

doi: 10.11720/wtyht.2017.3.10

姜晓佳,陈鑫,郑有业,等.拉脊山东段地区 Au、Cu 地球化学组合异常识别与提取[J].物探与化探,2017,41(3):459-467.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.10

Jiang X J, Chen X, Zheng Y Y, et al. The recognition and extraction of Au, Cu geochemical composite anomalies: A case study of the east of Laji Mountains [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 459-467. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.10

拉脊山东段地区 Au、Cu 地球化学组合异常识别与提取

姜晓佳¹, 陈鑫¹, 郑有业^{1,2,3}, 高顺宝², 欧阳嵩¹, 张永超², 郑磊¹, 黄建²

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:为削弱拉脊山东段地区化探数据(典型的成分数据)存在的闭合效应,进一步分析该区地球化学元素空间组合分布规律,使用等距对数比变换(ilr)“打开”水系沉积物地球化学数据;采用稳健主成分分析(RPCA)构建组合模型,用于识别组合地球化学异常;通过 S-A 分形滤波技术强化弱异常并分离异常与背景,圈定地球化学致矿异常,进一步指导矿产勘查。研究表明:得到两组与矿化相关的元素组合,第一组为 Au-As,与研究区的构造蚀变岩型金(砷)矿(金源东沟等)相关;第二组为 Cu-Ni,与区域内铜镍硫化物矿床(拉水峡等)相关。S-A 滤波技术可以进一步分解组合异常,强化弱小异常,同时能够缩小强背景下的异常面积,结合研究区地质概况和分解后的异常图可以进一步指导该地区构造蚀变岩型 Au(As)矿和铜镍硫化物矿床的找矿勘查工作。

关键词:等距主成分分析;稳健主成分分析;多重分形滤波;组合异常提取;拉脊山东段

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)03-0459-09

0 引言

由于地球化学元素携带了某种矿化信息,研究地球化学元素的空间分布特征可直接或间接地揭示矿化溯源问题。随着勘查地球化学的深入研究,地球化学异常评价已成为人们关注的焦点^[1-4]。

对地球化学元素组合的识别,主成分分析是十分有效的方法,但是地球化学数据作为典型的成分数据,其闭合效应可能使原始数据在主成分分析过程中产生虚相关^[5-8]。为了削弱闭合效应的影响,地球化学数据需要进行“打开”预处理。目前“打开”数据的方法主要有 clr、alr、ilr 和 log 变换,Car-
ranza 详细对比了上述 4 种方法在水系沉积物地球化学异常圈定中的应用效果,结果表明:相对于对数

变换而言,对数比变换(alr、clr 和 ilr)没有提高圈定单元素异常的精度,而进行 clr 或 ilr 变换后却能提高多元素组合异常识别的精度^[9]。此外,基于 MCD 的稳健主成分分析(RPCA)方法可以较好地解决传统主成分分析无法处理奇异值的问题,因此受到勘查地球化学家的青睐^[10-13]。

在区域地球化学异常信息提取过程中,除了分析其元素组合关系外,更关键的在于背景与异常的分解。对于背景和异常的分离,目前主要有以下方法:基于经典统计学的均值标准差法(Mean+2SD)、基于稳健统计学的中位数绝对偏差法(Median+2MAD)、Tukey 箱图法(Q3+L5MQR)和分形(多重分形方法),以及基于百分数的累积频率法(98%)等。考虑到地球化学数据的自相关性,分形(多重分形)方法在确定地球化学异常中具有非常广泛的

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 中国地质调查局“青海省甘德县青珍矿产远景调查”(12120113031400)

作者简介: 姜晓佳(1992-),男,硕士研究生,矿产普查与勘探专业,主要从事成矿规律与成矿预测研究工作。Email:jiangxiaojia1992@163.com

通信作者: 郑有业(1962-),男,长江学者特聘教授,博士生导师,主要从事成矿规律及矿产勘查评价工作。Email:zhyouye@163.com

应用,尤其是多重分形滤波模型在分解组合地球化学异常中具有非常重要的地位^[14-16]。

笔者对青海拉脊山东段水系沉积物数据使用稳健多元统计和分形(多重分形)方法进行处理,确定矿化间的关系,进而识别矿化组合异常,为该地区进一步找矿提供方向。

1 区域地质概况

研究区位于南祁连和中祁连两个古陆块之间的拉脊山造山亚带东南端(图 1a)^[17], 出露地层主要为元古宇化隆岩群、下古生界火山岩、中生界沉积序列、新生界碎屑岩及松散堆积物(图 1b)。

六道沟组为一套中基性火山岩,与正常沉积碎屑岩、碳酸盐岩呈互层状组合^[18],其火山岩是区域火山岩型铜镍矿的重要赋存围岩^[19-20]。该区岩浆侵入活动和火山喷发活动发育,侵入岩主要以中酸性侵入岩为主,少量基性、超基性岩与火山岩共生^[21]。中—酸性岩浆侵入演化过程对本区岩浆热液矿床的形成和火山岩有关矿床物质成分的运移、富集、改造起着重要的作用。火山岩以海相基性熔岩为主,中性、酸性次之。与火山岩有关的矿点、矿化点较多。同造山期走向断裂的割切和边缘部位同造山期花岗岩类岩体的产出,导致区内北西向构造破碎带和热液蚀变较为发育^[22],为构造蚀变岩型矿床成矿和聚矿提供了有利的背景环境。

