

滇东地区深层次 Pt-Cu-Au 矿化异常定量提取与评价

黄静宁, 赵鹏大

中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 滇东地区是我国 Cu-Au-PGE 重要的成矿远景区。采用因子分析、地质统计学和多重分形 $S-A$ 滤波等方法对滇东地区复杂地质背景下的不同层次的 Pt-Cu-Au 矿化异常进行定量提取与评价。结果表明: (1) 因子分析结果揭示滇东地区存在 3 种元素组合①Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni、②Sb-As-U-Mo、③Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au, 它们分别代表了位于扬子地块的二叠纪峨眉山玄武岩、位于华南褶皱系含碳质的沉积建造和以有色金属矿化为代表的热液矿化元素组合特征; (2) 变差函数分析表明 Pt、Cu、Au 含量在 NE 向($9^{\circ} \sim 18.6^{\circ}$) 上变化最连续, 元素含量变化的最大变程范围约 95 km; 泛克里格法揭示了 Pt、Cu、Au 含量在区域上变化具有明显的裂控-岩控特征; (3) 多重分形滤波法则细致地刻画了滇东地区与矿化有关的局部异常特征, 有效地提取了 Pt、Cu、Au 隐蔽矿化异常信息, 其结果可作为圈定 Pt-Cu-Au 找矿靶区的重要依据; (4) 不同的数学方法可用以解决不同层次的地质成矿问题, 因子分析和地质统计学等线性方法可研究区域成矿地质背景、揭示成矿元素及其元素组合在区域上的空间变化特征, 而 $S-A$ 滤波等非线性方法能够有效提取深层次局部矿化异常信息。

关键词: 滇东; Pt-Cu-Au; 因子分析; 地质统计学; 多重分形滤波; 矿化异常。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0365-10

收稿日期: 2008-12-26

Quantitative Extraction and Estimation of Conceal Mineralization Anomalies of Pt-Cu-Au in Eastern Yunnan Province

HUANG Jing-ning, ZHAO Peng-da

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

Abstract: Eastern Yunnan area is the important Cu-Au-PGE ore-forming perspective area in China. The factor analysis, geostatistics and multifractal $S-A$ filtering method are applied in this paper to quantitatively extract and estimate the Pt-Cu-Au mineralization anomalies from the complicated geological background. The research shows that: (1) the results of factor analysis illustrate that there are three element associations existing in eastern Yunnan area: factor I (Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni), which characterizes the element association of the Permian Er meishan basalt occurred in the Yangtze block, Similarly; factor II (Sb-As-U-Mo), which characterizes the carbonaceous sediment formation occurred in the South China fold system and factor III (Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au), which represents the hydrothermal mineralization with the base metal mineralization as the typification; (2) the semivariation analysis illustrates that the concentrations of Pt, Cu and Au are continuous in NE trend ($9^{\circ} \sim 18.6^{\circ}$) and the maximal ranges are about 95 km. The geochemical maps obtained by the universal Kriging imply that the concentration distributions of Pt, Cu and Au are mainly controlled by the faults and magmatism; (3) the multifractal $S-A$ filtering method characterizes the detailed information of local mineralization and extracts the conceal mineralization information. The anomaly maps delineated by the $S-A$ method may provide important evidence for Pt-Cu-Au targeting; (4) different geological and ore-forming problems can be solved by different geomathematic methods. The linear geomathematic methods such as the factor analysis and geostatistics can be used to explore the regional ore-forming background and the regional spatial variability of the ore-forming elements and the element associations, while the nonlinear geomathematic methods such as $S-A$ method are efficient in extracting the local ore-forming information. These methods are of benefit to the concealed ore-forming anomaly information extraction.

Key words: eastern Yunnan Province; Pt-Cu-Au; factor analysis; geostatistics; $S-A$ method; mineralization anomaly.

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 项目(No. 2006AA06Z113); 国家自然科学基金项目(No. 40772197); 国家科技支撑计划项目(No. 2006BAB01A03); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助。

作者简介: 黄静宁(1982-), 女, 在读博士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: hjn82@126.com

矿产勘查已进入以信息找矿为特征的科学找矿阶段,有效地提取与矿化有关的异常信息是现代矿产资源评价中的重要步骤(陈永清等,2008)。单纯地依赖野外露头等地质标志的传统找矿方法找矿已愈来愈困难,当今的矿产勘查面临着“难识别、难发现和难利用”的三难局面,因此,深层次矿化信息的获取成为当今矿产勘查的关键。深层次矿化信息是指传统的方法技术难以识别的矿化信息,通常包括隐蔽矿化信息、深部矿化信息和复杂地质背景下提取的特定信息(赵鹏大,1995)。滇东地区是我国 Cu-Au-PGE 重要的成矿远景区,亦是我国最大的 Pt、Pd、Cu 地球化学省(成杭新等,1998; Xie and Cheng, 2001; Xie *et al.*, 2004),区内成矿地质条件复杂,元古宙的昆阳裂谷作用、晚古生代的基性岩浆活动和燕山期酸性岩浆活动等一系列地质异常事件的发生使该区具有复杂的地质成矿背景(龚琳等,1996;赵鹏大等,1999;高振敏等,2002;刘家铎等,2007)。本文尝试综合应用因子分析、地质统计学和多重分形滤波等技术分别研究滇东地区 Pt、Cu、Au 成矿地质背景及元素组合特征、成矿元素含量空间变化特征及其控制因素,并进行隐蔽矿化异常的定量提取与评价。

因子分析能够从元素内在联系上确定与成岩成矿有关的元素共生组合,而因子得分图可以从空间上揭示组合异常与地质体(地层、岩体、矿体)的关系(Davis, 1973; 张本仁, 1989; Agnew, 2004)。地质统计学的变差函数可定量表征区域地球化学元素空间变化的结构性特征,泛克里格法绘制的地球化学图可揭示成矿元素区域矿化异常特征及影响元素含量空间变化的因素(张本仁, 1989; 胡光道, 1990; 王世称等, 2000; 张仁铎, 2001; 赵鹏大, 2004)。然而,地质成矿作用是一种非线性过程,地球化学元素的空间变化不仅具有结构性变化特征,还具有随机性变化特征。这种随机性变化往往由致矿异常引起,具有尺度不变性特征并可由多重分形模型定量表征。基于非线性模型的多重分形滤波技术根据区域地球化学数据在频率域中具有不同的广义自相似性特征将其分解为不同的空间模式,以此来识别或分解叠加地质作用引起的与矿化有关的异常(成秋明, 2006a; Cheng, 2006b; 陈永清等, 2006)。综合应用三种数学方法——因子分析、地质统计学和多重分形滤波法研究区域地球化学数据,可对成矿元素的区域地质背景及成矿有利性、成矿元素含量的区域变化特征及控制因素、局部矿化异常特征三方面进行综合

