

应用奇异值分解技术提取滇东南锡-钨多金属矿化航磁异常

朱旭¹, 陈永清^{1*}, 赵彬彬²

ZHU Xu¹, CHEN Yongqing^{1*}, ZHAO Binbin²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中矿资源集团有限公司, 北京 100089

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Sinomine Resource Group Co., Ltd., Beijing 100089, China

摘要:滇东南锡-钨多金属矿集区位于扬子陆块、华夏陆块及印支陆块的交汇处,区内分布一系列与晚白垩世大规模岩浆作用密切相关的锡、钨、铜、银、铅、锌多金属矿床。对滇东南 1:200 000 航磁数据化极处理后,应用奇异值分解(SVD)技术提取航磁数据中与锡-钨多金属矿化有关的深部地质结构和地质体特征分量。通过定义不同的滤波器,选择相应的特征分量进行重构,获得反映深部及浅层的地质结构和地质体空间分布的图像。研究表明:①研究区深部存在 2 种磁性特征的基底,即强磁性基底(哀牢山岩群、大红山岩群和瑶山岩群)和弱磁性基底(昆阳群和猛硐岩群);②与矿化密切相关的花岗岩体显示为环绕负磁异常发育正磁异常,环形正磁异常可能反映了接触交代矿化蚀变带的空间分布;③环绕负磁异常发育正磁异常区域是进一步找寻锡-钨多金属矿床的最佳靶区。

关键词:奇异值分解(SVD);航磁致矿异常;锡-钨多金属矿床;花岗岩体;滇东南

中图分类号:P618.44;P618.67;P22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0764-08

Zhu X, Chen Y Q, Zhao B B. Singular Value Decomposition(SVD) used to extract aero-magnetic anomalies related to Sn-W polymetallic mineralization in SE Yunnan, China. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 764-771

Abstract: The Sn-W polymetallic ore-concentrated area in SE Yunnan is located at the junction of the Cathaysian Massif, Yangtze Massif, and Indo-China Massif, where there are a series of Sn, W, Cu, Ag, Pb, Zn polymetallic deposits closely related to the Late Cretaceous magmatism. The Singular Value Decomposition(SVD) was applied to extract aero-magnetic anomaly components reflecting the deep geological structures and geological bodies associated with the Sn-W polymetallic deposits and mineralized granitic intrusives from the aero-magnetic data of the SE Yunnan district at a scale of 1:200 000. The results show that there are two metamorphic basements, one with strong magnetism(Dahongshan Group, Ailaoshan Group and Yaoshan Group), and the other with weak magnetism(Mengdong Group); granitoids closely related to W-Sn polymetallic mineralization in the study area shows a ring positive magnetic anomaly around a negative magnetic anomaly, which may reflect a contact skarnization zone around a granitic intrusion; and the ring positive magnetic anomalies around negative magnetic anomaly are the best targets for further exploration of Sn-W polymetallic deposits.

Key words: Singular Value Decomposition(SVD); aero-magnetic anomaly; Sn-W polymetallic mineralization; granitic intrusives; Southeast Yunnan

收稿日期:2020-08-04;修订日期:2020-10-25

资助项目:国家重点研发计划课题《“三联式”数字找矿模型与深部定量成矿预测》(编号:2016YFC0600509)、国家自然科学基金项目《深部找矿信息提取与找矿模型建立》(批准号:41672329)和《成矿系统自组织临界性与矿床空间定位预测》(批准号:41972312)

作者简介:朱旭(1994-),男,硕士,矿产普查与勘探专业。E-mail:1015863203@qq.com

*通信作者:陈永清(1960-),男,博士,教授,从事矿产资源定量勘查与评价教学与研究。E-mail:yqchen@cugb.edu.cn

自20世纪80年代以来,随着浅表矿逐渐开采殆尽,矿产勘查的目标从容易识别的浅表矿床转变为难识别的隐伏深部矿床^[1],矿产勘查已进入信息勘查阶段^[2]。深部找矿除强调发展灵敏度高、分辨率好、抗干扰能力强等特性,能取得深部直接矿化的信息,探测深度达1000 m以上的仪器外,还应强调以信息技术为核心的多学科技术融合与集成。无论是加拿大的“勘查技术计划”,还是澳大利亚的“玻璃地球计划”,都以地质理论为基础,以信息技术为核心,旨在促进地质、物探、化探、遥感等资料的融合。同时,在一次探测中能获得多种参数的找矿信息,能有效分析与综合各种找矿信息^[3]。地表实施的物化探和遥感勘查能不同程度地获得矿化信息,而这些矿化信息通常隐藏在复杂的地质背景中^[4],因此,从复杂的地质背景中获取深层次矿化信息是寻找隐伏矿床的关键。地质过程的复杂性主要源于成矿地质作用的多期次、多阶段及叠加性,描述这一过程的数据集通常具有非平稳性和非线性结构^[5-10]。奇异性可以定义为在较小的时间间隔或空间范围内产生的巨量能量释放或物质的超常富集和堆积^[6]。因此,地质异常事件引起的各种非线性及复杂性的地质过程具有奇异性的特征,这些地质过程所产生的结果具有奇异性、自相似性、自组织临界性,并可采用分形或多重分形模型进行度量和研究^[6]。

