

文章编号: 0258-7106(2013)06-1300-08

阿荣旗谢永贵家庭农场一带土壤化探的数学地质异常提取*

刘波¹, 乔宝成², 姜治民¹, 李海东³

(1 核工业 208 大队, 内蒙古 包头 014010; 2 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古 呼和浩特 010010;

3 内蒙古矿业开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要 应用数学地质方法对阿荣旗谢永贵家庭农场一带 1:1 万土壤化探数据进行了分析, 得出该区异常主要受中下泥盆统泥陂河组泥质板岩、沙质板岩与安山岩体接触带形成的矿化异常控制。研究区土壤地球化学 R 型聚类分析表明, 10 种微量元素可以分为 3 类: 第一类为 Cu、Ag、Au、As、Mo, 第二类为 Pb、Zn、Bi、Hg, 还有一类为 Sb。第一类反映了石英脉或蚀变岩型矿化的指示元素组合, 第二类反映了中温的矿化元素组合。对研究区元素采用因子得分趋势面分析提取其反映局部异常变化的剩余异常, 再对剩余异常进行多因子叠加法成图。在该区共圈定出 4 个异常靶区, 以石英脉或蚀变岩型金矿化为主, 是下一步重点的找矿区域。

关键词 地质学; 聚类分析; 因子分析; 趋势面分析; 土壤地球化学测量; 地质异常

中图分类号: P628, P632

文献标志码: A

Mathematical geology anomaly extraction for soil geochemistry in Xie Yong-gui family farm area of Arun Banner, Inner Mongolia

LIU Bo¹, QIAO BaoCheng², JIANG ZhiMin¹ and LI HaiDong³

(1 No. 208 Geological Party, Bureau of Nuclear Industry, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2 Inner Mongolia Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3 Inner Mongolia Mining Development Limited Liability Company, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract

Mathematical geology was employed to analyze the data obtained in 1:10 000 soil geochemical survey in the Xie Yong-gui family farm in Arun Banner, Inner Mongolia. It is concluded that the anomalies are mainly controlled by mineralization along the contact zone between the argillite, sandy slate and the andesite rock body in the middle-lower Devonian Niquhe Formation. Cluster analysis of the soil geochemical data obtained from the Xie Yong-gui family farm area shows that ten kinds of trace elements can be grouped into three categories, i. e., (1) Cu, Ag, Au, As and Mo; (2) Pb, Zn, Bi, Hg; (3) Sb. The first category reflects a combination of indicator elements of quartz-vein or altered rock-type mineralization, and the second category indicates the combination of medium-temperature ore-forming elements. Using element factor scores of trend surface analysis, the authors extracted anomalies in the Xie Yong-gui family farm area of Arun Banner and also extracted residual anomalies which reflected local anomaly changes. Then, the adding method was used to conduct mapping. Four anomaly target areas were delineated in this study, i. e., I, II, III and IV, which seem to be the key areas for the ex-

* 第一作者简介 刘波,男,1984年生,助理工程师,从事地学数据处理、成矿规律与成矿预测研究。Email: 304110991@qq.com
收稿日期 2012-11-03; 改回日期 2013-02-10。张绮玲编辑。

ploration of quartz vein type and altered rock type gold deposits.

Key words: geology, cluster analysis, factor analysis, trend surface analysis, soil geochemical survey, geological anomaly