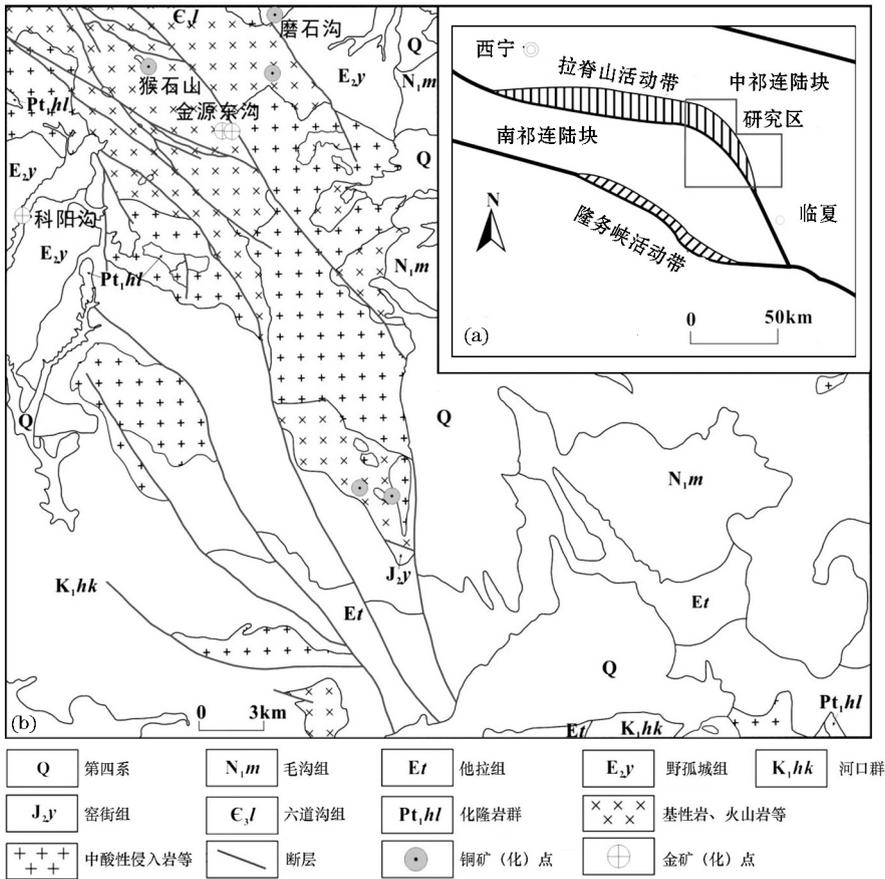


图 1 拉脊山区域构造图(a)及研究区地质简图(b)

2 地球化学数据特征分析

水系沉积物已被广泛用于识别与金属矿化有关的地球化学异常^[13,23-24]。笔者对研究区 3 个 1:5 万图幅水系沉积物数据进行统计,得到地球化学数据 4 546 个。野外采样密度平均为 4.17 个/km², 采样面积约 1 200 km²。统计水系沉积物中 Ag、As、Au、Sb、Sn、Bi、Hg、Co、Cu、Zn、Mo、W、Pb、Cr、Ni 共 15 种

元素的地球化学数据基本特征值,分析单元素的频率分布特征(表 1)。偏度和峰度是检验元素含量分布形式的重要参数,偏度越接近于 0,峰度越接近于 3,数据分布越接近于正态分布^[25-26]。从表 1 可看出,表中数据不符合正态分布,统计其对数频率分布特征,得到 Cu、Ni、Au 的直方图与 Q-Q 图(图 2)。Au、Ni 出现一定的右偏,Cu 近似正态分布,说明主成矿元素在空间分布上并不完全服从中心极限定理,元素的分散富集在空间上可能有一定的奇异性。

表 1 拉脊山东段水系沉积物数据统计参数

参数	Ag	As	Au	Sn	Bi	Hg	Cu	Mo	W	Ni
<i>N</i>	4546	4546	4546	4546	4546	4546	4546	4546	4546	4546
平均值	0.07	16.87	3.92	2.36	0.29	0.02	33.95	0.59	1.75	44.08
中位数	0.06	12.65	1.50	2.23	0.26	0.01	26.58	0.49	1.48	28.21
标准偏差	0.09	33.63	31.24	1.15	0.23	0.03	141.93	0.52	1.42	80.63
方差	0.01	1131.30	975.85	1.32	0.05	0.00	20144.91	0.27	2.01	6501.85
偏度	36.89	28.95	38.33	9.57	12.10	17.79	63.57	8.28	9.86	10.20
峰度	1688.68	1185.24	1698.21	219.18	303.50	515.93	4196.43	119.51	194.22	135.44
最小值	0.01	1.06	0.20	0.43	0.02	0.00	0.98	0.03	0.09	0.45
最大值	4.89	1577.47	1553.00	36.79	7.49	0.99	9412.00	11.70	39.67	1487.00
25% 累积频率	0.05	8.75	1.00	1.70	0.16	0.01	17.12	0.32	1.07	16.24
50% 累积频率	0.06	12.65	1.50	2.23	0.26	0.01	26.58	0.49	1.48	28.21
75% 累积频率	0.07	17.81	2.50	2.84	0.37	0.02	39.25	0.75	2.03	44.44
95% 累积频率	0.10	35.64	8.60	3.70	0.59	0.05	68.56	1.19	3.57	120.62
98% 累积频率	0.14	61.86	20.10	4.24	0.69	0.06	90.47	1.60	4.88	191.81

注:*N* 单位为个;平均值、中位数、最大值、最小值及各累积频率中 Au、Hg 含量单位为 10^{-9} ,其余元素含量单位为 10^{-6} ;其余参数无量纲