地表磁测获取的磁测异常是不同深度磁性地质体叠加的综合反映,其与磁性地质体的规模、产状、形态、体积、分布范围及各个叠加体的体积大小、深度分布和磁性强弱有关。因此,识别和提取与矿化相关的磁测异常是一项十分复杂的技术。

本文利用多重分形模型的奇异值分解(SVD)方法^[11-13],对滇东南区域1:200 000的航磁数据进行分解,提取与锡多金属矿化有关的、反映不同空间尺度的地质结构和地质体特征的航磁异常分量,为研究区深部找矿工作提供科学依据。

1 地质背景与数据

研究区位于云南省东南部,东至麻栗坡县,西至元江,北至开远,南至马关。地理坐标为北纬22°50′~24°00′、东经102°00′~105°00′。研究区地层较发育,主要出露元古宇、古生界及中生界,新生界出露范围较小(图1)。区内出露最老地层为古元

古界大红山岩群、哀牢山岩群、瑶山岩群及猛硐岩群,锡-钨多金属矿床主要赋矿层位为元古宇南秧田岩组,中寒武统龙哈组、田蓬组及三叠系个旧组。主要涉及的深大断裂包括红河断裂、弥勒-师宗断裂、小江断裂、蒙自断裂及文山-麻栗坡断裂,其中,红河断裂为研究区西南缘边界,弥勒-师宗断裂为研究区扬子陆块及华夏板块的结合带^[14]。岩浆活动剧烈,其中,燕山期花岗岩类岩浆侵入活动最发育,形成个旧、薄竹山、都龙3个复式岩基,组成一条近EW向的花岗岩带,且每个岩基的出露面积均在150~450 km²之间。

晚白垩世,包括研究区在内的华南西部地区发生大规模的岩石圈伸展和地幔物质上涌,幔源岩浆底侵下地壳,形成了华南西部地区广泛分布的同期基性-中酸性-碱性侵入岩组合,以及一系列与这些大规模岩浆作用具有密切成因联系的钨-锡-铅-锌-银-金矿床^[15]。

在个旧地区,个旧锡多金属矿床的形成与区内的S型花岗岩具有密切成因联系。在花岗质岩浆分异演化的晚期,硅质碱质挥发组分和成矿金属元素在岩体隆起部位聚集,形成云英岩型锡-钨矿化、层状、似层状、脉状锡-铅-锌矿化。与此同时,岩浆与碳酸盐岩和三叠纪玄武岩相互作用,形成矽卡岩型锡-铜矿化^[17-18]。

在薄竹山地区,官房矽卡岩型白钨矿床分布在薄竹山岩体与古生代碳酸盐岩接触带。白钨矿主要表现为浸染状和团块状矿化,偶见沿裂隙呈细脉状矿化。主要矿石(金属)矿物有白钨矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂,以及少量钛铁矿、菱铁矿、辉钼矿;脉石(非金属)矿物主要有石榴子石、透辉石、透闪石、绿泥石、绿帘石、方解石等热液蚀变矽卡岩矿物^[19]。白牛厂超大型银-铅-锌多金属矿化主要与矿区深部存在隐伏花岗岩有关。矿区内围岩蚀变以大理岩化、角岩化、砂岩化、碎化、绢云母化、碳酸盐化为主,矿体主要赋存于中寒武统田蓬组、龙哈组中,呈似层状、透镜状、脉状等产出。矿石矿物以硫化物为主,主要金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、锡石、毒砂、方铅矿、白铁矿、菱铁矿等,其中,银矿物主要为银黝铜矿、黝锑银矿、深红银矿及辉锑银矿;非金属矿物以石英、长石、方解石、铁白云石、绢云母、粘土矿物和重晶石为主^[20]。

在老君山地区,都龙锡多金属矿床与区内花岗岩密切相关,燕山晚期老君山复式花岗岩主体出露于矿区北侧,并向南倾伏于矿区地层之下,而在都龙矿区广泛出露花岗斑岩脉。矿区内围岩蚀变主要有砂卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化等,其中,与矿化关系最密切的是砂卡岩化。矿体绝大多数赋存于中寒武统田蓬组中、下部碳酸盐岩与碎屑岩过渡地带,矿石类型主要为锡石硫化物矿石,其次为碳锡石-硫化物-碳酸盐矿石及萤石-石英脉型锡石硫化物矿石。锡主要以锡石形式存在,其次见少量黝锡矿,锌和铜则主要以铁闪锌矿和黄铜矿形式存在。矿石(金属)矿物主要有铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、锡石、黄铜矿、毒砂、磁铁矿,以及少量铜蓝、辉铜矿、黝锡矿、菱铁矿等。脉石(非金属)矿物主要有石英、云母、方解石、透辉石、透闪石、绿泥石、绿帘石、阳起石、石榴子石等^[21]。