定量分析,从而解决不同的地质成矿问题,并获取与矿化有关的深层次矿化异常信息,为矿产勘查工作提供新思路。

本文首先对滇东地区 Pt、Pd、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、As、Sb、B、U、Cr、Ni、Co、V 等 18 种元素进行因子分析,分析该地区 Pt、Cu、Au 成矿有利性,然后用地质统计学方法研究 Pt、Cu、Au 含量在区域上的空间结构变化特征及其控制因素,最后用多重分形滤波法提取研究区内与 Pt、Cu、Au 局部矿化有关的异常信息。

1 研究区地质概况

研究区位于东经 $102^{\circ}00' \sim 104^{\circ}30'$ 、北纬 $22^{\circ}40' \sim 26^{\circ}40'$ 的云南省东部地区(简称滇东)。区内成矿地质条件复杂,由 3 个一级大地构造单元构成,以红河断裂为界,其南西侧为印支地块,红河断裂以北,以小江断裂连接弥勒—师宗断裂为界,其北西侧为扬子地块,南东侧为华南褶皱系;每个地块都有其复杂的地质成矿演化历史(张翼飞等,1993)。区内金属矿产资源丰富,朱炳泉等(2000)以铅同位素地球化学数据为依据,以红河断裂为界将其划分为两个成矿带:南北向的滇中成矿带和北西向的红河成矿带。前者位于扬子地块和华南褶皱系,扬子地块主要矿床有产于中新元古界昆阳群与黑色岩系有关的东川超大型层控型铜矿床和产于中新元古界大红山群大红山式火山岩型(铁)铜矿床(范德廉等,2000, 2004);华南褶皱系产有与燕山期花岗岩有关的个旧超大型锡多金属矿床等。后者产于印支地块,主要矿床有:与印支期基性—超基性侵入岩(160~170 Ma)有关的铜镍硫化物矿床(白马寨)、与喜马拉雅期构造岩浆活动有关的金(长安)—金(铜铅锌)(大坪)热液矿床和斑岩型铜(钼)矿床(铜厂街)(熊德信等,2007)。

研究表明,滇东地区主要存在两类 Pt-Pd 含矿建造:一类是发育于扬子地台西南缘与二叠纪峨眉山玄武岩有关的 PGE-Cu-Au 含矿建造;另一类是与形成于不同地质时期大陆裂谷黑色岩系(中—新元古界昆阳群,上震旦—下寒武系等)有关的 Pt-Pd-Mo-Cu 含矿建造(图 1)。二叠纪峨眉山玄武岩是峨眉山大火成岩省的重要组成部分(陶琰等,2006),其平均含量 $Cu = 196 \times 10^{-6}$, $Pt = (5.48 \sim 7.71) \times 10^{-9}$, $Pd = (5.48 \sim 6.19) \times 10^{-9}$ (张成江和李晓林,1998;陈永清等,2003)(图 1),分别是中国玄武岩相