目前找矿的难度越来越大,地质学、矿物学方法对找隐伏矿的瓶颈越来越明显,传统的找矿方法已经不能满足目前的地质找矿需求。数学地质是一门交叉学科,聚类分析在对元素进行地球化学分类和元素之间的亲疏关系的描述中应用较为广泛(黄宏业等,2009;王小敏等,2010)。当分析因子(元素组合)被赋予客观合理的地质、成矿作用解释时,对于每个样品来说,每个因子的得分就是对该样品地质、成矿作用信息的示踪(Davis,1986)。姚玉增等(2005)利用趋势面及因子分析对辽南卧龙泉地区化探次生晕进行靶区优选,很好地反映了该地区的矿化作用,分析结果与已知矿床空间吻合程度较高。利用因子得分可以进行地球化学分区,制作因子得分图能够强化弱异常,分析其分区与背景的关系,从而得出有意义的元素组合(吴越等,2010;石文杰等,2012;赵少卿等,2012)。趋势面分析能充分考虑到区域背景的规律性变化。该方法把地壳中元素的含量值分成反映规律性变化的区域背景部分、反映局部性变化的局部异常和偶然变化三部分(赵鹏大,2004;李随民等,2007;李宾等,2012),并根据元素含量的空间分布特征,求出趋势值,拟合趋势面,用趋势面作为区域背景来表现元素含量的区域规律性变化,从而避免统一背景值所圈异常造成的信息损失。多元统计方法作为一种多元数据处理方法,在地球化学中应用广泛,我国地球化学工作者在注重研究方法技术的同时,重点开展了利用多元统计方法进行异常块体的划分,异常的圈定,提出了一系列划分背景场与异常场的理论依据。前人的研究验证了多元统计方法的有效性,该方法主要应用于矿化作用类型、元素分类、异常的圈定、隐伏矿体的预测及靶区的圈定等方面。本文选取阿荣旗谢永贵农场一带进行了数学地质异常提取的研究,并结合前人研究成果,对该地区的土壤化探数据做了系统分析和探讨,以期获得一些新认识。

1 工作区地质背景

内蒙古阿荣旗谢永贵家庭农场一带大地构造位置位于兴安地槽褶皱系东乌珠穆沁旗南晚华力西地

槽褶皱带。地层区划属天山-兴安地层区大兴安岭地层分区。出露地层由古到新为古生界泥盆系中下统泥鰍河组灰黑色长石石英砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、凝灰质粉砂岩、板岩,中生界白垩系下统光华组沉凝灰岩、凝灰砂岩、粉砂岩、砾岩等及第四系黏土、亚黏土、砂、砾石、碎石松散堆积物;区内岩浆岩主要为侏罗纪早期中粒石英二长闪长岩($J_1\eta\delta o$)、中粒花岗闪长岩($J_1\delta o$) (图1)。此外,区内脉岩发育,主要为石英正长斑岩脉、闪长岩脉及石英脉。研究区位于大兴安岭主脊-林西断裂带以东,阿尔山复背斜的南东翼,北东向查干敖包-阿荣旗深断裂带在本区附近。

2 1:10 000 土壤地球化学测量

根据1:50 000水系沉积物测量成果,对阿荣旗谢永贵家庭农场一带异常区一处甲2类异常进行了1:1万土壤地球化学测量,异常查证面积9 km²,采样网度为100 m×20 m,共获得化探数据6237组。在充分认识研究区内地质构造演化背景后,笔者采用平均值加1.5倍标准差(即 $\bar{X}+1.5S$),计算研究区内这10种元素的异常下限值。单元素异常图应用MAPGIS软件,根据各元素的异常下限值为阈值,并根据实际情况适当取整上下浮动。离散数据网格化通过克里格插值法对数据进行无偏估计,最后利用网格化数据生成等值线图,等值线含量间隔按其疏密程度进行调整。结果表明,阿荣旗谢永贵家庭农场一带异常是以Au为主,伴随Cu、Ag、As、Mo的多元素组合异常,面积约4 km²,强度大,形态规整。Au、Cu、Mo、Ag、As的极大值分别为 45.70×10^{-9} 、 88.00×10^{-6} 、 8.30×10^{-6} 、 0.96×10^{-6} 、 64.90×10^{-6} ,各元素之间套合程度较好。Au元素的高背景区主要分布于古生界泥盆系中下统泥鰍河组地层及安山岩体中(图2)。