南秧田白钨矿床位于燕山期老君山花岗岩体东侧,南秧田岩组为主要含矿层,由片麻岩、变粒岩、片岩等组成,矿体赋存于砂卡岩带中^[22]。矿石类型较简单,主要为砂卡岩白钨矿型,其次还有含硫化物砂卡岩白钨矿型及少量电气石石英脉白钨矿型。钨主要以白钨矿形式存在,呈浸染状、星点状及团块状分布于脉石矿物中。矿石(金属)矿物主要有白钨矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂、辉钼矿等,脉石(非金属)矿物主要为石英、长石、黑云母等造岩矿物及绿帘石、绿泥石、透辉石、阳起石、石榴子石、方解石等热液蚀变矿物。

上述矿床中发育的磁铁矿、磁黄铁矿等强磁性矿物,为磁法勘探奠定了基础。

研究区位于低纬度区域,通过标准化极变换将 1:200 000 航磁数据还原到极点进行处理,其倾向 -1.65° ,倾角 35.23° 。图 2 为化极处理后图像,区域场表现为低缓平稳的负背景场,磁场强度范围为 $0 \sim -35$ nT,负背景场上叠加了一系列的正负相间的磁异常带,异常带分布于深大断裂附近。

据云南省地质调查局地面磁测数据,研究区岩石磁性特征以变钠质熔岩磁性最强,其磁化率和剩余磁化强度分别高达 $400 \times 10^{-6} \sim 23000 \times 10^{-6} 4\pi\text{SI}$ 和 $3100 \times 10^{-3} \sim 13000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 。其次为含矿砂卡岩,具有中等或强磁性,其磁化率和剩余磁化强度分别高达 $29400 \times 10^{-6} \sim 89020 \times 10^{-6} 4\pi\text{SI}$ 和 $31300 \times 10^{-3} \sim 56700 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 。基性岩磁性以喷出相的玄武岩

最强,具有强磁性,浅成相的辉绿岩、深成相的辉长岩次之。超基性岩类磁性及变化与基性岩相反,以深成相最强,浅成相次之,喷发相最弱。中性岩类以深成相闪长岩及喷发相安山岩磁性较强,浅成相的闪长玢岩无或具弱磁性。碱性岩具弱磁性或中等磁性,少部分为无磁性,酸性岩类及沉积岩无磁性或微磁性。矿石磁性由强至弱的顺序为:磁铁矿、磁菱铁混合矿、铬铁矿、硫化铜镍矿与砂卡岩共生的锡矿石。

2 奇异值分解(SVD)方法

奇异值分解可将复杂的数据集 X 分解为 2 个特征向量矩阵和一个对角矩阵,如:

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

其中,对角矩阵 S 为奇异值矩阵, U 为左特征向量矩阵, V^T 为右特征向量矩阵。矩阵 S 为原始数据 X 的奇异值,其值的大小为协方差矩阵 $X^T X$ 或 XX^T 特征值(λ)的平方根 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, ($i=1, 2, \dots, r-1, r$)。即:

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

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

奇异值具有以下特征:①它们沿主对角线呈降序排列;②它们表示特征值的不同加权系数;③它们的平方等效于傅里叶空间中的功率谱密度值^[23]。

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, σ_i 为 X 的第 i 个特征值, u_i 为 XX^T 的第 i 个特征向量, v_i 为 $X^T X$ 的第 i 个特征向量, $u_i v_i^T$ 为 $m \times n$ 矩阵,是 X 的第 i 个特征图像^[24]。

据公式(3),如果所有的特征图像能够重构原始的 X ,则选取部分奇异值,能够重构包含部分信息的子矩阵。

奇异值矩阵呈降序排列,前几个奇异值对应的特征图像包含矩阵 X 的绝大部分能量。每个特征图像能量百分比 P_i 计算如下^[23, 25]:

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

应用 SVD 技术对航磁化极数据进行处理,通过 Freir 等^[23]定义的低通 X_{LP} 、带通 X_{BP} 和高通 X_{HP} 3 种

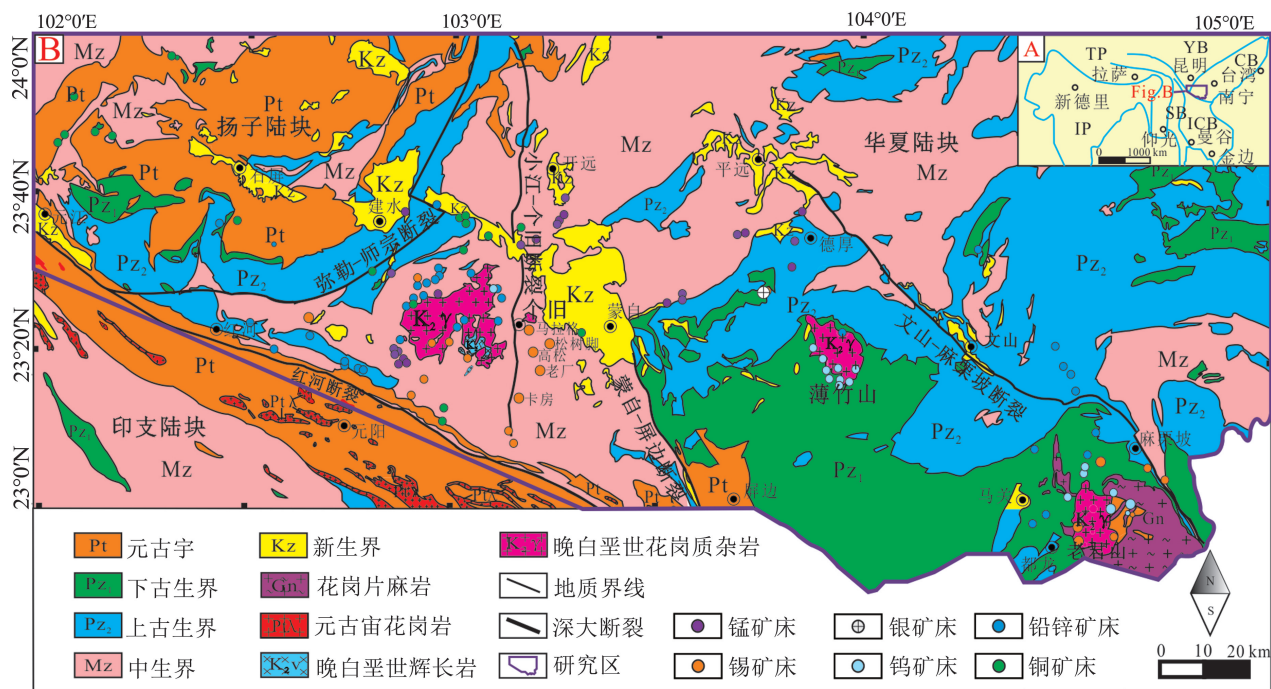


图 1 滇东南锡-钨多金属矿集区地质矿产简图(据参考文献[16]修改)

Fig. 1 Geological map of Sn-W polymetallic ore-concentrated area in southeastern Yunnan
CB—华夏陆块; YB—扬子陆块; SB—滇缅马苏陆块; ICB—印支陆块; IP—印度板块; TP—西藏板块

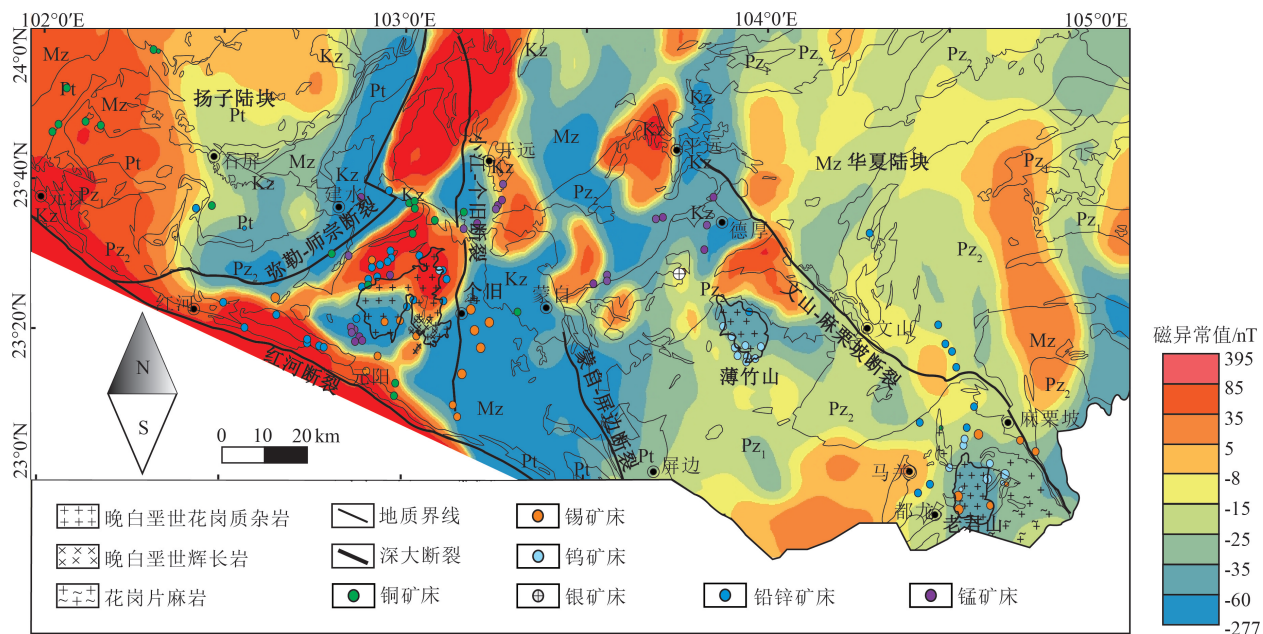


图 2 滇东南锡-钨多金属矿集区 1 : 200000 航磁化极图像

Fig. 2 Aeromagnetic pole image of Sn-W polymetallic ore-concentrated area in southeastern Yunnan
Pt—元古宇; Pz₁—下古生界; Pz₂—上古生界; Mz—中生界; Kz—新生界