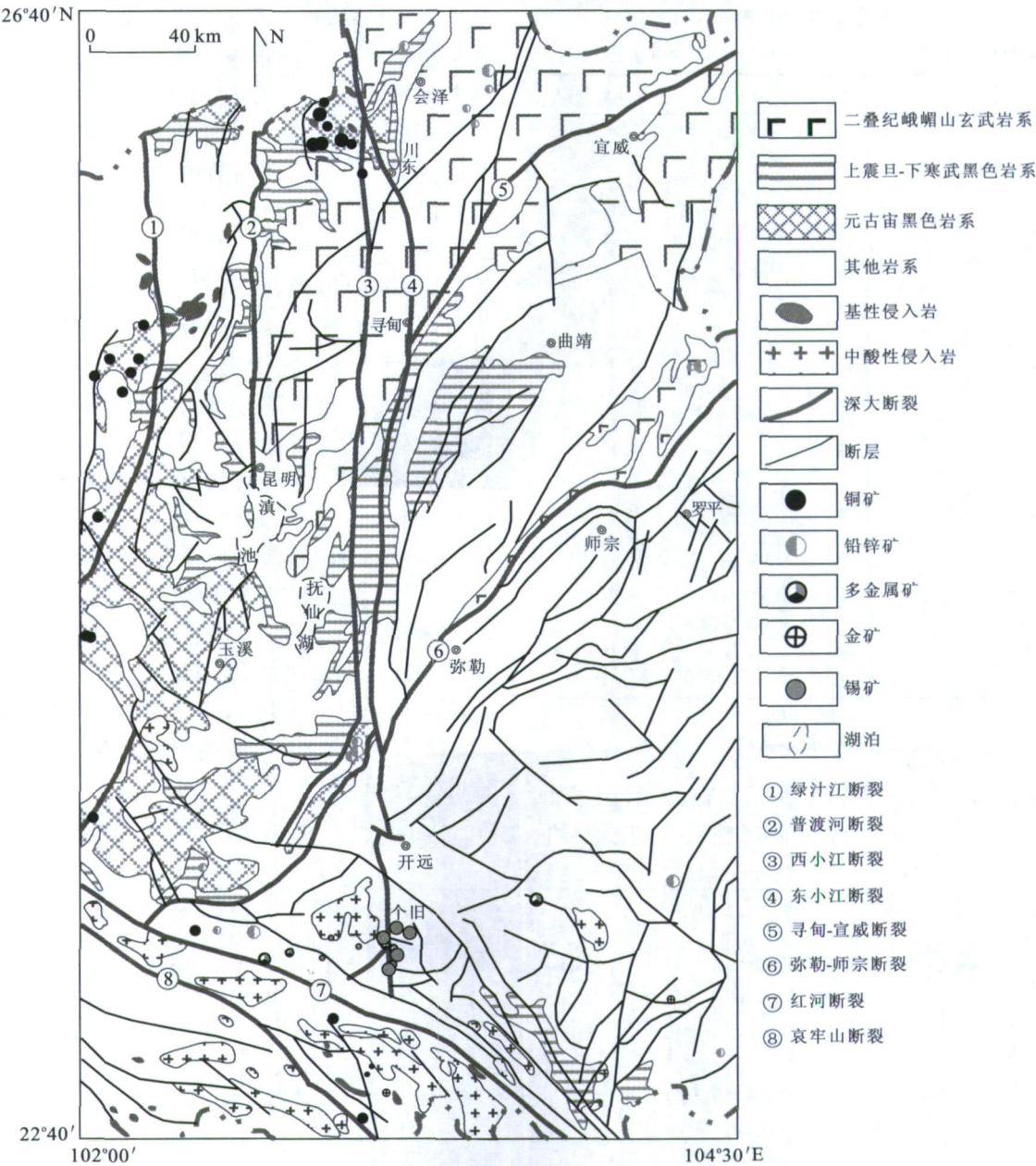


图1 滇东地质矿产简图

Fig. 1 Simplified geological map of eastern Yunnan Province

应元素含量的3.8、10~14和12~13.5倍。据报道,在贵州遵义寒武系底部发现钼铂族元素矿化,四川古元古界河口群下段碳质板岩中发现铜铂矿化,四川丹巴鱼海子地区大石包组峨眉山玄武岩中发现Au-PGE矿化(Coveney and Chen, 1991;王登红等, 2007;王敏和孙晓明, 2007)。

2 滇东地区 Pt、Cu、Au 成矿有利性分析

本文采用滇东地区 1 : 20 万水系沉积物化探组

合副样,按 8 km×8 km 面积分别将 64 件样品均匀混和后缩为 1 件样品,用化学预富集光谱法(C-OES)分析测定了Pt、Pd 含量,同时获取了云南省地调院信息中心提供的同尺度下 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、As、Sb、B、U、Cr、Ni、Co、V 等 18 种元素含量数据.对以上 18 种元素共 1 616 件样品进行了旋转(正交)因子分析,前 3 个因子累计贡献方差达到 70%以上,较好地反映了样品之间的大部分信息(表 1).其结果表明,研究区主要存在 3 种主要元素组合:(1) Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni; (2) Sb-As-U-Mo;

表 1 因子正交旋转载荷
Table 1 Orthogonal rotation factor loadings

元素	F1	F2	F3
Cu	0.877	0.162	0.217
Pd	0.871	-0.081	0.056
Co	0.870	0.313	0.040
Pt	0.847	-0.131	0.048
V	0.817	0.429	0.002
Cr	0.744	0.502	0.005
Ni	0.711	0.573	0.143
B	-0.557	0.049	0.198
Au	0.463	0.316	0.433
Sb	0.050	0.796	0.338
As	0.013	0.786	0.434
U	0.153	0.779	0.141
Mo	0.274	0.747	0.202
Pb	-0.013	0.244	0.863
Ag	0.026	0.031	0.825
Zn	0.477	0.370	0.620
W	-0.249	0.478	0.617
Sn	0.053	0.380	0.578
因子载荷	5.650	4.003	3.188
累计贡献方差(%)	31.387	53.624	71.337

(3) Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au.

在此基础上编制了 3 个因子的得分图, 因子 1 (Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni) (图 2a) 反映二叠纪晚期的

基性岩浆活动, 得分高值(因子得分 0.7) 区域与二叠纪峨嵋山玄武岩分布范围基本一致, 主要沿 SN 向普渡河断裂、小江断裂和 NE 向寻甸—宣威断裂展布. 因子 1 除了在研究区北部大范围的玄武岩分布区具有多个明显的高值中心外, 红河断裂的南侧基性侵入岩体附近也具有一个高值中心. 因子 2 (Sb-As-U-Mo) (图 2b) 得分高值与在区域内三叠系黑色页岩建造吻合, 高值中心多位于地层复杂变化地区, 反映了 Sb、As、U、Mo 在不同层位的初始富集. 该地区属于华南褶皱系, 三叠纪中期该区沉降为海陆相交互环境, 接受为时不长的沉积, 岩石类型为泥岩、板岩、粉砂岩、砂岩夹炭质页岩、泥灰岩和灰岩夹煤层、煤线, 富含有机物, 现已有研究证明在该区的含煤地层发现 Pt 矿化, 含量达 2.1 g/t(杨勤生, 2001). 根据地质异常致矿理论(赵鹏大等, 1999), 滇东南三叠系地层复杂多变地区(因子 2 得分高值中心) 亦是值得关注的 Pt 成矿远景区. 因子 3(Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au) (图 2c) 反映了与有色金属热液矿化活动有关的元素组合, 与已知矿床, 如个旧锡多金属矿和金平金矿, 具有较高的相关性, 是寻找相关矿产的重要标志.