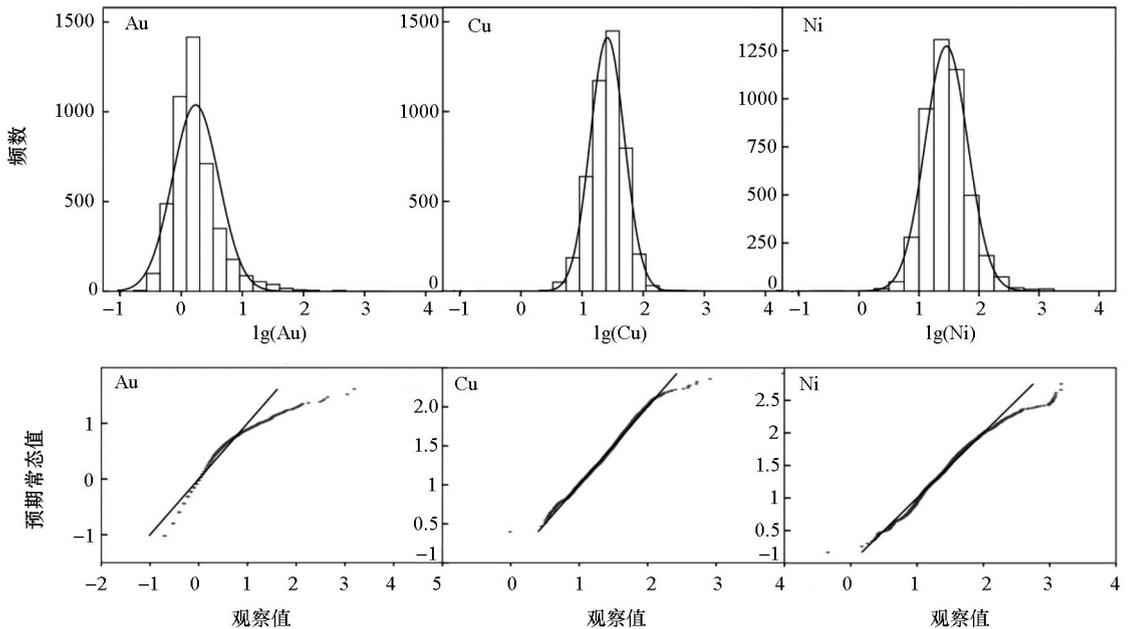


图 2 拉脊山东段水系沉积物 Au、Cu 和 Ni 元素直方图和 Q-Q 图

3 方法原理及应用

3.1 对数比变换

成分数据是指分布在有限区域内的,服从单位和约束条件的数据,因此地球化学元素含量数据被视为典型的成分数据^[27]。对数比变换是根据成分分量的比值不受“定和”限制的影响,以及比值的对数常常服从正态分布的特点,对成分数据进行投影变换,利用特定的标准正交基来表现数据特征,具体定义^[7,11,28]如下:

$$S^D = \left\{ \text{成分数据} = (x_1, \dots, x_D)', x_i > 0, \sum_{i=1}^D x_i = k \right\}, \quad (1)$$

其中 S^D 为成分数据的单形空间, k 为任意常数^[29]。

则 3 种对数变换函数为:

$$\text{alr}(X) = \ln \frac{x_i}{x_j} \quad (i = 1, 2, \dots, D-1), \quad (2)$$

$$\text{clr}(X) = \ln \frac{x_i}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, D), \quad (3)$$

$$\text{ilr}(X) = \sqrt{\frac{i}{i+1}} \ln \left[\frac{\sqrt{\prod_{j=1}^i x_j}}{x_{i+1}} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, D-1), \quad (4)$$

其中 X 为某一观测成分数列, x_i 为第 i 个成分分量, x_j 为第 $i+1$ 个成分分量, D 为成分分量的个数。

通过以上变换可以将成分数据从单形空间变换到欧式空间,以满足主成分分析的数据要求。此外这 3 种对数比变换之间存在着紧密的关系,可以实现成分数据在三者之间的空间变换与逆变换^[11]。

3.2 稳健主成分分析

主成分分析通过线性变换的方式构建少数几个重要的新变量,从而最大程度解释原多变量信息,其目的是把数据从高维空间降至低维空间,即用少数几个主成分反映变量的变异程度^[30]。稳健的主成分分析特点是克服了传统主成分分析方法的不足^[27],用 MCD (minimum covariance determinant) 最小协方差行列式估计^[31]来代替协方差以减少异常值的影响。对于一个有限的观测样本集 $\{x_1, \dots, x_n\}$, MCD 的估计量最终是由所选取的大小为 h 的子集 $\{x_{i_1}, \dots, x_{i_h}\}$ 在迭代过程中计算出的协方差矩阵具有最小行列式值子集所决定,进而求得稳健估计量 T_{med} 和 C_{med} 。则马氏距离、总体样品均值及稳健协方差定义为:

$$d(i) = \sqrt{(x_i - T_{\text{med}}) C_{\text{med}}^{-1} (x_i - T_{\text{med}})'}, \quad (5)$$

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i (x_i - T_{\text{med}}) (x_i - T_{\text{med}})'}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (7)$$

其中 ω_i 为第 i 个样本点的权值,由 $d(i)$ 使用加权距离法求得,并在此稳健协方差基础上计算其特征值和特征向量进行主成分分析^[32]。

3.3 多重分形滤波技术

多重分形滤波 (S-A) 是将 C-A 模型运用傅里叶变换推广到频率域中,以实现背景和异常的分。傅里叶正变换 (FT) 和逆变换 (IFT) 分别定义为^[33]:

$$F(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos(\omega_x x + \omega_y y) dx dy - i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \sin(\omega_x x + \omega_y y) dx dy, \quad (8)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_x, \omega_y) \cos(\omega_x x + \omega_y y) dx dy - \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_x, \omega_y) \sin(\omega_x x + \omega_y y) dx dy. \quad (9)$$

