

# 克孜勒萨依铁铜金矿区微量元素 地球化学特征分析

魏乐德<sup>1</sup>, 帕拉提·阿布都卡迪尔<sup>1</sup>, 刘莹<sup>2</sup>, 张超<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**微量元素作为独特的地球化学“示踪剂”,其地球化学特征往往很好地保存了有关成矿物质来源及其形成时地质构造环境的信息.本文基于多元统计方法,对新疆青河县克孜勒萨依铁铜金矿区岩屑地球化学样品所含微量元素进行相关性分析、聚类分析和因子分析,以查明以Au为主的微量元素地球化学特征.研究结果显示,研究区Au和As这2种元素活动性强,分异程度高,利于富集成矿,指示研究区在下一步找矿中应以寻找Au金属矿为重点.

**关键词:**克孜勒萨依;微量元素;相关性分析;聚类分析;因子分析

**中图分类号:**P61      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2015)02-0043-07

## Analysis of trace elements' geochemical characteristics in the Kezelesayi Iron - Copper - Gold Ore District

WEI Ledede<sup>1</sup>, Paraty · ABDUKADIR<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>

(1. College of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** As a unique geochemistry “tracer”, the trace elements' geochemical characteristics have often well preserved the information about the ore-forming material sources and the geological tectonic environment. This paper, based on the multivariate statistical methods, includes correlation analysis, cluster analysis and factor analysis to identified geochemical characteristic of the trace elements. In order to identify the geochemical characteristic of the trace elements in which Au predominates, this paper adopts a serious study of geochemical samples contained trace elements in the Kezelesayi iron - copper - gold ore district. Results show that two elements, i. e. Au and As in the study area are very beneficial to enrich and mineralize, because of its strong activity and high degree of differentiation. It indicates that in the future prospecting we should focus on Au metal ores.

**Key words:** Kezelesayi; trace elements; correlation analysis; cluster analysis; factor analysis

微量元素是指在地球化学体系中,不参与岩石地球化学平衡反应,且在通常的地质作用和岩浆作用过程中其地球化学性质比较稳定的元素<sup>[1]</sup>.因其特有的稳定性,故而往往保存了其原有的地球化学特征,从而可以很好的反应有关成岩(矿)物质来源及其形成时地质构造环境的信息,成为一种独特的地球化学“示踪剂”<sup>[2]</sup>.微量元素的统计特征是元素和元素间数据结构的反映,能揭示元素在成矿过程中的地球化学行为.

本文以克孜勒萨依铁铜矿区岩屑地球化学测量结果为依据,对研究区的样品中所含的10种微量元素(Au, Ag, Sn, Cu, Zn, Mo, Pb, Bi, As, Sb)进行了相关性分析、聚类分析和因子分析,以查明以Au为主的微量

元素的地球化学特征.

### 1 工作区地质背景

#### 1.1 研究现状

新疆青河县克孜勒萨依铁铜矿区在解放前有少数中外地质工作者进行过路线地质调查,1952 年后逐渐开始全面地质工作,但都仅限于 1:20 万 1:50 万地质矿产调查工作,2010 年新疆天澳矿业有限公司施工钻孔发现了有一定的金矿化和黄铜矿化.2011 年新疆天澳矿业有限公司在区内通过前期钻探所发现的有成矿远景的地段即矿区中偏北部,开展了 1:10 000 地质修测 5 km<sup>2</sup>,1:5 000 地质剖面测量 8 km,钻探施工 920 m,钻孔岩石中含大量他形黄铁矿颗粒及黄铜矿颗粒,采样分析 Cu 品位均达到边界品位<sup>[3]</sup>.