3 化探数据分析

笔者对阿荣旗谢永贵家庭农场一带6237组样品的10种元素数据分别进行了R型聚类分析、因子

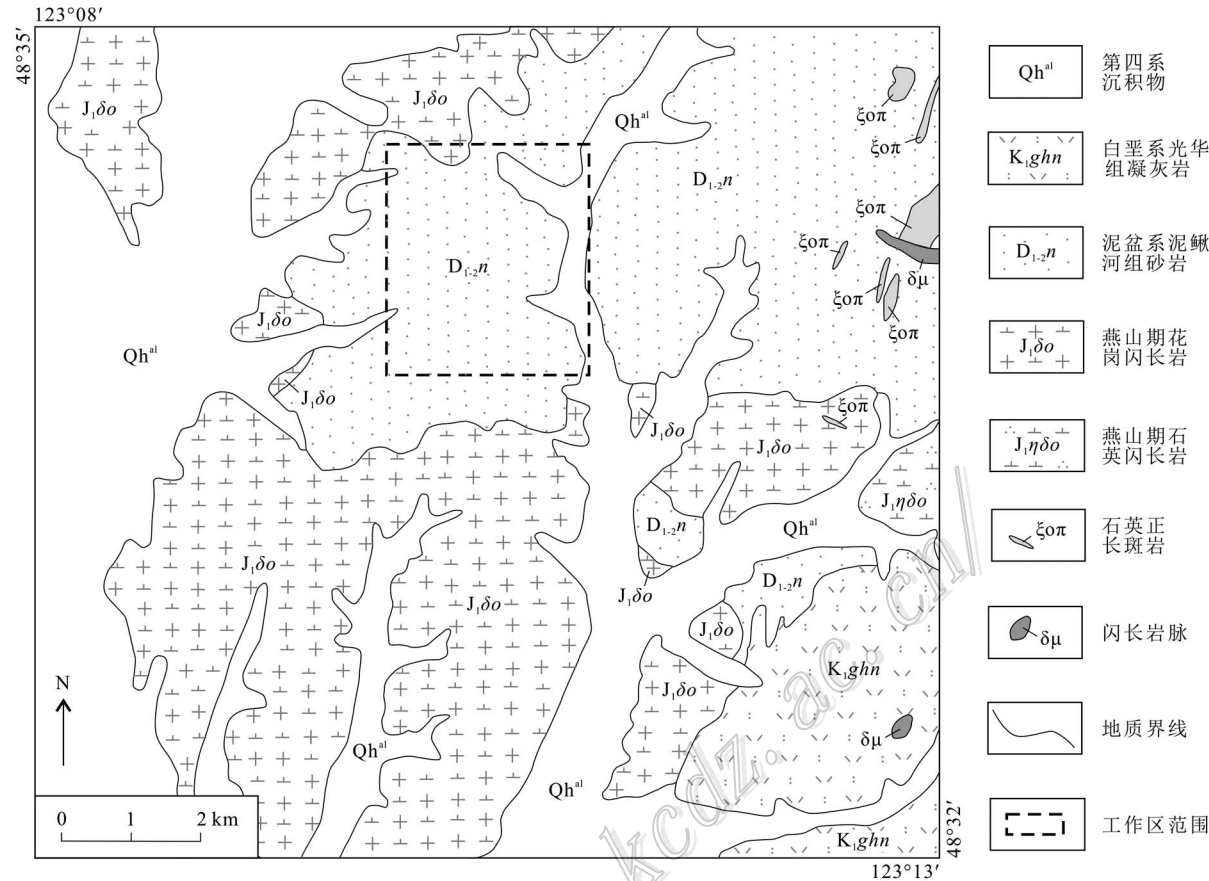


图 1 阿荣旗谢永贵农场区域地质略图(据核工业二〇八大队,2012 年资料修改)
Fig. 1 Simplified geological map of the Xie Yong-gui family farm area of Arun Banner
(modified after Geological Brigade No. 208 Bureau of Nuclear Industry, 2012)

分析及趋势面分析。在原始数据因子分析的基础上,笔者提出了用因子得分趋势面剩余异常来圈定异常靶区,具体实施步骤如下:① 对原始化探数据进行预处理,如剔除特高值等;② 对数据进行聚类分析、因子分析,计算因子得分值;③ 采用趋势面分析对因子得分数据进行处理分析,得到局部异常(即剩余异常分量);④ 根据因子得分剩余异常值的高低圈定异常区;⑤ 利用多因子叠加法对各主因子的因子得分剩余异常进行叠加;⑥ 对各叠加靶区进行综合解释。

3.1 R 型聚类分析

聚类分析是根据样本自身的属性,用数学方法按照某些相似性指标,定量地确定样本之间的亲疏关系,并按这种亲疏关系对样本进行聚类。根据样品之间的数据特征将不同的元素进行分类称 R 型聚类分析。按照聚类分析原理,对阿荣旗谢永贵家庭农场一带 6237 组样品的 10 种元素分析数据作标准化变换后,使用 SPSS 多元统计软件,采用最近邻分