总之, 因子分析的结果有效地反映了研究区内

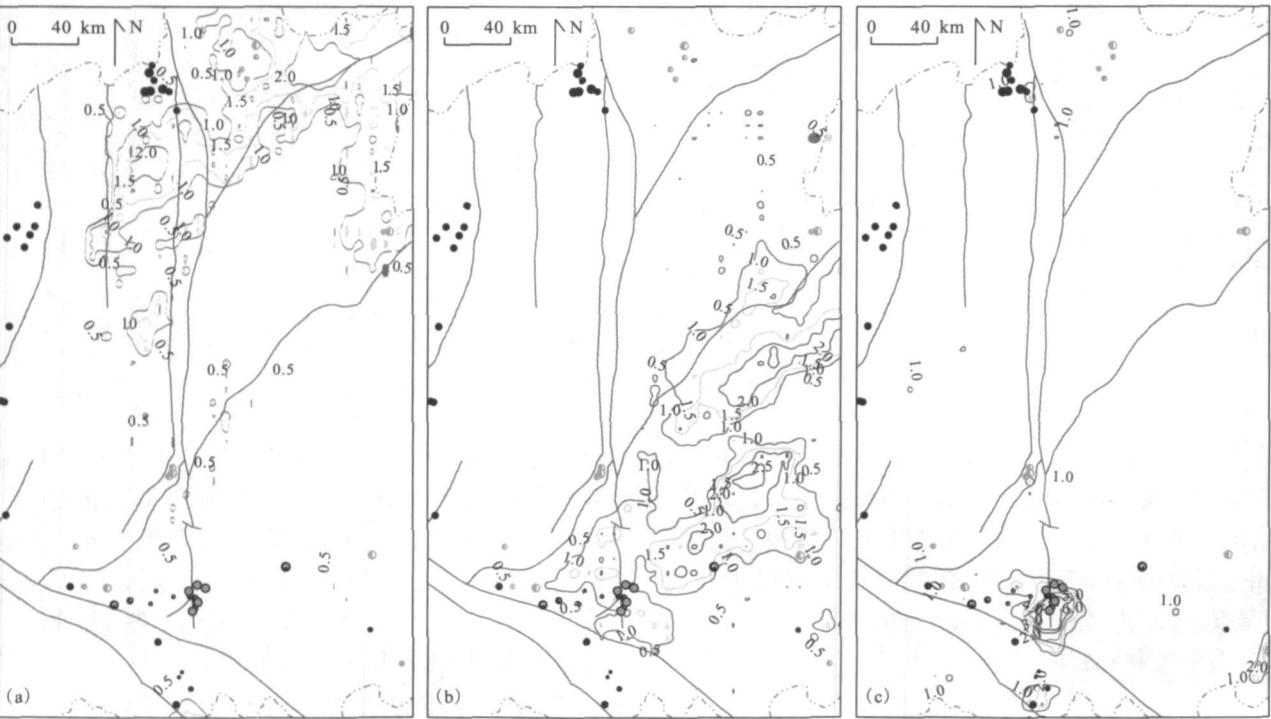


图 2 F1、F2、F3 因子得分图

Fig. 2 Factor score maps of F1, F2 and F3

F1= Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni; F2= Sb-As-U-Mo; F3= Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au

元素的共生组合规律和区域成矿地质特征.

3 Pt、Cu、Au 地球化学特征

3.1 Pt、Cu、Au 含量统计特征

Pt、Cu、Au 统计参数列于表 2, 表明滇东地区的 Pt、Cu、Au 相对于中国大陆玄武岩显著富集($K>1.25$), 在研究区内具有较高的区域地球化学背景, Pt、Cu、Au 含量近似服从对数正态分布, 元素含量离散程度较大.

3.2 Pt、Cu、Au 含量变化性及其控制因素分析

根据上述 Pt、Cu、Au 含量数据的统计分布特征, 采用 Pt、Cu、Au 原始含量数据取对数计算实验变差函数; 在计算过程中采用取样间距 8 km 作为步长, 角度容差为 22.50, 带宽容差为 4 km, Pt、Cu、Au 在空间上的含量变化呈现各向异性特征, 并均具有块金常数, 表明在该观测尺度下反映出了 Pt、Cu、Au 空间变化特征的部分结构性, 其他以随机形式——块金常数表现出来(胡光道, 1990). 用球状模型拟合变差函数, 拟合后的变差函数参数见表 3.

由表 3 可见, Pt、Cu、Au 的基台值均为块金常数的 2 倍以上, 表明元素含量变化在变程范围内具有较强的相关性. 3 种元素含量变化呈现明显的各向异性特征; Pt、Cu、Au 的最大变程方向均为 NE 向($9^{\circ}\sim18.6^{\circ}$), 最大变程约为 95 km, 在该方向上 3 种元素含量变化小, 而在近 NW 向上变程小, 表明在该方向上元素含量变化大. 上述空间结构特征主要存在以下几种影响因素: (1) Pt、Cu、Au 含量分布受到 SN 向和 NE 向深大断裂的共同控制, 该方向为二叠纪峨嵋山玄武岩的走向, 因此 Pt、Cu、Au 在 NE 向($9^{\circ}\sim18.6^{\circ}$) 上的含量变化具有较好的连续性; (2) Pt、Cu、Au 含量分布在近 NW 向变化大, 很可能是由于该方向玄武岩存在明显的厚度变化; (3) 元素含量变化的最大变程范围约为 95 km, 为二叠纪峨嵋山玄武岩对 Pt、Cu、Au 含量分布的影响范围.

根据以上拟合的变差函数, 采用一次函数拟合 Pt 的趋势变化, 采用常数拟合 Cu、Au 的趋势变化, 然后应用泛克立格法编制 Pt、Cu、Au 地球化学图, 圈定其区域地球化学异常(图 3). 由图 3 可见, 在研究区北部, Pt 和 Cu 呈现出明显的不均匀分布, 均具有明显的异常浓集中心, 并具有相似的异常区域(图上代号为 Pt-a1 和 Cu-a1, 下同), 受区域深大断

表 2 Pt、Cu、Au 统计参数

Table 2 Statistical parameters of Pt, Cu and Au

元素	样品数	最小值	最大值	中位数	均值	标准差	C	K
Pt	1 625	0.40	13.70	1.90	2.50	1.94	0.54	4.6
Cu	1 736	11.14	1 192.74	52.36	72.65	67.77	52.00	1.4
Au	1 736	0.40	62.35	2.22	2.67	2.66	0.75	3.5

注: Pt、Au 的单位 10^{-9} ; Cu 的单位 10^{-6} ; C: 中国大陆玄武岩(Yan and Chi, 2005); K: 浓集系数= 研究区元素含量均值/ 中国大陆玄武岩平均含量.

表 3 拟合半变差函数参数

Table 3 Fitting semi-variogram parameters of Pt, Cu and Au

元素	最大变程方向	最大变程	最小变程	块金值	基台值	各向异性比
Pt	18.6°	98	62	0.18	0.40	1.58
Cu	9°	95	65	0.11	0.46	1.46
Au	17.9°	95	62	0.15	0.31	1.53

裂(小江断裂、寻甸—宣威断裂和弥勒—师宗断裂)和二叠纪峨嵋山玄武岩的共同控制. 除在研究区北部强烈浓集外, Cu 元素在研究区南部个旧地区还有一个具有明显浓集中心的异常(Cu-a5), 它与燕山晚期岩浆热液活动有密切联系(张欢等, 2003). Au 呈现出与 Pt、Cu 明显不同的元素浓集特征, 在研究区南部表现出比北部更强烈的浓集趋势. 研究区北部和中部 Au 的高值呈环形分布(Au-a2; Au-a3; Au-a4)且多数不具备明显的浓集中心; 研究区南部则存在多个浓集中心: 一是位于个旧地区 NE、NW 和 SN 向断裂交汇处三角地带(Au-a5)的 Au 异常, 该异常主要与燕山晚期岩浆热液活动有关(张欢等, 2003); 二是位于哀牢山地区主要与喜山期岩浆热液活动有关(熊德信等, 2007)的 Au 异常(Au-a7). 由此可见, 滇东地区 Pt、Cu、Au 含量变化在区域上具有明显的裂控—岩控特征.