#### 1.2 地质背景

新疆青河县克孜勒萨依铁铜矿区位于青河县城 SW193°方向,直线距离 40 km 处的克孜勒萨依一带.构造上处于哈萨克斯坦-准噶尔板块、准噶尔微板块、萨吾尔-二台晚古生代岛弧带东部,北部为乔夏哈拉-玛因鄂博断裂,该断裂构造十分发育,从区域上影响了地层及侵入岩的分布(图 1).区域侵入体多与区域构造线的分布方向(北西西向-北西向)一致,反映了区域深大断裂控制的特点.主要出露有下泥盆统托让格库都克组(D<sub>1t</sub>)、中泥盆统蕴都卡拉组(D<sub>2y</sub>)、中泥盆统北塔山组(D<sub>2b</sub>)、下石炭统南明水组(C<sub>1n</sub>)等,在山谷平缓地带可见第四系覆盖.岩体规模一般较小,岩石以中-深成岩为主、浅成岩次之.岩性从超基性-基性-中-酸性均有出露,以酸性岩为主,超基性-基性岩与中性岩较少.上述中酸性侵入岩的产出为区域各类矿产提供了热

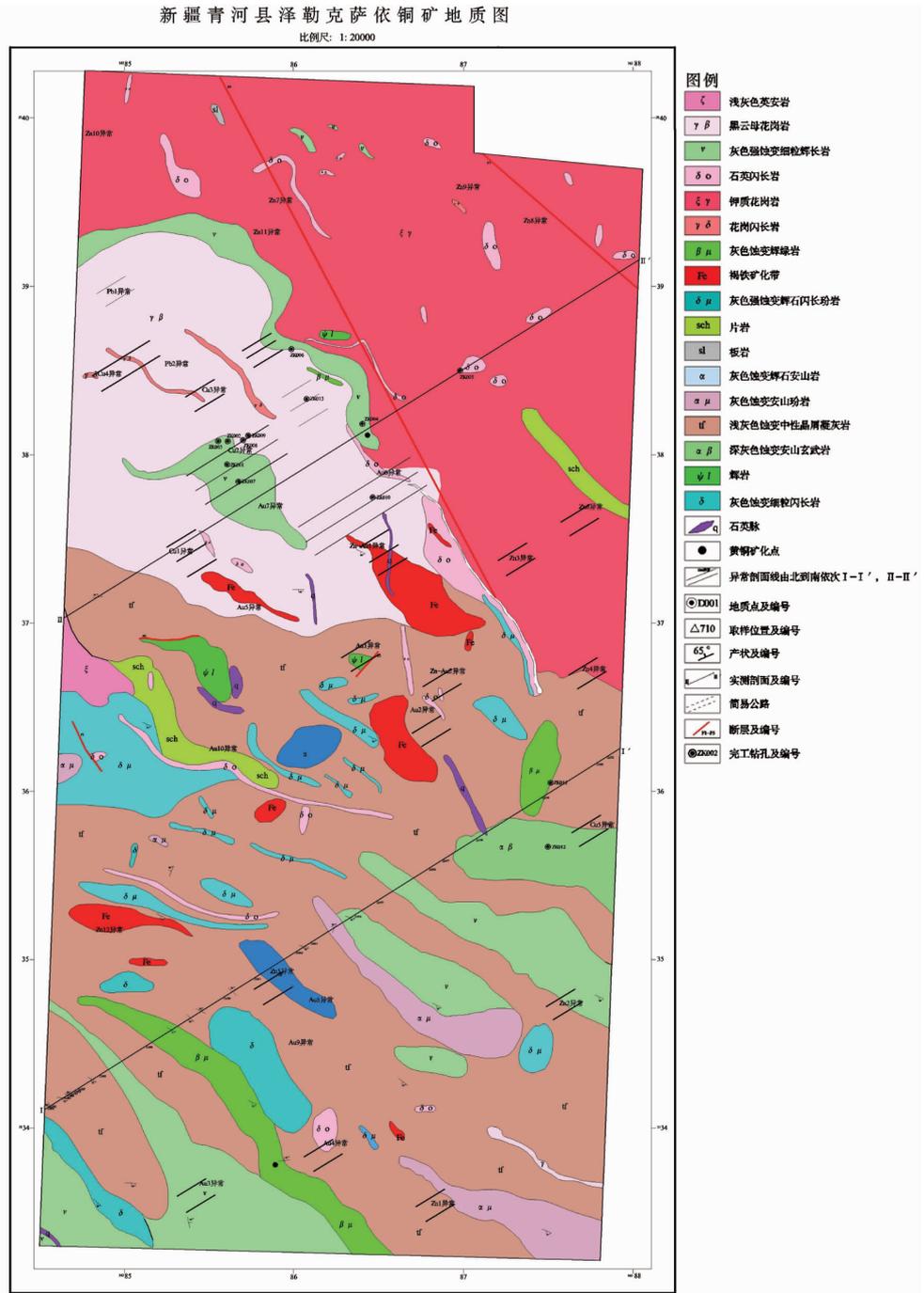


图 1 新疆青河县克孜勒萨依铁铜金矿区 1:20 000 地质图  
(据新疆地质勘查院,2013 年)

源及其矿源,成为区域重要的控矿因素之一。

### 1.3 矿化特征

据前人研究显示,在克孜勒萨依铁铜矿区(矿区经纬度坐标为东经 $90^{\circ}12'15''\sim 90^{\circ}14'45''$ ;北纬 $46^{\circ}18'00''\sim 46^{\circ}21'45''$ 。中心点地理坐标为:东经 $90^{\circ}13'30''$ ,北纬 $46^{\circ}19'52''$ ,矿区总面积 $21.79\text{ km}^2$ 。)地表存在多处矿化现象,主要产于南部2条断裂F3,F4及其交汇部位发育的断裂破碎蚀变带中,围岩主要为安山岩、花岗闪长岩,属断裂破碎蚀变产物<sup>[4,5]</sup>。

