chi Qinghua. The significance of element abundances of rocks in the study of geochemical blocks[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 428-430(in Chinese with English abstract).

The application of singular-value decomposition (SVD) and geochemical blocks methods to the prospecting in southern Huanggang-Ganzhu'ermiao metallogenic belt

ZHOU Ding^{1,2}, CHEN Yong-qing¹, ZHAO Bin-bin³

(1. School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. No. 6 Gold Geological Party of CAPF, Sanmenxia 472000, Henan, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the 1:200000 geochemical exploration data of southern Huanggang-Ganzhu'ermiao metallogenic belt, the authors employed the singular-value decomposition technique and geochemical blocks methods to extract geochemical synthetic anomalies and assess the Sn and Zn mineralizing potential. The conclusions drawn by the authors are as follows: (1) The intersections of structures in different directions and the area where structure truncates the geochemical anomalies or the superimposed area of anomalies in different directions are favorable positions for Mo, Sn, W, Cu, Pb, Zn prospecting. (2) Most of the deposits in the study area have a close spatial relationship with the Permian strata, especially the contact zone between the Permian strata and the rock mass or the contact zone between the Permian strata and strata of other epochs with well-developed faults. (3) A Sn geochemical block, a regional anomaly and eight local anomalies as well as a zinc geochemical block, a regional anomaly and seven local anomalies were delineated. With 1 000 m as the thickness of the block, the total potential mineral resource of Sn is 211.92 million tons, and the potential mineral resource of Zn is 146.42 million tons in the study area. (4) By analyzing the structures of the geochemical blocks and anomalies, three first-order Sn prospective areas, four second-order Sn prospective areas and two third-order Sn prospective areas, along with three first-order Zn prospective areas, two second-order Zn prospective areas and two third-order Zn prospective areas, were delineated according to the metallogenic conditions.

Key words: singular-value decomposition; geochemical blocks; Huanggang-Ganzhu'ermiao metallogenic belt; prospective areas

About the first author: ZHOU Ding, male, born in 1987, master candidate, engages in mineral resource prospecting and exploration; E-mail: zhou dingcugb@126.com.

About the corresponding author: CHEN Yong-qing, male, born in 1960, professor and doctor, engages in quantitative mineral exploration and assessment. E-mail: cugb_yqchen@126.com.