4 多重分形滤波法提取 Pt、Cu、Au 矿化异常

奇异性成矿过程与正常地质过程会产生混合空间场, 对应不同的统计分布、不同尺度独立性、不同广义自相似性, 将分形理论用于异常与背景分解的已经成为国际地学前沿研究方向(成秋明, 2006). 除了元素浓度含量异常的空间特征, 由不同地质作用导致的元素浓度含量异常的频率特征, 也可用于异常的定量描述与识别(Chork and Mazzucchelli, 1989; Cheng, 1999). Cheng *et al.* (1994) 将多重分

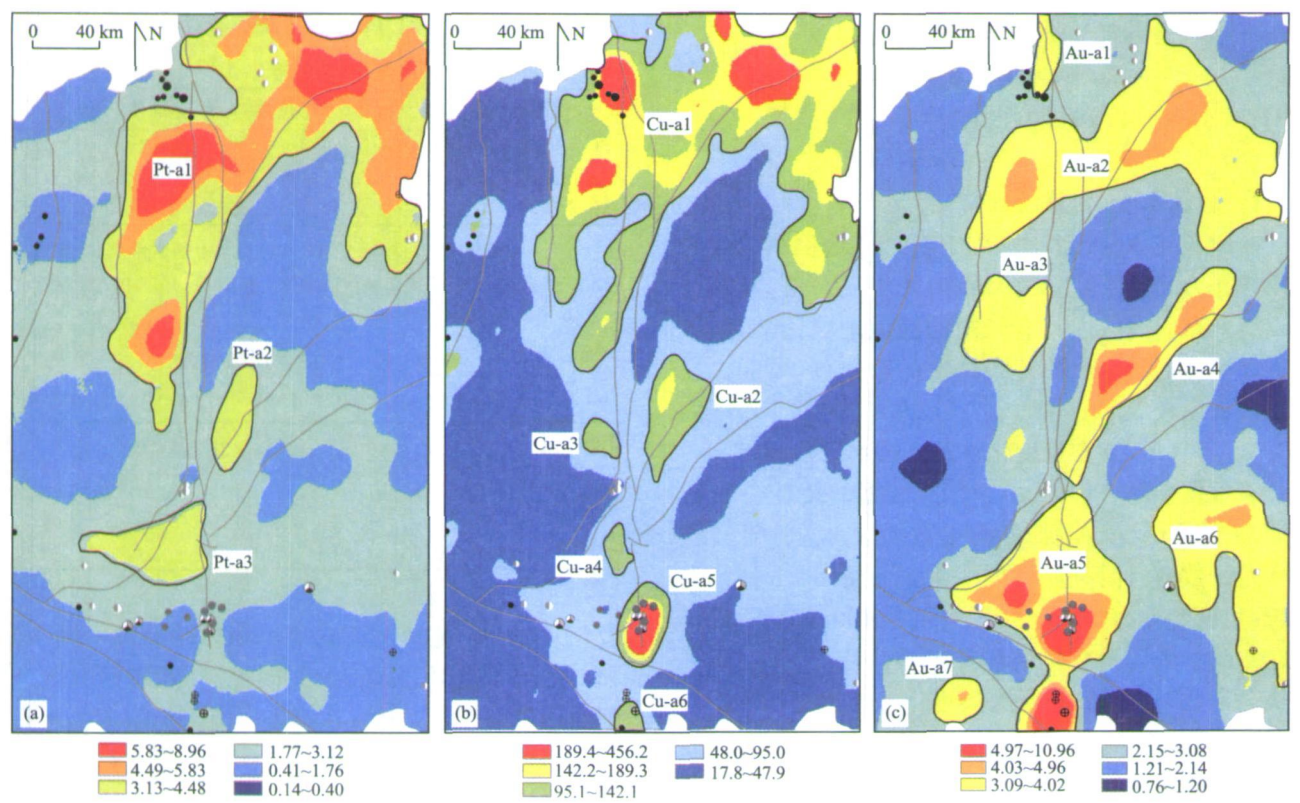


图 3 泛克里格法获取的 Pt、Cu、Au 区域地球化学异常

Fig. 3 The regional Pt, Cu, Au anomalies obtained by universal Kriging
a. Pt (10^{-9}); b. Cu (10^{-6}); c. Au (10^{-9})

形 $C-A$ 模型推广到傅立叶能谱空间, 提出了广义自相似模型 $S-A$ (Cheng, 2004). $S-A$ 模型能够在傅立叶能谱空间中度量地球化学异常所对应的各向异性的广义自相似性, 并能通过识别不同的广义自相似性将能谱的分布分解成不同的滤波器, 进而利用傅立叶逆变换对地球化学异常和背景进行分解. 这种自相似性可以由以下幂率关系所刻画:

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

这里 S 是能谱密度, A 是大于能谱密度某一临界值 (S_0) 的面积. 不同的 β 值在 $\log A(>S_0) - \log S$ 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, 可以构造各种异常滤波器和背景滤波器, 通过傅立叶逆变换将其变换到空间域中, 以实现复杂空间模式 (如区域异常和局部异常) 的分离. 该方法在国内外地球化学、地球物理和遥感致矿异常信息提取中取得了良好的应用效果 (Cheng *et al.*, 2000; Cheng, 2001, 2004, 2006b; Xu and

Cheng, 2001; 陈永清等, 2006; 成秋明, 2006a; Chen *et al.*, 2007).

本文首先对滇东地区 1 625 个水系沉积物 Pt 元素和 1 736 个水系沉积物 Cu、Au 元素含量数据进行反距离加权插值 (IDW), 然后应用 $S-A$ 法获取 3 种元素的 $\ln A(>S) - \ln S$ 关系图, 根据其幂律关系确定并构置异常分形滤波器在频率域中获取异常信息, 再通过傅立叶逆变换获得 Pt、Cu、Au 3 种元素的局部地球化学异常 (图 4).