根据2013年研究区1:20 000地质草测结果显示(图1),在普查区内发现2个铜矿化点,北部主要以石英脉型,蚀变绿帘石化,孔雀石化相互伴生,局部看到黄铜矿化。南部主要以星点状为主,强绿帘石化晶屑凝灰岩含有少量星点状黄铜矿化。矿化矿石为安山玢岩及安山质晶屑凝灰岩,所见孔雀石薄膜多沿岩石裂隙和绿帘石细脉伴生,方向 $10^{\circ}$ ,长约3 m,南部中心坐标X: 285 890 Y: 5 133 782 南部主要是沿裂隙充填,形成薄膜状黄铜矿化。北部中心坐标X: 286 435 Y: 5 138 116 为深部寻找隐伏铜多金属矿提供了地质线索<sup>[6,7]</sup>。

## 2 数据来源

2013年6月,新疆天澳矿业有限公司(甲方)出资委托四川省冶金地质勘查局六〇五大队新疆地质勘查院(乙方)实施新疆青河县克孜勒萨依铁铜矿区勘查任务。按照《地质矿产勘查测量规范》(GB/T18341-2001)的要求,以 $200\text{ m}\times 80\text{ m}$ 为采样间隔,布设的方位角为 $58^{\circ}$ (图1),于2013年7月~9月开展了野外地质勘查工作。完成了1:20 000岩屑地球化学扫面任务,取得岩屑地球化探分析样1 450件。送由核工业新疆理化分析测试中心分析,按照项目设计书要求分析Au,Ag,Sn,Cu,Zn,Mo,Pb,Bi,As,Sb共10种元素,样品分析方法是ICP-OES。

## 3 微量元素地球化学特征分析

### 3.1 单元素地球化学特征

研究区岩屑地球化探所测得的微量元素地球化学特征见表1。从表中可以看出,10种微量元素的数理统计平均值从大到小依次为 $\text{Zn} > \text{Ag} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Au} > \text{Sn} > \text{Mo} > \text{Sb} > \text{Bi}$ ;元素变异系数由大到小依次为: $\text{Au} > \text{As} > \text{Mo} > \text{Sb} > \text{Cu} > \text{Bi} > \text{Ag} > \text{Pb} > \text{Sn} > \text{Zn}$ 。