滤波器重构图像。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, $1 < p < q < r$, p 和 q 的选择取决于奇异值本身, r 为矩阵 X 的秩。利用多重分形的方法可以确定 p 、 q 的值。奇异性过程可以导致矿化和矿物的堆积和富集, 这个过程可以用幂率 (power-law) 模型刻画^[26-27]。投影到奇异值对应的特征图像的能量密度 (能谱半径) 为奇异值的平方 (λ), 奇异值大于 λ_i 的总能量 (在一个能谱半径 (尺度) 内得到的能谱测度)^[10] 为:

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

能量所占百分比为:

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

这样定义的尺度与能量测度之间可能具有分形规律, 即 λ 与 E (或者 P) 之间可能存在分形规律^[28], 即:

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

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

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 λ - E 双对数图中, 可能存在不同的幂率关系, 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, 可以存在更多的分解点)。其中, 同一线段的奇异值所对应的特征图像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, 来确定公式 (5) (6) (7) 中的分割点 p 、 q 。图 3 为 $\ln(\lambda)$ - $\ln(E)$ 双对数图, 并以 $p=4$ 、 $q=12$ 为分割点, 确定了 3 个区段。右侧段由 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 组成, 根据公式 (9) 求得其在总能量中的占比为 85.25%, 由其重构的航磁异常图像 (图 4) 与化极异常图像 (图 2) 基本一致, 相当于低通滤波图像, 通常能反映区域控矿因素; 中间段由 $\lambda_5 \sim \lambda_{13}$ 组成, 其在总能量中的占比为 13.91%, 重构的航磁异常图像 (图 5) 相当于高通滤

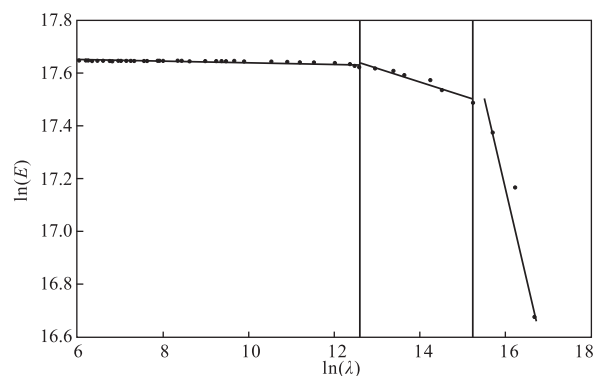


图 3 $\ln(\lambda)$ - $\ln(E)$ 对数图 (使用最小二乘法拟合 3 条具有不同斜率的线段, 分割点 $p=4$ 、 $q=13$)

Fig. 3 $\ln(\lambda)$ - $\ln(E)$ logarithmic graph

波图像, 反映具体的控矿因素; 左侧段由 $\lambda_{14} \sim \lambda_{45}$ 组成, 其在总能量中的占比仅为 0.84%, 能量占比极低, 推测为噪音造成, 无法反映具体的地质特征。

3 结 果

图 4 为 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 重构的磁异常图像, 占据 85.25% 的能量, 相当于低通滤波, 反映了深层地质体及地质结构特征。根据磁异常特征, 研究区以 AB 为连线划分为 2 个不同的磁异常区域 (图 4, I 和 II)。I 区代表扬子陆块变质基底的磁异常特征。环绕 I-1 负磁异常存在 3 处强正磁异常区 (I+1、I+2、I+3), I-1 负磁异常大致呈 NE 向展布, 南东侧以弥勒-师宗断裂为界, 异常极值为 -120 nT, 对应于石屏-建水中—新生代沉积盆地, 磁异常值自南东向北西逐渐升高, 反映该盆地厚度沿此方向远离断裂逐渐变浅。强正磁异常区 (I+1、I+2、I+3) 依次对应基底哀牢山岩群、大红山岩群和瑶山岩群变质火山岩系, 磁异常极值达 315 nT, 主要反映扬子陆块基底的磁场特征。扬子陆块基底主要由哀牢山岩群、大红山岩群和瑶山岩群组成, 岩石类型主要为片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩、片岩、大理岩等, 片麻岩和斜长角闪岩具有较强的磁性^[29-30]。负磁异常 I-1 周围被正磁异常 (I+1、I+2、I+3) 环绕, 表明石屏-建水中—新生代沉积盆地是发育在古元古代变质基底上受弥勒-师宗断裂控制的断陷盆地。负磁异常 (I-2) 对应一个旧花岗质杂岩体, 磁异常分布在 -50 ~ -200 nT 之间, 异常极值 -260 nT, 异常面积达 1500 km²。II 区磁异常主要反映华夏