由于滇东地区大面积分布的峨眉山玄武岩, 变差函数和泛克里格法所揭示的元素空间变化受玄武岩控制明显而具有较大的异常范围, 这种大范围的异常反映了区域矿化特征, 因此还需要提取局部与矿化有关的细节信息. $S-A$ 法克服了高背景的影响, 所获取的局部 Pt、Cu、Au 异常与已知矿床 (点) 具有较高的空间吻合程度, 并揭示了某些低背景下的矿异常, 因此, $S-A$ 法细致地刻画了与矿化有关的局部异常特征, 获得的异常图可作为圈定 Pt-Cu-Au 找矿靶区的重要依据.

$S-A$ 法获取的局部 Pt 异常 (图 4a) 主要分为 4

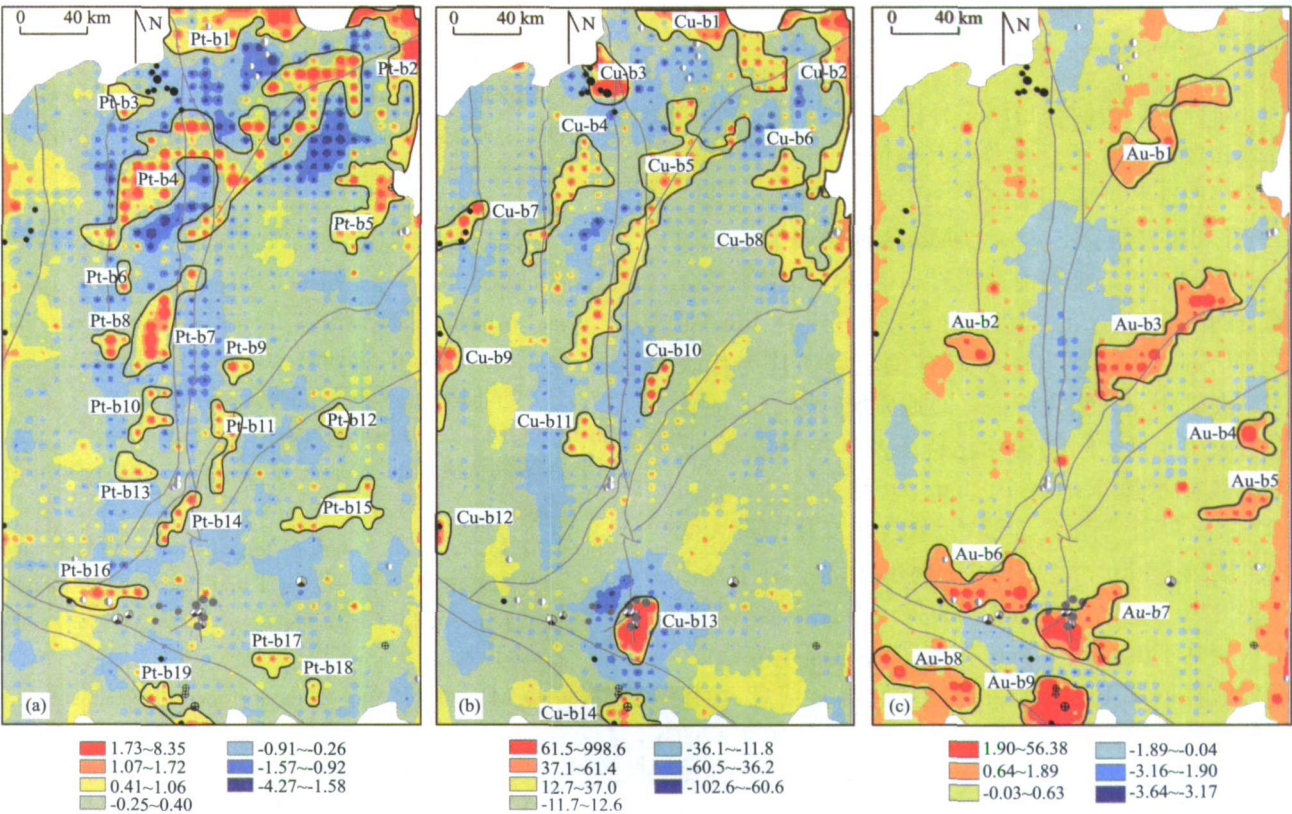


图 4 S-A 法获取的 Pt、Cu、Au 异常

Fig. 4 Local Pt, Cu, Au anomalies obtained by S-A method

类: (1) 异常规模较大, 分布范围连续, 受 SN-NE 向断裂及二叠纪峨嵋山玄武岩控制的异常 (Pt-b2; Pt-b4; Pt-b5; Pt-b6), 此类异常主要位于 SN 向断裂和 NE 断裂交汇处的二叠纪峨嵋山玄武岩分布区; (2) 与上志留一下寒武统黑色岩系有关的 Pt 异常 (Pt-b1; Pt-b3; Pt-b7) 及其与峨嵋山玄武岩接触部位的 Pt 异常 (Pt-b10; Pt-b13; Pt-b17; Pt-b18); (3) 位于华南褶皱系三叠系地层中的局部 Pt 异常 (Pt-b11; Pt-b12; Pt-b13; Pt-b14; Pt-b15; Pt-b16), 可能在 Sb、As、U、Mo 富集的地层同时富集 Pt (陈永清等, 2003; 夏庆霖等, 2003); (4) 与元古界黑色页岩建造有关 (Pt-b8) 和哀牢山断裂北侧小型基性侵入岩附近 (Pt-b19) 的局部 Pt 异常, 反映这些侵入体是 Pt 矿化的有利岩体。

S-A 法获取的局部 Cu 异常图 (图 4b) 显示: (1) 东川铜矿区和个旧锡矿区具有明显的局部 Cu 异常 (Cu-b2; Cu-b13), 该异常与因子 3 的得分高值区相吻合, 与热液活动存在密切联系; (2) 局部 Cu 异常在峨嵋山玄武岩分布区表现出与 Pt 类似的异常分布并沿 NE 向玄武岩的走向呈带状连续分布 (Cu-b1; Cu-b3; Cu-b4; Cu-b5; Cu-b6; Cu-b8; Cu-b10; Cu-

b11), Cu 异常与 Pt 异常的重合表明峨嵋山玄武岩中可能存在 Pt、Cu 同时富集的现象; (3) S-A 法获取的局部 Cu 异常与已知矿床 (点) 具有较高的空间吻合关系 (Cu-b2; Cu-b7; Cu-b9; Cu-b12; Cu-b14), 表明这些异常具有一定成矿潜力。