式(8)、式(9)中, $F(\omega_x, \omega_y)$ 代表频率域中的信号, $f(x, y)$ 代表空间域中地球化学图, ω_x 和 ω_y 分别代表 x, y 轴的“波数”(wave numbers), $i^2 = -1$ 。

基于成秋明^[34]建立了多重分形场的“能谱密度-面积”(S-A)分形模型

$$A(S \geq s) \propto S^{-\beta}, \quad (10)$$

其中 $A(S \geq s)$ 表示能谱密度 ($S = \|F(\omega_x, \omega_y)\|$) 大于某一值 s 的区域面积, β 为分维数, \propto 代表成正比^[35]。 β 值的确定可以在其双对数图上进行,将散点图用最小二乘法拟合成 3 段直线,找出合适的分界面 $s_1, s_2 (s_1 < s_2)$, 从而构造分形滤波器。采用该分形滤波器可以将地球化学元素组合图分解成为 3 个不同的成分,即噪声、背景和异常^[36]。从噪声、异常和背景的关系看,能谱密度小于 s_1 的部分为噪声;能谱密度大于 s_2 的部分为背景;能谱密度介于 s_1 与 s_2 之间的部分为异常。由此在能谱密度空间构建异常分形滤波器

$$G(\omega_x, \omega_y) = \begin{cases} 1, & s_1 \leq S(\omega_x, \omega_y) \leq s_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \quad (11)$$

用异常分形滤波器滤波:

$$FF(\omega_x, \omega_y) = F(\omega_x, \omega_y) * G(\omega_x, \omega_y). \quad (12)$$

然后运用傅里叶逆变换将 $FF(\omega_x, \omega_y)$ 从频率域转换为空间域的地球化学组合异常图。背景的分离与异常方法类似。

3.4 方法应用

由于水系沉积物数据属于成分数据且稳健协方差矩阵与协方差关系密切,会受到成分数据闭合效应的影响,会使求得的稳健协方差存在虚相关,所以在稳健主成分分析之前有必要对原始数据进行对数比变换,以减弱成分数据闭合效应对稳健主成分分析的影响。由于 alr 变换分母的选择存在人为性,clr 变换后所有变量之和为 0 (即矩阵奇异问题,结果数据是平行的)^[9,11,30,37],所以 alr 和 clr 变换不适合运用于稳健统计学,因此采用 ilr 变换。但是 ilr 变换后数据维数降了一维,对其结果进行地质解释较为困难,所以用 ilr 变换将成分数据变换到欧式空间,并结合 RPCA 求出载荷与得分,再将载荷与得分变换到 clr 空间,以取得与原始数据的联系,从而解决了数据解释的问题^[38]。

笔者使用 log 和 ilr 变换分别打开数据,然后使用主成分分析和稳健主成分分析分别处理该地区的地球化学数据,通过对比构建的组合模型,选择效果较好的主成分及其组合元素,对其运用多重分形滤波技术构建多重分形滤波器对 PC1 (Cu-Ni 组合)、PC2 (Au-As 组合) 得分值进行背景与异常的分,其中主成分的选择是结合区域上矿产分布特征及地质概况确定。

4 组合异常识别与提取

4.1 组合异常信息识别

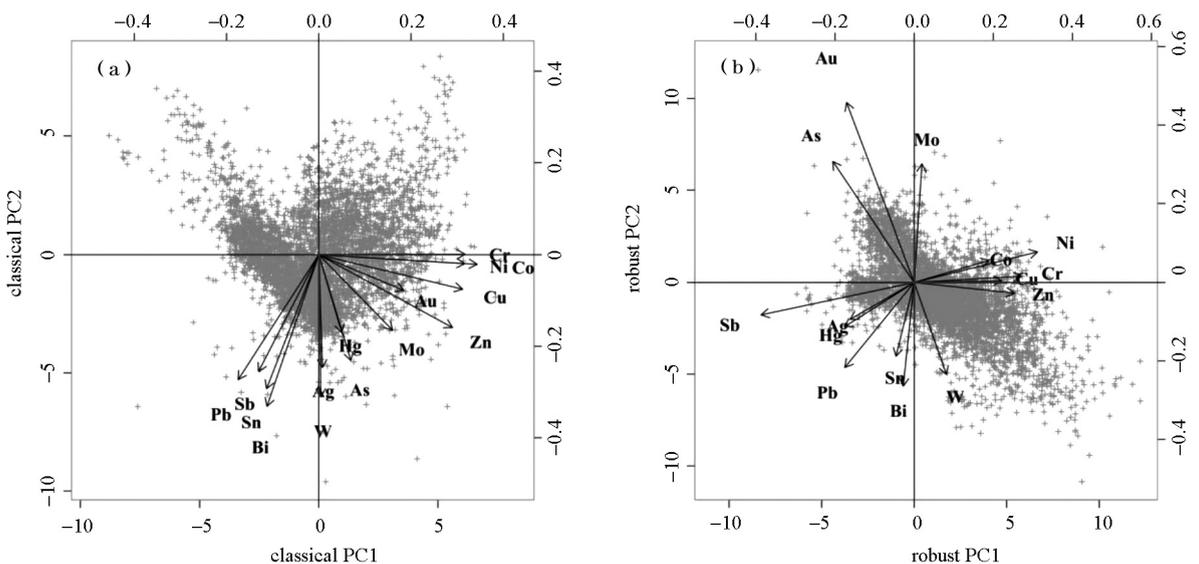
使用 ln-PCA 法和 ilr-RPCA 法对区域地球化学数据进行处理(表 2)。从表 2 中可以看出,ln-PCA 方法获得 PC1 的贡献率为 33.96%,有 11 个元素表现为正载荷,Sb、Sn、Bi、Pb 表现为负载荷,总体上表现为 15 个元素的混合信息;PC2 获得的贡献率为 25.6%,有 14 个元素为负载荷,而 Cr 贡献率为 0。从图 3a 可以看出,运用 ln-PCA 方法得出研究区水系沉积物元素表现出多元素组合特征,很难看出元素间的组合关系,这主要是由于成分数据的封闭效应引起的。