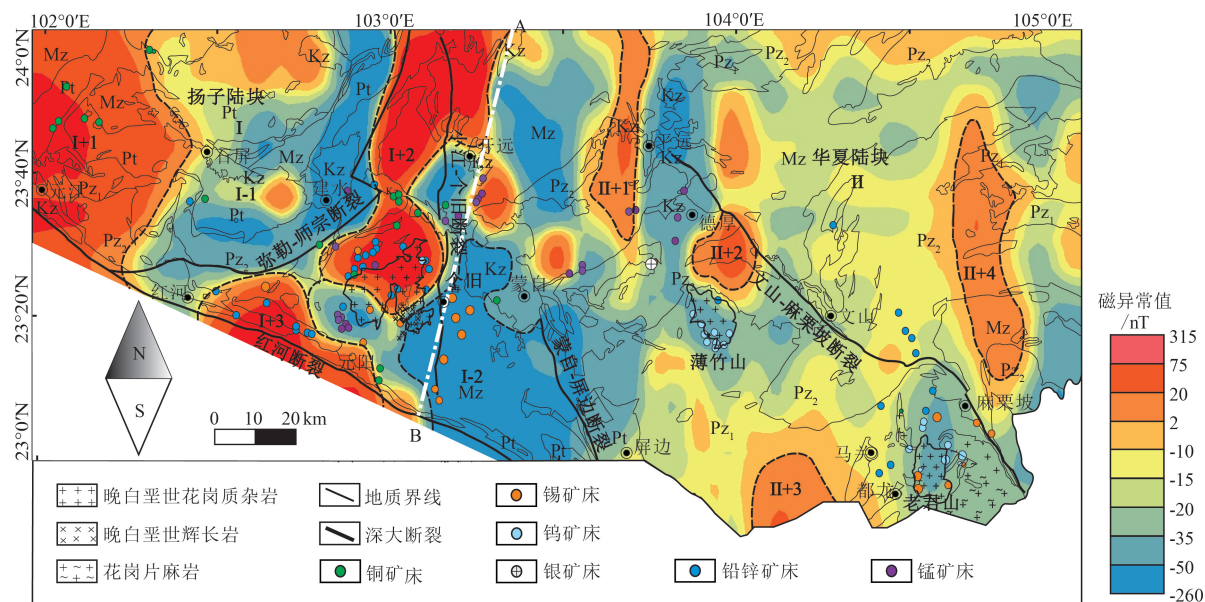


图 4 由第 1 特征值至第 4 特征值重构得到的滇东南磁异常分量图像(地层代号同图 2)

Fig. 4 Image of magnetic anomaly component reconstructed from the 1st to 4th eigenvalues in southeast Yunnan

陆块的磁场特征,该区基底主要由具有负磁异常的变沉积岩组成^[31-32],其上叠加的近 NS 向正磁异常可能反映不同时代玄武岩的分布^[33-36]。薄竹山岩体和老君山岩体均显示弱的负磁异常特征,异常范围为 $-20 \sim 50$ nT。此外,正磁异常(II+1、II+2、II+4)对应二叠纪—三叠纪玄武岩^[33-35],II+3 正磁异常

常对应新生代玄武岩^[36]。

图 5 为 $\lambda_5 \sim \lambda_{13}$ 重构的磁异常图像,占总能量的 13.91%,相当于高通滤波,反映了浅层地质体及地质结构特征。个旧锡—铜多金属矿集区存在 2 处围绕着负磁异常发育的环形正磁异常,负磁异常 I-1 和 I-2 空间上分别对应个旧西区出露花岗岩和个