元素的变异系数 $C_v$ ,反映元素在地球化学作用过程中的分异程度<sup>[8,9]</sup>。其中 $C_v < 0.6$ 为均匀,元素活动性弱,分异程度低; $C_v = 0.6 \sim 1.0$ 为不均匀,元素活动性较强,分异程度较高; $C_v > 1.0$ 为极不均匀,元素活动性极强,迁移分异程度很高。研究区内Ag,Sn,Cu,Zn,Pb,Bi这6种元素变异系数小于0.6,为分布均匀,元素活动性差,分异程度低,不利于成矿;Sb变异系数为0.6,说明元素活动性较强,分异程度较高;Au,Mo,As这3种元素变异系数均大于1,为分布不均匀,说明元素活动性极强,分析程度极高,有利于成矿。

表1 研究区10种微量元素数理统计

元素	平均值	标准离差	变异系数	最大值	最小值	克拉克值	浓度克拉克值	致矿系数
Au	2.24	5.17	2.31	101.00	0.20	4.00	0.56	25.99
Ag	66.18	27.41	0.41	500.00	26.00	70.00	0.95	5.50
Sn	1.50	0.57	0.38	4.60	0.51	2.00	0.75	4.91
Cu	65.93	36.45	0.55	290.95	8.29	55.00	1.20	7.28
Zn	96.27	20.37	0.21	224.85	31.90	70.00	1.38	3.70
Mo	0.83	0.89	1.08	29.73	0.23	1.50	0.55	12.38
Pb	13.27	5.15	0.39	93.73	3.37	12.50	1.06	5.33
Bi	0.15	0.07	0.49	1.26	0.02	0.17	0.87	6.27
As	24.2	54.04	2.23	1 090.80	1.29	1.80	13.44	38.01
Sb	0.49	0.29	0.60	3.15	0.14	0.20	2.43	9.04

注: Au,Ag含量单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,其它元素含量单位为 $\text{mg}/\text{kg}$ 。

### 3.2 元素组合特征分析

#### 3.2.1 相关性分析

相关性分析是一种简单而直接的多元统计方法,其基本思想是利用样品之间的相关系数来衡量各样品间相关性的一种数学算法.而元素地球化学信息作为地质作用的微观结果,必然与地质信息相关联.故而每个地质对象都可以用一组特定的随机变量来刻画,然后进一步用相关性分析方法,很好地揭露 2 组随机变量之间的内部联系.通过对地球化学微量元素进行 R 型相关性分析,我们可以得出元素之间的亲近关系,从而为后面的聚类分析和因子分析提供依据.元素间相关系数反映的是地质作用中各元素之间的相关程度,正相关表明 2 个元素在成矿过程中共同带入或带出,或在同一个空间上富集,负相关表明在成矿过程中一个元素带入时另一元素被带出,或富集的空间位置相反<sup>[9]</sup>.

为了衡量  $n$  个样品所体现出来的 2 个变量之间的亲疏关系,可通过他们之间的相关系数来判别,并选取下列公式进行分析:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)^2}} \quad (1)$$

$r_1$  越大,表示两变量关系越密切,反之则不密切.

本次研究对所测 10 种微量元素进行了相关性分析,用 IBM SPSS Statistics 19 软件计算了个元素之间的相关系数(表 2).根据相关系数可知:As 和 Sb 的相关系数最高,达到了 0.503,呈显著正相关;Ag 和 Cu 相关系数为 0.473,Au 和 As 相关系数为 0.437,Bi 和 Sb 相关系数为 0.395,Sn 和 Pb 相关系数为 0.379,Au 和 Bi 相关系数为 0.373,Ag 和 Bi 相关系数为 0.341,Ag 和 Pb 相关系数为 0.332,Pb 和 Bi 相关系数为 0.332,Bi 和 As 相关系数为 0.324,均变现为正相关;其余元素之间相关系数较低,甚至表现为负相关.