类(nearest neighbor)准则,测量间距采用皮尔森相关系数(pearson correlation),生成聚类分析系统树图(图 3)。系统树图以躺倒树的形式展现了聚类分析的每一次类合并的情况,SPSS 自动将各类间的距离映射到 0~25 之间,可称为距离系数,距离系数越小,说明变量之间的相关性越高,反之亦然。由皮尔森相关系数矩阵可以看出与 Au 相关性最好的元素是 As,其次是 Ag、Cu、Mo,与 Au 相关性较差的元素有 Sb、Bi、Hg(表 1)。依照聚类分析谱系图,取距离系数 20 为相似性分类指标,可以看出该研究区 10 种微量元素之间可以分为 3 类,Mo、Cu、Ag、Au、As 为一类,即 Mo、Cu、Ag、As 为 Au 成矿最密切的元素,这与 1:1 万土壤地球化学测量 Au、As、Cu、Ag、Mo 异常等值线图反映的特点相一致,反映了中低温的矿化元素组合;Pb、Zn、Bi、Hg 为一类,可能反映了中温的指示元素组合;Sb 为一类,可能与表生作用元素迁移有关(图 3)。

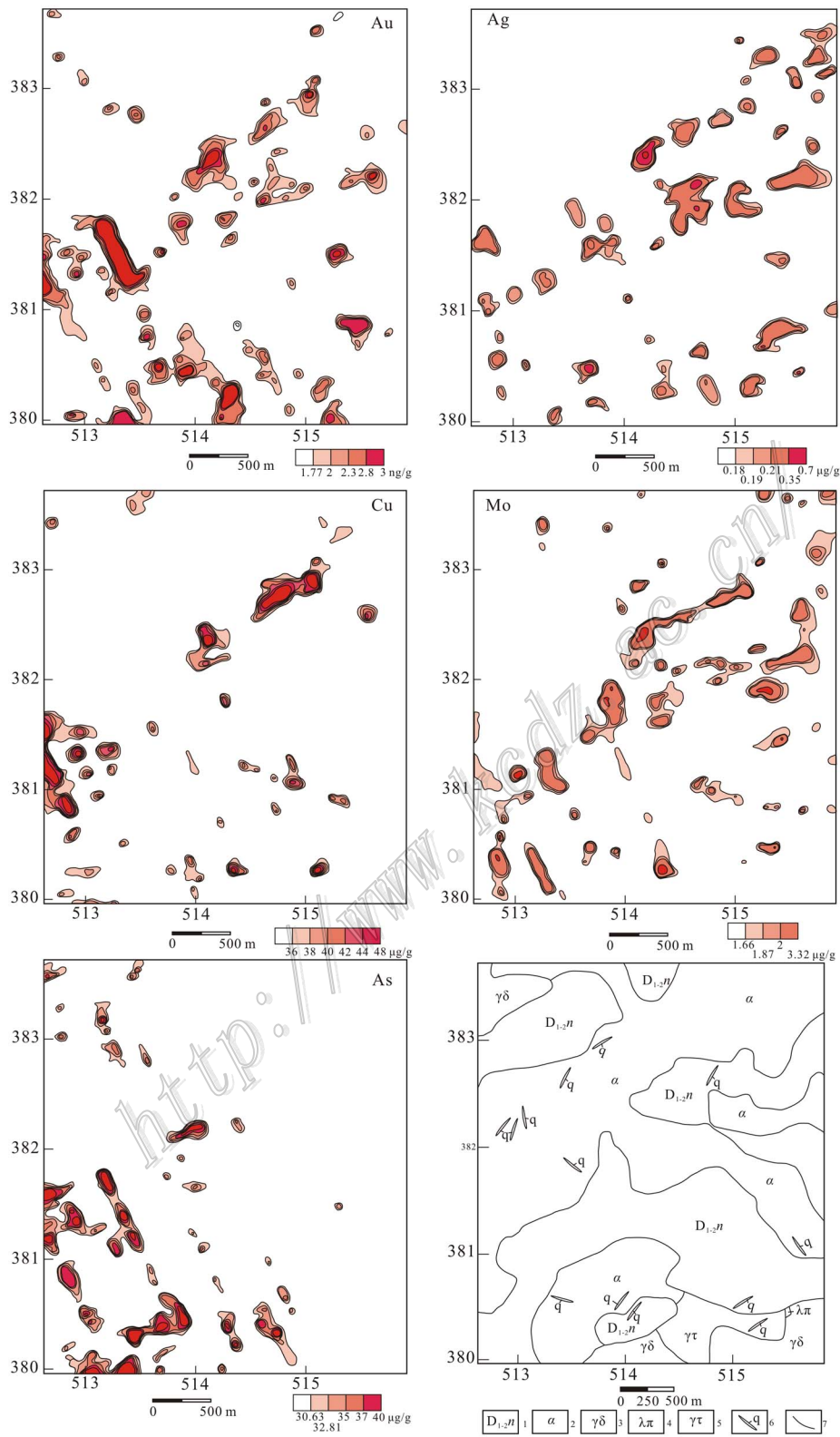


图 2 谢永贵家庭农场 1:10 000 万土壤测量 Au、Ag、Cu、Mo、As 异常图及地质图

1—中下泥盆统泥鲛河组；2—安山岩体；3—花岗闪长岩体；4—石英斑岩；5—细晶岩；6—石英脉；7—地质界线

Fig. 2 Contour map of Au, Ag, Cu, Mo and As anomalies and geological map of 1:10 000 soil geochemical survey in the Xie Yong-gui family farm area

1—Middle-Lower Devonian Nijihe Formation; 2—Adesite rock body; 3—Granodiorite body; 4—Quartz porphyry; 5—Aplite; 6—Quartz vein; 7—Geological boundary

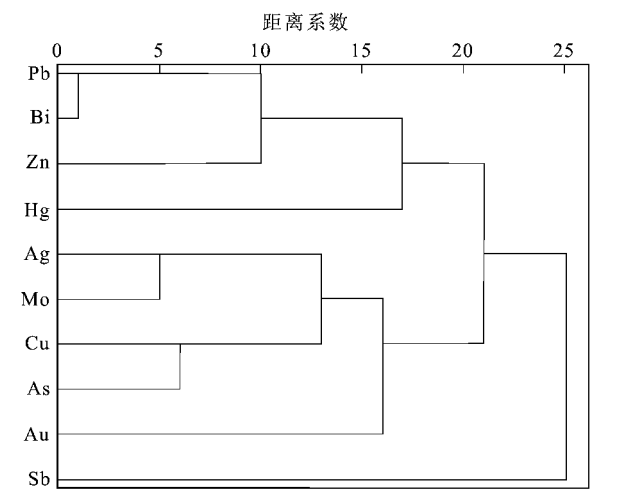