ilr-RPCA 方法获得 PC1 贡献率为 38.35%,PC2 贡献率为 24.73%(表 2),PC1 中具有较高正载荷的元素为 Cu、Ni、Co、Cr 和 Zn,表现出正的贡献率,其中 Cu-Ni 元素组合与成矿元素关系密切,可能与区域上的火山岩和与基性、超基性侵入岩有关的 Cu-Ni 矿(如拉水峡铜镍硫化物矿床等)相关;而 Co-Cr 元素组合与研究区基性—超基性岩体具有高丰度的铬、钴有关;由于区域上早古生代海相火山活动强烈,古生代侵入岩发育,形成了与火山活动有关的锌矿床,根据 Zn 在表生条件下容易迁移的地球化学性质,锌矿床经过后期改造导致 Zn 元素迁移,由于 Zn 与 Cu 化学性质相近,因此迁移到 Cu 周围。PC1 中具有较高载荷的元素为 Au、As 和 Mo,但从图 3b 中

可以看出,Au-As 两个元素之间夹角最小,相关性较强,且这两种元素均为亲铜族成矿元素,其地球化学行为相近,表现出正贡献率,表明 Au-As 元素组合与成矿元素关系密切,可能与研究区内构造蚀变岩型金矿(如金源东沟金矿点)有关;而 Mo 与 Au-As 两个元素之间夹角较大,且 Mo 为高温元素,说明 Mo 与 Au-As 元素相关性较微弱,因此认为该元素与成矿关联性不大。综上可以看出,通过 ilr“打开”数据并结合 RPCA 分析,数据得到有效的分解,元素组合关系较明确,地质解释较高。

表 2 拉脊山东段水系沉积物数据主成分载荷与贡献率

元素	ln-PCA		ilr-RPCA	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Ag	0.01	-0.31	-0.20	-0.12
As	0.09	-0.29	-0.26	0.38
Au	0.23	-0.10	-0.21	0.57
Sb	-0.16	-0.32	-0.49	-0.10
Sn	-0.14	-0.37	-0.06	-0.24
Bi	-0.14	-0.41	-0.04	-0.33
Hg	0.06	-0.21	-0.22	-0.14
Co	0.43	-0.03	0.24	0.07
Cu	0.39	-0.09	0.28	0.00
Zn	0.36	-0.20	0.32	-0.04
Mo	0.20	-0.21	0.03	0.37
W	0.01	-0.39	0.10	-0.29
Pb	-0.22	-0.34	-0.22	-0.27
Cr	0.40	0.00	0.34	0.02
Ni	0.40	-0.02	0.39	0.09
贡献率/%	33.96	25.60	38.35	24.73



注:a—ln-PCA;b—ilr-RPCA;双标图中,其上轴和右轴刻度分别表示 PC1 和 PC2 中变量载荷值(元素符号的位置代表变量载荷值),而下轴和左轴分别表示与上轴和右轴相对应的主成分得分(灰色十字符号的位置代表得分)

万方数据

图 3 拉脊山东段水系沉积物组合元素双标图

4.2 组合异常信息提取

基于 PC1 与 PC2 得分,分别运用 IDW 插值方法得到对应的栅格图像,对栅格图像运用 S-A 方法进行背景和异常分解,从中获取主成分元素得分的异常信息。在拟合的双对数曲线(图 4)中可以看出,分段信息主要分为 3 段,每段的 R^2 都大于 95%,分段效果很好。PC1 中 ($y_2 = -1.562x + 20.01, 5.44 \leq \ln S < 9.04$) 代表 Cu-Ni 组合异常, ($y_3 = -1.3216x + 17.807, 8.89 \leq \ln S < 10.12$) 代表背景,据此获得了 PC1 的组合异常图和背景图(图 5a、5b)。背景图(图 5b)中突出了与 Cu、Ni 矿化相关的高背景区,位于研究区西北部,呈北西向展布,与六道沟组火山岩、基性岩与超基性岩套合较好,具有较高的空间自相关性。Cu-Ni 组合异常图(图 5b)中分为两组异常,一组受火山岩体、超基性岩体与断裂控制;另一组受断裂与侵入岩体的接触带控制。

PC2 中 ($y_2 = -1.5538x + 19.949, 5.44 \leq \ln S < 9.25$) 代表 Au-As 组合异常, ($y_3 = -1.2346x + 16.958, 9.25 \leq \ln S < 10.11$) 代表背景,据此获得了 PC2 的异常图和背景图(图 5c、5d)。背景图(图 5d)中突出了与 Au、As 矿化相关的高背景区,主要分布在研究区东南部,高背景的展布可能是由于原生金矿风化剥蚀后金的迁移导致,因此该地区有寻找原生金矿的潜力。Au-As 组合异常图(图 5c)中异常位于研究区北北西向基性超基性火山岩及北西西向中酸性侵入岩中断裂均较发育的地方。Cu、Ni 在基性岩、超基性岩中含量较高,不易受表生化学溶解作用的影响,但易受物理风化的影响。在表生作用下 Cu、Ni 在迁移过程中不易富集,从而导致研究区东南部背景偏低,异常零散。Au、As 在高寒山区景观表生条件下以自然金相形式赋存,且易被溶解^[39],由于地形切割严重易受物理搬运的影响,在迁移过程中易于富