表 2 微量元素相关系数矩阵

	Au	Ag	Sn	Cu	Zn	Mo	Pb	Bi	As	Sb
Au	1.000									
Ag	0.204	1.000								
Sn	-0.023	0.164	1.000							
Cu	0.195	0.473	-0.163	1.000						
Zn	0.113	0.062	0.161	0.068	1.000					
Mo	0.058	0.163	0.050	0.117	0.059	1.000				
Pb	0.113	0.332	0.379	0.027	0.215	0.139	1.000			
Bi	0.373	0.341	0.270	0.139	0.119	0.148	0.332	1.000		
As	0.437	0.167	-0.010	0.036	0.174	0.088	0.098	0.324	1.000	
Sb	0.182	0.291	0.017	0.152	0.128	0.149	0.079	0.395	0.503	1.000

#### 3.2.2 聚类分析

聚类分析(Cluster Analysis)也是多元统计中常用的方法之一,其最早运用于分类学中,形成数值分类学这个学科<sup>[10]</sup>.聚类分析的基本思想是从个体的相似性出发,因同一类中的个体有较大的相似性,而不同类中的个体差异较大,从而可以按照一定的相似性准则,将几个或若干具有较高相似程度的样品(指标)归到一小类中,而将相似程度较低的归到大类中,以此类推,直到把所有样品(指标)聚类完毕<sup>[11,12]</sup>.在地质学中一般采取 R 型聚类分析,R 型聚类分析是从数字分类角度研究元素在成矿地质作用过程中其地球化学行为的一种有效方法<sup>[13,14]</sup>.

由于各样品(指标)所包含的变量的单位、量级和数值变动范围的差异可能很大,计算中那些绝对值大的变量往往会突出显示.因此需要对原始数据进行标准化处理,处理选取的公式采用:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (2)$$

通过分析研究,可以在掌握了成矿元素与伴生元素之间的关系的基础上选择指示性元素.同时,通过元素不同的组合,还可以研究岩浆岩、地层、构造与矿化的关系,从而确定矿产类型或地质背景,为研究各

地质单元或构造的元素组合特点提供依据<sup>[15]</sup>.

根据 10 种微量元素 R 型聚类图(图 2),以  $r=0.3$  为界,可分为 2 组:

第一组元素为 Au, As, Sb, Bi, Ag, Cu, Sn, Pb, 其中的 Au, As, Sb 组合反映了中低温热液活动的特点, Ag, Cu, Sn, Pb 组合反映了中温热液活动的特点. As 和 Sb 的元素组合相关系数最大(0.503),说明密切程度最高.

第二组元素为 Zn, Mo 元素的叠加,可能反映了中酸性岩浆岩(如花岗闪长岩,二长花岗岩等)的元素组合特征.

### 3.2.3 因子分析

因子分析作为多元统计分析方法中常用的方法之一,其基本思想是将原始指标综合成较少的指标,用这些较小的指标来反映原始指标的绝大部分信息,而这些综合指标之间没有相关性.因此,基于地质地球化学数据的因子分析能够对地质地球化学作用中的元素组合进行比较有效的分类或分组,据此来揭示变量之间、样品之间以及与其相对应的地质作用之间的相互关系,从而为从整体上认识研究区的地质地球化学特征提供依据<sup>[16,17]</sup>.其主要目的是将具有相近因子载荷的各个变量置于一个公共因子之下,使得正交旋转因子载荷矩阵比初始因子载荷矩阵具有更好的合理性和可解释性<sup>[15]</sup>.因此,本文首先采用了正交因子的方差极大旋转法分析,从而得到研究区微量元素的正交旋转因子载荷矩阵(表 4),帮助我们对大量地质观测资料进行分析和做出较为合理的解释,从而即使在关系比较复杂的情况下,我们也能够从大量的观测资料中找寻影响它们的共同因素和特殊因素,并结合始数据间的相关关系,应用数学方法解释彼此间复杂的关系,从而指示出地质上的某种共生组合关系<sup>[18,19]</sup>.