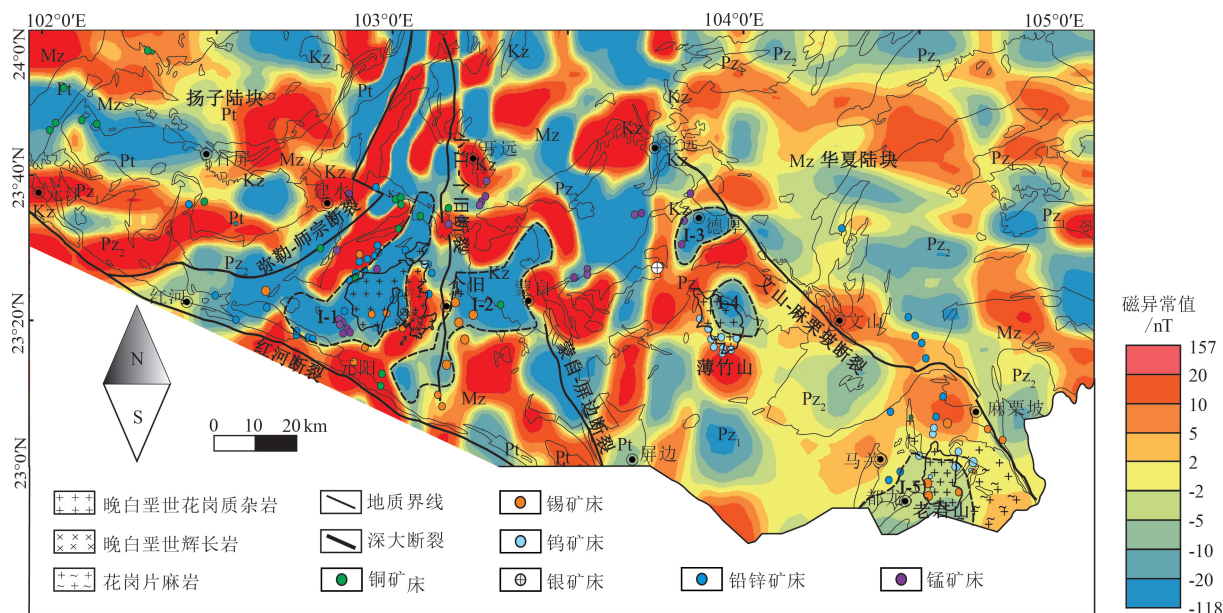


图 5 由第 5 特征值至第 13 特征值重构得到的滇东南磁异常分量图像(地层代号同图 2)

Fig. 5 Image of the magnetic anomaly component reconstructed from the 5th to 13th eigenvalues in southeast Yunnan

旧东区隐伏花岗岩。类似于重力异常模式^[37],表明负磁异常由花岗岩引起,而周围环绕的正磁异常由形成于花岗岩与围岩之间的接触交代矽卡岩蚀变矿化带引起,这种围绕着负磁异常发育环形正磁异常区域是进一步找寻锡-钨多金属矿床的远景地段。

在薄竹山银-铅-锌多金属矿集区也出现 2 处环绕负磁异常发育环形正磁异常的区域,一处对应白牛场超大型银-铅-锌多金属矿区(I-3),另一处对应官房钨、铁多金属矿区(I-4)。类似于个旧矿集区,上述 2 处环绕负磁异常发育环形正磁异常的区域应是薄竹山花岗岩(包括出露和隐伏花岗岩)及其形成的接触交代矽卡岩蚀变矿化所致。因此,这 2 处环绕负磁异常发育环形正磁异常区域分别是找寻银-铅-锌和钨-铁多金属矿床的远景地段。

老君山弱负磁异常场(I-5),异常分布范围为-6~0 nT,空间上反映老君山岩体及其矿化范围的分布。花岗岩体与围岩形成的内接触交代带是钨-锡多金属矿床成矿的有利地段,外接触带是寻找层控矽卡岩铜-铅-锌(钢)-钨(锡)多金属矿床的远景地段。

4 结 论

应用奇异值分解(SVD)技术,通过对磁异常场分解获取的图像揭示了研究区深部和浅部的地质结构特征及与矿化相关的花岗岩(包括隐伏花岗岩和出露花岗岩)的空间分布,结合个旧、薄竹山和老君山 3 处矿集区花岗岩及其成矿地质特征,获得研究区深部矿化的磁异常信息,为研究区进一步深部找矿提供科学依据。

(1)由第 1 到第 4 特征值重构的磁异常分量图像相当于一个低通滤波。根据磁异常特征将研究区划分为:I 区反映了具有强正磁异常特征的扬子基底特征和具有负磁异常特征的中-新生代断陷沉积盆地空间分布;II 区负弱磁异常反映了薄竹山和老君山花岗岩及其矿化范围的分布,II 区中等强度的正磁异常反映了二叠纪—三叠纪和新生代玄武岩的分布。

(2)由第 5 到第 12 特征值重构的磁异常分量图像相当于高通滤波图像,环绕负磁异常发育环形正磁异常模式是判别研究区隐伏多金属矿化花岗

岩标准磁异常模式。

(3)高通滤波图像负磁异常 I-1 和 I-2 空间上分别对应个旧西区出露花岗岩和个旧东区隐伏花岗岩,环绕 2 处负磁异常形成的环形正磁异常反映了接触交代矽卡岩蚀变矿化带的存在,是进一步找寻锡-铜多金属矿床的远景地段。同样,负磁异常 I-3 和 I-4 对应薄竹山矿化花岗岩,环绕其负磁异常发育的环形正磁异常区域是找寻银-铅-锌-钨-锡-铁多金属矿床的远景地段。弱负磁异常 I-5 空间上对应老君山矿化花岗岩,是进一步寻找层控钨-锡多金属矿床的远景地段,其北西侧的北西向正磁异常带是找寻矽卡岩型铜-铅-锌(钢)-钨(锡)矿床的远景地段。