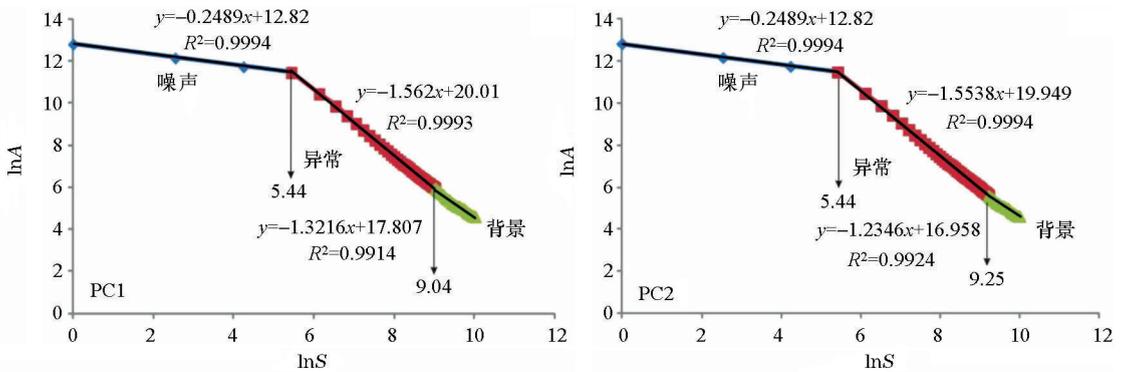
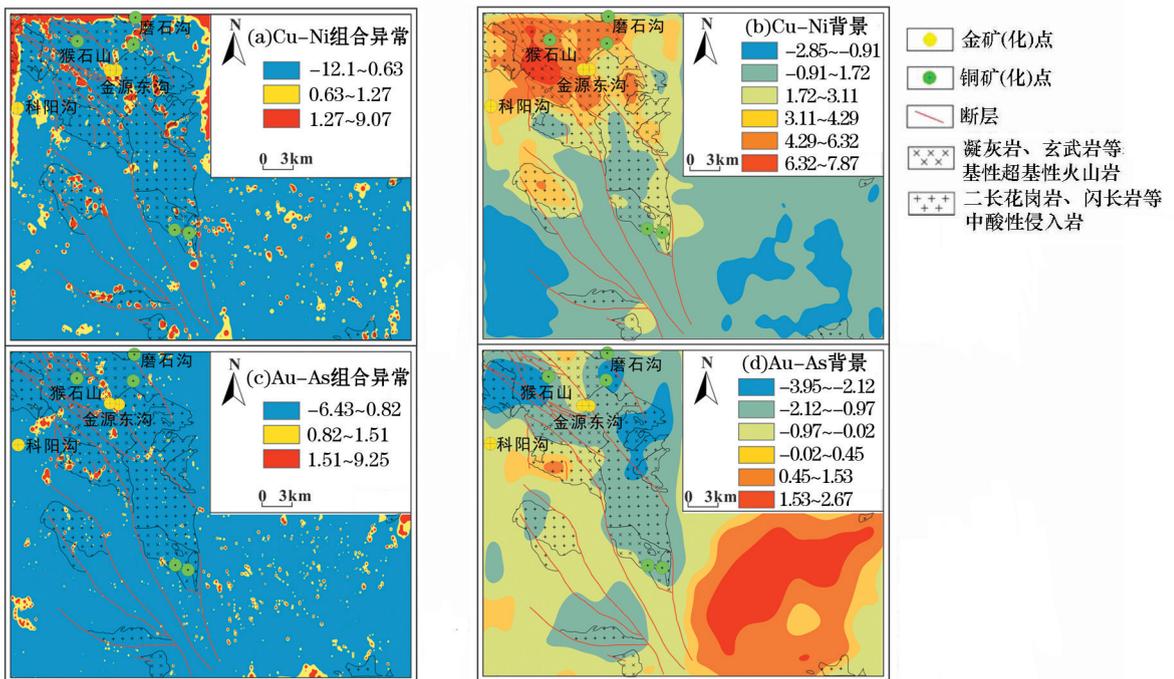


图 4 S-A 模型确定的 PC1(Cu+Ni) 和 PC2(Au+As) 元素 lnA-lnS 双对数



万方数据

图 5 S-A 模型下 Cu-Ni、Au-As 的背景图和组合异常

集^[40],所以导致研究区东南部背景高且异常零散。而已知的 Cu-Ni、Au 矿化(点)在空间上与较异常吻合,部分分布于异常中心的边缘位置,这可能与该地区地形切割严重,元素迁移导致异常发生偏移有关。此方法得到的组合异常面积进一步的缩小,有利于靶区的优选和验证。