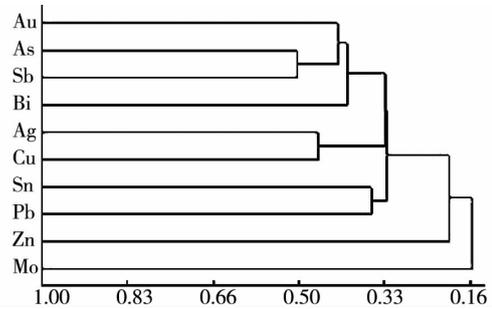


图 2 微量元素 R 型聚类分析谱系

假设原始变量为  $X_1, X_2, \dots, X_m$ . 由于他们之间即有可能相互独立,又有可能相互相关,所以将这些原始变量之间的关系表示为各变量  $X_i$  同公因子  $F_i$  与单因子  $W_i$  之间的关系:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1p}F_p + C_1W_1; \\ X_2 &= a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2p}F_p + C_2W_2; \\ &\dots\dots \\ X_m &= a_{m1}F_1 + a_{m2}F_2 + \dots + a_{mp}F_p + C_mW_m. \end{aligned} \tag{3}$$

式中,每个公因子  $F_i$  与各变量  $X_i$  之间是相互独立的,所以从个数上通常要比变量少( $P < m$ ),称其为因子模型.

由因子模型知道,  $a_{ij}^2$  表示同一因子  $F_i$  对各变量  $X_i$  的公因子方差贡献,  $a_{ij}^2$  表示  $F_i$  对  $X_i$  的公因子方差贡献,这里将同一公因子  $F_j$  对各变量  $X_i$  的公因子累计方差贡献记为

$$S_j = \sum_{i=1}^m a_{ij}^2 (j = 1 \dots p). \tag{4}$$

表 3 R 型因子分析特征值和累计方差贡献率

因子	旋转前			因子	旋转前		
	总特征值	方差贡献率/%	累积贡献率%		总特征值	方差贡献率/%	累积贡献率%
$F_1$	2.722	27.220	27.220	$F_1$	1.480	14.800	14.800
$F_2$	1.479	14.794	42.015	$F_2$	1.475	14.754	29.554
$F_3$	1.258	12.580	54.595	$F_3$	1.184	11.840	41.394
$F_4$	0.947	9.469	64.064	$F_4$	1.081	10.807	52.201
$F_5$	0.928	9.282	73.346	$F_5$	1.071	10.709	62.911
$F_6$	0.810	8.097	81.443	$F_6$	1.010	10.102	73.013
$F_7$	0.593	5.929	87.372	$F_7$	1.003	10.033	83.045
$F_8$	0.530	5.305	92.677	$F_8$	0.963	9.631	92.677

表 4 正交旋转因子载荷矩阵

元素	因子载荷							
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$
Cu	0.884	-0.043	0.093	-0.101	-0.200	0.108	0.057	0.087
Ag	0.788	0.234	0.064	0.307	0.224	-0.091	0.056	0.057
Sb	0.168	0.859	-0.087	-0.032	-0.025	0.060	0.070	0.318
As	-0.041	0.779	0.502	0.082	0.001	0.084	0.029	-0.053
Au	0.135	0.099	0.924	0.025	-0.029	0.044	0.014	0.198
Pb	0.081	0.011	0.036	0.944	0.172	0.117	0.064	0.149
Sn	-0.036	-0.024	-0.028	0.169	0.957	0.088	0.021	0.130
Zn	0.032	0.089	0.053	0.103	0.082	0.977	0.020	0.020
Mo	0.079	0.065	0.017	0.060	0.020	0.020	0.991	0.049
Bi	0.121	0.228	0.231	0.183	0.164	0.022	0.061	0.876