致谢:本项研究所用航磁数据由云南省地质调查局提供,在此深表感谢。

参考文献

- [1] 赵鹏大.成矿定量预测与深部找矿[J].地学前缘,2007,14(5): 142-149.
- [2] 谢学锦.勘查地球化学: 发展史·现状·展望[J].地质与勘探, 2002,38(6): 1-9.
- [3] 施俊法,周平,唐金荣,等.关于金属矿床深部找矿关键技术发展战略的思考[J].地质通报,2009,28(2): 198-207.
- [4] 陈永清,赵鹏大.综合致矿地质异常信息提取与集成[J].地球科学——中国地质大学学报,2009,34(2): 325-335.
- [5] 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): 445-454.
- [6] 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.
- [7] Cheng Q M. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns[J]. Mathematical Geology, 2004,36(3): 345-360.
- [8] Cheng Q M. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999,65(3): 175-194.
- [9] Cheng Q M. The perimeter-area fractal model and its application in geology Spatial and scaling modeling for geo chemical anomaly separation[J]. Mathematical Geology, 1995,27(7): 64-77.
- [10] 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.
- [11] Zhao B B, Chen Y Q. Singular value decomposition (SVD) for extraction of gravity anomaly associated with gold mineralization in Tongshi gold field, Western Shandong Uplifted Block, Eastern China[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2011,18(1): 103-109.
- [12] Chen Y Q, Zhang L N, Zhao B B. Application of singular value decomposition(SVD) in extraction of gravity components indicating the deeply and shallowly buried granitic complex associated with tin

- polymetallic mineralization in the Gejiu tin ore field, Southwestern China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 123(4): 63–70.
- [13] Guo L F, Chen Y Q, Zhao B B. Application of singular value decomposition(SVD) to the extraction of gravity anomalies associated with Ag–Pb–Zn–W polymetallic mineralization in the Bozhushan Ore Field, Southwestern China[J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(2): 310–317.
- [14] 谢静, 常向阳, 朱炳泉. 滇东南建水二叠纪火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2006, 23(3): 349–356.
- [15] 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U–Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1478–1493.
- [16] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1–728.
- [17] 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U–Pb 定年及意义[J]. *矿床地质*, 2009, (3): 297–312.
- [18] Cheng Y B, Mao J W. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 2010, 120(3): 258–276.
- [19] Liu J S, Zhang H P, Ouyang Y F, et al. Bainiuchang super-large silver-polymetallic ore deposit related to granitic magmatism in Mengzi, Yunnan[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(4): 568–574.
- [20] 祝朝辉, 张乾, 邵树勋, 等. 云南白牛厂银多金属矿床成因[J]. *世界地质*, 2006, 25(4): 353–359.
- [21] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U–Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 967–976.
- [22] 戴婕, 张林奎, 潘晓东, 等. 滇东南南秧田白钨矿床矽卡岩矿物学特征及成因探讨[J]. *岩矿测试*, 2011, 30(3): 269–275.
- [23] Li Q M. GIS-based multifractal/inversion methods for feature extraction and applications in anomaly identification for mineral exploration[D]. Ph.D. thesis, York University, Toronto, Canada, 2005.
- [24] Andrew H C, Hunt B R. Digital image restoration[M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1977: 1–238.
- [25] Freire S L M, Ulrych T J. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling[J]. *Geophysics*, 1988, 53(6): 778–785.
- [26] Cheng Q M. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32(1): 314–324.
- [27] Cheng Q M, Agterberg F P. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(2): 234–244.
- [28] 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.
- [29] 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究[J]. *前寒武纪研究进展*, 2001, 24(2): 75–82.
- [30] 翟明国, 从柏林, 乔广生, 等. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm–Nd 和 Rb–Sr 同位素年代学[J]. *岩石学报*, 1990, (4): 1–11.
- [31] 赵风清. 华夏地块前加里东期变质基底的年代构造格架[J]. *前寒武纪研究进展*, 1999, 22(2): 39–46.
- [32] 赵风清, 金文山, 甘晓春, 等. 华夏地块前加里东期变质基底的特征以及深部地壳性质[J]. *地球学报*, 1995, (3): 235–245.
- [33] 钟自云, 柳淮之, 姚明. 右江裂谷带早三叠世玄武岩的特征[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1989, 9(1): 45–55.
- [34] 张贵山, 方维萱, 彭仁, 等. 云南个旧三叠纪高钾质火山岩锆石 U–Pb 年代学、岩石成因及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(6): 1219–1235.
- [35] Zhang J W, Dai C G, Huang Z L, et al. Age and petrogenesis of Anisian magnesian alkali basalts and their genetic association with the Kafang stratiform Cu deposit in the Gejiu supergiant tin-polymetallic district, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69(5): 403–416.
- [36] 黄行凯, 莫宣学, 喻学惠, 等. 滇东南马关和屏边地区新生代玄武岩地球化学特征及深部动力学意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1325–1337.
- [37] Chen Y Q, Zhang L N, Zhao B B. Application of Bi-dimensional empirical mode decomposition(BEMD) modeling for extracting gravity anomaly indicating the ore-controlling geological architectures and granites in the Gejiu tin-copper polymetallic ore field, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88(4): 832–840.