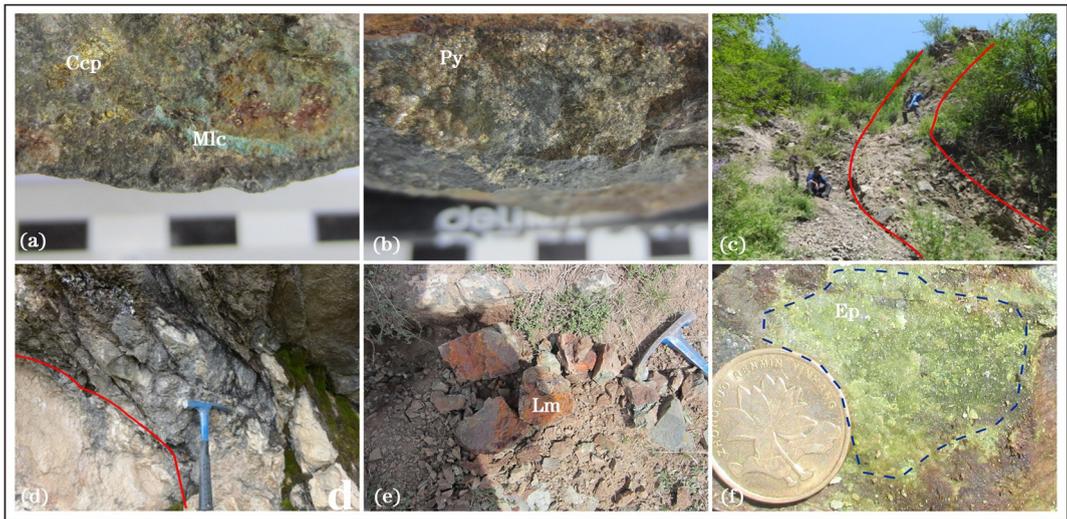
4.3 找矿方向

地球化学组合异常图上,Cu-Ni 异常主体分布于该区北西部,呈北西向带状分布,区内北北西向断层发育,地层为六道沟组火山碎屑岩及凝灰岩,并发育有基性岩岩株,结合在日阿鲁岗地区野外取回的样品(图 6),发现该区存在黄铜矿及孔雀石化(图 6a)等矿化现象,证明此处为区内寻找与基性岩浆岩有关的铜镍硫化物型矿床的有利地段。

而 Au-As 异常主体位于该区北西部,呈北北西

向带状分布,研究区内断层、构造破碎带发育。在赛支寺东,闪长岩与六道沟组火山岩的接触部位发现一断层破碎带,破碎带中岩石破碎,构造活动强烈,见多条断层(图 6c),发育构造角砾岩(图 6d)、碎裂岩等。在白家寺东,六道沟组中段火山岩中发育一条宽约几十米、走向近 300°的构造破碎带,发育构造角砾岩,见多条断层。该区断层破碎带内普遍发育强褐铁矿化(图 6e)以及热液活动的痕迹,包括绿泥石化、绿帘石化(图 6f)、硅化、碳酸盐化、黄铁矿化(图 6b)等。综合以上得出此处为区内寻找构造蚀变岩型原生金矿的有利地段。

根据研究区野外采样及照片,结合地质图及组合异常背景与异常图,笔者认为该研究区主要矿产类型为金、铜矿,主要矿床类型为构造蚀变岩型金矿、铜镍硫化物矿床。



a—六道沟组超基性岩中出现团块状黄铜矿(Ccp),部分已经氧化成孔雀石薄膜(Mlc);b—黄铁矿(Py),矿石呈团块状,局部受后期风化影响发生褐铁矿化;c—赛支寺东野外识别出的具有 Au 矿化的破碎带;d—赛支寺东断层附近发育的构造角砾岩;e—白家寺东断层破碎带附近普遍发育强褐铁矿化(Lm);f—绿帘石化-断层破碎带附近热液活动痕迹(Ep)

图 6 找矿标志

5 结论

1) ilr 对数比变换结合 RPCA 模型进一步减弱成分数据之间的封闭效应,有效确定 2 组与矿化相关的 Au-As、Cu-Ni 元素组合。

2) 使用 S-A 方法分解组合地球化学异常,PC1 显示 Cu-Ni 背景图高值区主要分布在研究区西北部,能够凸显含矿岩石单元,而高异常区受控于岩体与构造;PC2 显示 Au-As 高背景区主要分布于东南部,主要为砂岩引起的异常。Au-As 异常图缩小异

常面积,显示异常主要受断层与构造破碎带的控制,可以有效地在砂金异常中提取原生金矿异常。

3) RPCA 结合 S-A 滤波方法可以有效划分元素组合,并在强背景中进一步凸显弱小异常,经过研究区踏勘验证,新发现赛支寺东、白加寺东等矿化,该研究为中大比例尺化探数据找矿预测提供了方法指导。

参考文献:

- [1] 王学求. 矿产勘查地球化学:过去的成就与未来的挑战[J]. 地学前缘,2003, 10(1): 239-248.