表 5 因子载荷矩阵

	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$
Au	0.561 3	-0.301 2	-0.211 7	-0.321 8	-0.090 8	0.587 4	0.060 1	0.132 6
Ag	0.650 5	0.012 6	0.538 4	-0.091 9	-0.109 7	-0.189 5	-0.106 0	0.229 1
Sn	0.281 8	0.776 7	-0.079 2	0.002 7	-0.178 0	-0.089 5	0.291 5	0.389 2
Cu	0.390 9	-0.379 5	0.683 9	-0.219 0	0.178 6	-0.051 1	0.123 5	0.008 4
Zn	0.317 1	0.250 5	-0.220 9	-0.247 5	0.825 0	-0.075 7	0.149 3	-0.062 8
Mo	0.310 9	0.033 4	0.216 7	0.804 3	0.263 4	0.366 9	0.038 0	0.053 6
Pb	0.494 1	0.603 0	0.120 8	-0.089 3	-0.007 6	0.105 1	-0.525 5	-0.240 1
Bi	0.722 1	0.111 7	-0.096 2	-0.002 0	-0.312 8	0.076 4	0.346 3	-0.426 4
As	0.608 3	-0.327 6	-0.515 2	0.040 8	0.016 6	-0.059 8	-0.263 7	0.254 0
Sb	0.630 8	-0.283 4	-0.238 8	0.276 6	-0.033 8	-0.510 4	0.024 7	-0.096 9
特征值	2.701 2	1.465 7	1.250 9	0.954 2	0.933 2	0.812 8	0.605 0	0.541 7

本次因子分析研究是运用 IBM SPSS Statistics 19 软件开展,以总特征值  $>0.5$  为标准进行因子提取(表 3),通过主因子总方差贡献表和正交旋转因子载荷矩阵(表 4)可以得知,有 8 个因子符合提取标准.这 8 个因子共解释了原有 10 个变量总方差的 92.677%,旋转前后总的累计贡献率没有发生变化,表明因子分析效果较好.

根据以上因子分析的结果(表 3~表 5)可以明显的看出:

第一主因子( $F_1$ )由 Au, Ag, As, Sb, Bi, Pb 这 6 种元素组成,且各元素在  $F_1$  因子上均具有较大的载荷.且  $F_1$  因子的方差贡献占总因子贡献的 14.8%(比例最大),故而  $F_1$  因子为研究区占主要地位的因子,反映了一期较为明显的热液活动现象,是对成矿最有利的元素组合.

第二主因子( $F_2$ )由 Sn, Pb 这 2 种元素组成,2 种元素在  $F_2$  因子上的载荷明显大于其他元素,其成矿因子的方差贡献率为 14.754%,显示的是一组中高温的热液作用元素组合,反映了岩浆期后热液活动过程中不同元素的组合分异现象.

第三主因子( $F_3$ )由 Ag, Cu 这 2 种元素组成,其成矿因子的方差贡献率为 11.84%.应该代表着热液成矿作用过程中铜矿化的主要阶段, Cu 在成矿热液演化的后期硫化物阶段富集沉淀,形成铜的硫化物,如黄铜矿、辉铜矿等. Ag 主要呈原子态分布,赋存在铜的硫化物中.

第四主因子( $F_4$ )和第五主因子( $F_5$ )分别由 Mo 和 Zn 元素组成,其成矿因子的方差贡献分别占总因子贡献的 10.807% 和 10.709%.表现了较明显的 Mo, Zn 元素独立活动过程,可能与岩浆早期演化有关.

第六主因子( $F_6$ )元素为 Au,其成矿因子的方差贡献分别占总因子贡献的 10.102%.从 Au 与各主因子的相关性来看,金在各因子上的载荷相当小甚至存在负载,表明金的富集作用可能存在 2 期,其中一期

富集作用比较弱.