S-A 法获取的局部 Au 异常图 (图 4c) 显示: (1) 哀牢山剪切带中存在明显的局部 Au 异常 (Au-b9), 该异常内存在已知的 Au 矿床, 在空间上与因子 1 和因子 3 的得分高值相吻合, 表现出与岩浆侵入热液活动关系密切; (2) 哀牢山断裂南西侧存在与中酸性岩浆侵入活动相关, 受北西向断裂控制的局部 Au 异常 (Au-b8); (3) 个旧锡矿区存在与热液矿化作用有关的明显金异常 (Au-b6; Au-b7); (4) 在峨嵋山玄武岩分布区, 存在两处明显 NE 向延伸的局部 Au 异常, 一处位于研究区北东部 (Au-b1), 受寻甸—宣威断裂控制; 另一处位于中东部 (Au-b3), 受弥勒—师宗断裂控制。上述异常具有一定的成矿潜力。(5) 华南褶皱系三叠系黑色页岩建造中也存在一定规模的局部 Au 异常 (Au-b4; Au-b5), 亦具有一定的成矿潜力。

5 结论

研究结果表明: (1) 因子分析结果能够揭示成矿背景和致矿异常元素组合及其空间分布特征. 滇东地区存在3种元素组合: 第一组合 Cu-Pd-Co-Pt-V-Cr-Ni 和第二组合 Sb-As-U-Mo 分别代表了位于扬子地块的二叠纪峨眉山玄武岩和位于华南褶皱系含碳质的沉积建造元素组合特征; 第三组合 Pb-Ag-Zn-W-Sn-As-Au 则反映了以有色金属矿化为代表的热液矿化元素组合特征. (2) 地质统计学方法能够揭示成矿元素空间结构变化特征及其控制因素, 变差函数显示滇东地区 Pt、Cu、Au 含量在 NNE 向 ($9^{\circ} \sim 18.6^{\circ}$) 上变化最连续, 元素含量变化的最大变程范围约 95 km; 泛克里格法揭示了 Pt、Cu、Au 含量在区域上变化具有明显的裂控—岩控特征. (3) *S-A* 法刻画了滇东地区与矿化有关的局部异常特征, 有效地提取了 Pt、Cu、Au 隐蔽矿化异常信息, 由该法获取的异常图可作为圈定 Pt-Cu-Au 找矿靶区的重要依据. (4) 不同的数学方法可以解决不同的地质成矿问题, 因子分析和地质统计学等线性方法可研究区域成矿地质背景、揭示成矿元素及其元素组合在区域上的空间变化特征, *S-A* 滤波等非线性方法对提取局部矿化异常信息是有效的, 以上方法可在深层次矿化异常信息提取中推广应用.

References

Agnew, P. D., 2004. Applications of geochemistry in targeting with emphasis on large stream and lake sediment data complications. SEG Conference, Sydney, 2004.

Chen, Y. Q., Chen, J. G., Wang, X. Q., et al., 2008. Quantitatively integrated assessment techniques for mineral resources based on GIS. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chen, Y. Q., Huang, J. N., Zhang, S. Y., 2007. Application of multi-fractal filtering in geochemistry data decomposing—A case study from the south region of “Sanjiang ore-forming belt”, south-western China. In: Milkereit, B., ed., Proceedings of Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Exploration 07, Volume Two, Toronto, 985—988.

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. *China Geology*, 30(3): 225—234 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. Q., Zhang, S. Y., Xia, Q. L., et al., 2006. 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. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 861—866 (in Chinese with English abstract).

Cheng, H. X., Xie, X. J., Yan, G. S., et al., 1998. Platinum and palladium abundances in floodplain sediment and their geochemical provinces. *Geochimica*, 27(2): 101—107 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Q. M., 1999. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 65(3): 175—194.

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., 2004. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*, 36(3): 345—360.

Cheng, Q. M., 2006a. Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S) models. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 337—348 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Q. M., 2006b. Multifractal modelling and spectrum analysis: Methods and applications to gamma ray spectrometer data from southwestern Nova Scotia, Canada. *Science in China (Series D)*, 49(3): 283—294.

Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109—130.

Cheng, Q. M., Xu, Y. G., Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum analysis for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9(1): 43—51.

Chork, C. Y., Mazzucchelli, R. H., 1989. Spatial filtering of exploration geochemical data using EDA and robust statistics. *Journal of Geochemical Exploration*, 34(3): 221—243.

Coveney, R. M. Jr., Chen, N. S., 1991. Ni-Mo-PGE-Au rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States. *Mineralium Deposita*, 26(2): 83—88.

Davis, J. C., 1973. Statistical data analysis in geology. John Wiley & Sons.

Fan, D. L., Zhang, T., Ye, J., et al., 2000. Supperlarge deposits related to black shale. In: Tu, G. Z., ed., Supper-