- [2] 王瑞廷,毛景文,任小华,等. 区域地球化学异常评价的现状及其存在的问题[J]. 中国地质,2005, 32(1): 168-175.
- [3] 谢学锦,任天祥,奚小环,等. 中国区域化探全国扫面计划卅年[J]. 地球学报,2009, 30(6): 700-716.
- [4] 王学求,谢学锦,张本仁,等. 地壳全元素探测技术与实验示范[J]. 地球学报, 2011,32(s1):65-83.
- [5] Chayes F, Trochimczyk J. An effect of closure on the structure of principal components[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology,1978, 10(4): 323-333.
- [6] Aitchison J.The statistical analysis of compositional data[J].Journal of the Royal Statistical Society, 1986, 44(2):139-177.
- [7] Gregory F P.The statistical analysis of compositional data[J]. Technometrics, 1988, 30(1):120-121.
- [8] 周蒂. 地质成分数据统计分析——困难和探索[J]. 地球科学, 1998,23(2): 147-152.
- [9] Carranza E J M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values[J]. Journal of Geochemical Exploration,2011, 110(2): 167-185.
- [10] Zuo R G. Identification of geochemical anomalies associated with mineralization in the Fanshan district, Fujian, China[J]. Journal of Geochemical Exploration,2014, 139: 170-176.
- [11] Filzmoser P, Hron K, Reimann C. Principal component analysis for compositional data with outliers[J]. Environmetrics,2009, 20(6): 621-632.
- [12] Nazarpour A, Omran N R, Paydar G R, et al. Application of classical statistics, logratio transformation and multifractal approaches to delineate geochemical anomalies in the Zarshuran gold district, NW Iran[J]. Chemie der Erde:Geochemistry,2015, 75(1): 117-132.
- [13] Wang H C, Cheng Q M, Zuo R G. Spatial characteristics of geochemical patterns related to Fe mineralization in the southwestern Fujian province (China)[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 259-269.
- [14] Zuo R G, Wang J, Chen G X, et al. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015,148: 12-24.
- [15] Cheng Q M. Non-linear theory and power-law models for? Information integration and mineral resources quantitative assessments[J]. Mathematical Geosciences, 2008,40(5): 503-532.
- [16] Cheng Q M, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994,51(2): 109-130.
- [17] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991:1-752.
- [18] 青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997:340.
- [19] 汤中立,闫海卿,焦建刚,等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质,2006, 25(1): 1-9.
- [20] 张照伟,李文渊,高永宝,等. 青海化隆基性-超基性岩带铜镍矿成矿条件与找矿潜力[J]. 西北地质,2012,45(1): 140-148.
- [21] 杨巍然,邓清禄,吴秀玲. 拉脊山造山带断裂作用特征及与火山岩、蛇绿岩套的关系[J]. 地质科技情报,2000, 19(2): 5-11.
- [22] 殷鸿福,张克信. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学: 中国地质大学学报,1998,23(5): 438-442.
- [23] Sun X, Zheng Y Y, Wang C M, et al. Identifying geochemical anomalies associated with Sb-Au-Pb-Zn-Ag mineralization in North Himalaya, southern Tibet[J]. Ore Geology Reviews,2016, 73: 1-12.
- [24] Zhang Z, Zuo R, Cheng Q. Geological features and formation processes of the makeng Fe deposit, China[J]. Resource Geology, 2015, 65(3): 266-284.
- [25] 周洪伟. 正态性检验的几种常用的方法[J]. 南京晓庄学院学报,2012(3): 13-18.
- [26] 何凤萍,王正海,方臣,等. 庞西洞地区 Ag-Au 矿化信息识别与提取[J]. 地质科技情报,2014,33(2): 110-115.
- [27] Zhao J, Wang W L, Dong L H, et al. Application of geochemical anomaly identification methods in mapping of intermediate and felsic igneous rocks in eastern Tianshan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration,2012, 122: 81-89.
- [28] Egozcue J J, Pawlowsky-Glahn V, Mateu-Figueras G, et al. Isometric logratio transformations for compositional data analysis[J]. Mathematical Geology,2003, 35(3): 279-300.
- [29] Filzmoser P, Hron K. Correlation analysis for compositional data[J]. Mathematical Geosciences,2009, 41(8): 905-919.
- [30] Aitchison L. The statistical analysis of compositional data[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B,1982, 44(24): 139-177.
- [31] Fritsch V, Varoquaux G, Thyreau B, et al. Detecting outliers in high-dimensional neuroimaging datasets with robust covariance estimators. [J]. Medical Image Analysis, 2012, 16(7): 1359-1370.
- [32] 张蓓,王顺芳. 基于 MCD 稳健估计的 PCA 人脸识别算法[J]. 计算机工程与设计,2015,36(3): 778-782.
- [33] Cheng Q M, Xu Y G, Grunsky E. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation[J]. Natural Resources Research,2000, 9(1): 43-52.
- [34] Cheng Q M. Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation[J]. Journal of Geochemical Exploration,1999, 65(3): 175-194.
- [35] 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.
- [36] 成秋明,张生元,左仁广,等. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术研究及进展[J]. 地学前缘,2009,16(2): 185-198.
- [37] Zuo R G, Xia Q L, Wang H C. Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization[J]. Applied Geochemistry,2013, 28: 202-211.
- [38] Afzal P, Alghalandis Y F, Khakzad A, et al. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling[J]. Journal of Geochemical Exploration,2011, 108(3): 220-232.
- [39] 朱有光,蒋敬业,李泽九,等. 试论我国重要景观区中景观*表生因素对金*铜区域地球化学异常标志的影响[J]. 物探与化探, 2001,25(6):418-424.
- [40] 赵娟,孙泽坤,李明喜. 青海景观区特征和地球化学勘查方法技术[J]. 物探与化探, 2004,28(3):239-241.

The recognition and extraction of Au, Cu geochemical composite anomalies: A case study of the east of Laji Mountains

JIANG Xiao-Jia¹, CHEN Xin¹, ZHENG You-Ye^{1,2,3}, GAO Shun-Bao²,
OUYANG-Song¹, ZHANG Yong-Chao², ZHENG Lei¹, HUANG Jian²

(1.The Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2.Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074,China; 3.State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to weaken the closure effect of the geochemical data which serve as typical component data, the authors analyzed the spatial distribution of geochemical elements in the Laji Mountains. The authors used the isometric log-ratio (ilr) transformation to "open" the geochemical data of the water sediments, built the combined model using robust principal component analysis (RPCA) to identify the combined geochemical anomalies and employed fractal filtering technique to strengthen weak anomalies and separate anomaly from background. In this way, the authors delineated geochemical anomaly so as to guide mineral exploration better. The result obtained by using RPCA displays two different compositional assemblages: (I) Au-As, probably representing tectonic-altered rock type gold deposit like the east ditch of Jinyuan, and (II) Cu-Ni, likely representing copper-nickel sulfide mineralization such as Lashuixia. The results from S-A filter technique can decompose anomalies further, strengthen weak anomaly and reduce the abnormal area in the strong background and, in combination with the geological survey of the study area and the anomaly map, can better search for tectonic-altered rock type Au-As deposits and Cu-Ni sulfide mineralization.

Key words: isometric log-ratio transformation; robust principal component analysis; multi-fractal filtering; extraction of composite anomalies; east of Laji Mountains

(本文编辑:蒋实)