## 4 结论

1) 研究区 10 种微量元素地球化学特征表明, Au, Mo, As 这 3 种元素活动性强, 分异程度高, 利于富集成矿, 该富集区主要位于研究区中-南部 F4 断裂南西一侧, 花岗岩体接触带及其以南的大片下泥盆统托让格库都克组(D<sub>1t</sub>)地层中, 区内岩性复杂, 褐铁矿化较多.

2) As 和 Sb 的相关系数最高, 达到了 0.503, 呈显著正相关.

3) Au, As, Sb, Bi, Ag, Cu, Sn, Pb 为一组, 其中的 Au, As, Sb 组合反映了中低温热液活动的特点. As 和 Sb 的元素组合相关系数最大(0.503), 说明密切程度最高, 组合异常的出现是研究区寻找热液金属矿的重要地球化学找矿标志.

4) 第一主因子(F<sub>1</sub>)由 Au, Ag, As, Sb, Bi, Pb 元素组成, 为研究区占主要地位的因子, 是研究区主要的成矿元素组合.

5) 因子分析、聚类分析、相关性分析结果一致, 因此研究区在下一步找矿中应以寻找 Au 金属矿为重点.

## 参考文献:

- [1] 刘亚剑, 范继璋, 李钟山, 等. 吉林省小石人金矿区微量元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(2): 202-210.
- [2] 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 滇西北兰坪盆地李子坪铅锌矿床微量元素地球化学特征[J]. 地球化学, 2012, 41(5): 483.
- [3] 周可法, 陈衍景, 张楠楠, 等. 中亚地区典型矿床的特征提取技术及预测方法[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 340-345.
- [4] 胥胜金, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 叶亮山, 等. 基于证据权重法的新疆青河县克孜勒萨依地区成矿预测研究[J]. 西部探矿工程, 2013(12): 165-168.
- [5] 胥胜金. 新疆青河县克孜勒萨依铜矿地质异常与成矿预测[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学地质与矿业工程学院, 2013: 76-80.
- [6] Cheng Q M, Agterberg F P. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments[J]. Computer & Geosciences, 2009, 35(2): 234-244.
- [7] Shen W, Zhao A D. Multidimensional self affine distribution with application in geochemistry[J]. Mathematical Geology, 2002, 34(2): 109-123.
- [8] 木合塔尔·买买提, 木合塔尔·扎日, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 等. 土屋-延东斑岩铜矿田区域多元成矿信息分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 982-985.
- [9] 马维云. 地球化学异常信息提取及评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013: 11-12.
- [10] 何建林. R型聚类分析的简便算法[J]. 物化探计算技术, 1985, 7(3): 259-260.
- [11] 张清寰, 张彧瑞, 赵艳萍, 等. 金塔盆地地下水演化及地球化学模拟[J]. 干旱区地理, 2011, 34(5): 773-776.
- [12] 李秀萍, 杨德刚, 韩剑萍. 应用主成分分析、聚类分析划分新疆绿洲生态经济类型的初步研究[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 255-269.
- [13] 王睿. 从江翁浪地区蚀变岩型金矿微量元素地球化学特征[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 96-98.
- [14] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 163-170.
- [15] 马龙, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 吉尔吉斯斯坦表土元素组合及分布特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(4): 640-644.
- [16] 王湘云, 石玉春, 武耀诚. R型因子分析在放射性方法勘查油气中的应用效果[J]. 物探与化探, 1995, 19(3): 193-197.
- [17] 姚玉增, 金成洙, 肖向军. 因子分析在辽南卧龙泉地区化探次生晕异常优选中的应用[J]. 物探与化探, 2005, 29(1): 11.
- [18] 戴慧敏, 鲍庆中, 宫传东, 等. 因子分析法对内蒙古查巴奇地区水系沉积物地球化学分区的应用研究[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 245-249.
- [19] 朴寿成, 刘树田. 吉林小石人金矿地球化学异常特征及成矿预测[J]. 地质与勘探, 2003, 39(2): 26-29.