- large deposits in China (I). Science Press, Beijing, 204—218 (in Chinese).
- Fan, D. L. , Zhang, T. , Ye, J. , et al. , 2004. Black rock series and it's mineral deposits in China. Science Press, Beijing, 76—135 (in Chinese).
- Gao, Z. M. , Li, H. Y. , Yang, Z. S. , et al. , 2002. Mineralization and mineral exploration of the major types of gold deposits in area cross Yunnan and Guizhou provinces. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Gong, L. , He, Y. T. , Chen, T. Y. , et al. , 1996. Proterozoic rift copper deposits in Dongchuan, Yunnan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hu, G. D. , 1990. Research on regional geochemical mathematical model. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Liu, J. D. , Zhang, C. J. , Li, Y. G. , et al. , 2007. Mineralization system of metallic deposit in Panxi region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tao, Y. , Hu, R. Z. , Wang, X. Z. , et al. , 2006. The Cu-Ni-PGE mineralization in the Emeishan large igneous province—Geochemical study on some typical deposits. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25 (3): 236—244.
- Wang, D. H. , Luo, Y. N. , Qu, W. J. , et al. , 2007. Geology, geochemistry and exploration of PGE deposits in SW China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, M. , Sun, X. M. , 2007. Geology, geochemistry and genesis of PGE-poly-metallic deposits in the black rock series, southern China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, R. D. , Hu, G. D. , 1988. Linear geostatistics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, S. C. , Chen, Y. L. , Xia, L. X. , 2000. Theory and method of integrated prognosis of mineral resources. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xia, Q. L. , Chen, Y. Q. , Zhao, P. D. , 2003. Platinum and palladium geochemical exploration and evaluation in eastern Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 22(9): 704—707 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J. , Cheng, H. X. , 2001. Global geochemical mapping and its implementation in the Asia Pacific region. *Applied Geochemistry*, 16(11—12): 1309—1321.
- Xie, X. J. , Liu, D. W. , Xiang, Y. C. , et al. , 2004. Geochemical blocks for predicting large ore deposits—Concept and methodology. *Journal of Geochemical Exploration*, 84(2): 77—91.
- Xiong, D. X. , Sun, X. M. , Shi, G. Y. , 2007. Geochemistry and metallogenic model of Ailaoshan Cenozoic orogenic gold belt in Yunnan Province, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yan, M. C. , Chi, Q. H. , 2005. The chemical compositions of the continental crust and rocks in the eastern part of China. Science Press, Beijing, 64—66.
- Yang, Q. S. , 2001. Metallogenetic characteristics and prospecting in the black rock series of East Yunnan and the neighbourhood. *Yunnan Geology*, 20(1): 59—72 (in Chinese).
- Zhang, B. R. , 1989. Theory and method of ore-belt geochemical research. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, C. J. , Li, X. L. , 1998. Geochemical characteristics of platinum group elements in Emeishan basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 299—304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. , Gao, Z. M. , Ma, D. Y. , et al. , 2003. The genesis of the Gejiu tin deposit—A review. *Geology-Geochemistry*, 31(3): 70—75 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. D. , 2001. Spatial variability theory and its application. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Y. F. , Xu, D. Q. , Shi, Q. Q. , et al. , 1993. Regional mineral deposits summarize of Yunnan Province (Vol. 1). Yunnan Geology and Mineral Institute, Kunming (in Chinese).
- Zhao, P. D. , 1995. Mathematical geology: Review and prospect. In: Wang, H. Z. , ed. , The review of the development of China geological sciences—The festschrift of Professor Sun Y. Z. . China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhao, P. D. , 2004. Quantitative methods and application of geosciences. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, P. D. , Chen, Y. Q. , Liu, J. P. , et al. , 1999. Theory and practice of geoanomaly in mineral exploration. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhu, B. Q. , Chang, X. Y. , Qiu, H. N. , et al. , 2000. The Mesoproterozoic character of the southwestern of Yangtze block in center Yunnan and the occurrence possibility of super-large deposits In: Tu, G. Z. , ed. , China super-large deposits (I). Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈永清, 陈建国, 汪新庆, 等, 2008. 基于 GIS 矿产资源综合评价技术. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 陈永清, 张生元, 夏庆霖, 等, 2006. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 861—866.
- 成杭新, 谢学锦, 严光生, 等, 1998. 中国泛滥平原沉积物中铂、钨丰度值及其地球化学省的初步研究. 地球化学, 27(2): 101—107.
- 成秋明, 2006a. 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.
- 范德廉, 张涛, 叶杰, 等, 2000. 与黑色页岩有关的超大型矿床. 见: 涂光炽编, 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 204—218.
- 范德廉, 张涛, 叶杰, 等, 2004. 中国的黑色岩系及其有关矿床. 北京: 科学出版社.
- 高振敏, 李红阳, 杨竹森, 等, 2002. 滇黔地区主要类型金矿的成矿与找矿. 北京: 地质出版社.
- 龚琳, 何毅特, 陈天佑, 等, 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿. 北京: 地质出版社.
- 胡光道, 1990. 区域地球化学数学模型研究. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 刘家铎, 张成江, 李佑国, 等, 2007. 攀西地区金属成矿系统. 北京: 地质出版社.
- 陶琰, 胡瑞忠, 王兴阵, 等, 2006. 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿作用几个典型矿床岩石地球化学特征的分析. 矿物岩石地球化学通报, 25(3): 236—244.
- 王登红, 骆耀南, 屈文俊, 等, 2007. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿. 北京: 地质出版社.
- 王敏, 孙晓明, 2007. 华南黑色岩系铂多金属矿床地质地球化学及成因. 北京: 地质出版社.
- 王仁铎, 胡光道, 1988. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社.
- 王世称, 陈永良, 夏立显, 2000. 综合信息矿产预测理论与方法. 北京: 科学出版社.
- 夏庆霖, 陈永清, 赵鹏大, 2003. 滇东铂钨地球化学勘查及异常评价. 地质通报, 22(9): 704—707.
- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 2007. 云南哀牢山喜马拉雅期造山型金矿带矿床地球化学及成矿模式. 北京: 地质出版社.
- 杨勤生, 2001. 云南东部及邻区黑色岩系内的矿(化)特征与找矿设想. 云南地质, 20(1): 59—72.
- 张本仁, 1989. 成矿带地球化学研究的理论构想和方法. 北京: 地质出版社.
- 张成江, 李晓林, 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 岩石学报, 14(3): 299—304.
- 张欢, 高振敏, 马德云, 等, 2003. 云南个旧锡矿床成因研究综述. 地质地球化学, 31(3): 70—75.
- 张仁铎, 2001. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社.
- 张翼飞, 徐道谦, 史清琴, 等, 1993. 云南省区域矿产总结(上册). 昆明: 云南省地质矿产局.
- 赵鹏大, 1995. 数学地质: 回顾与展望. 中国地质学科发展的回顾——孙云铸教授百年诞辰纪念文集. 见: 王鸿祯主编. 武汉: 中国地质大学出版社, 174—178.
- 赵鹏大, 2004. 定量地学方法及应用. 北京: 地质出版社.
- 赵鹏大, 陈永清, 刘吉平, 等, 1999. 地质异常成矿预测理论与实践. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等, 2000. 扬子地块西南缘滇中元古宇特征及赋存超大型矿床的可能性. 见: 涂光炽编, 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社.