图 3 谢永贵家庭农场一带土壤化探 10 种元素 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 R-cluster analysis of ten trace elements in the Xie Yong-gui family farm area

表 1 谢永贵家庭农场一带元素间皮尔森相关系数矩阵

Table 1 Pearson correlative coefficient matrix between the elements in the Xie Yong-gui family farm area										
元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Sb	Bi	As	Hg
Au	1.00									
Ag	0.49	1.00								
Cu	0.47	0.61	1.00							
Pb	0.40	0.57	0.24	1.00						
Zn	0.37	0.44	0.74	0.67	1.00					
Mo	0.47	0.87	0.72	0.58	0.52	1.00				
Sb	0.21	0.2	0.23	0.24	0.23	0.21	1.00			
Bi	0.26	0.48	0.44	0.60	0.74	0.56	0.22	1.00		
As	0.60	0.50	0.82	0.40	0.36	0.67	0.25	0.31	1.00	
Hg	0.06	0.36	0.07	0.51	0.32	0.28	0.21	0.65	0.00	1.00

3.2 因子分析

因子分析是利用降维的思想,从研究原始变量相关矩阵内部结构出发,把一些具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合因子的一种多元统计分析方法。其步骤为:确定因子载荷,进行因子旋转并计算因子得分,其初始因子载荷矩阵不是唯一的,需进行因子旋转,得到更具实际意义的公共因子。为了确定合理的、对成矿作用具有指示意义的元素组合,笔者对各元素的分析数据进行检验,得到 KMO 值为 0.686, Bartlett 球形检验显著性概率是 0, 小于 1%, 说明处理结果适合作因子分析。

本文对 6237 组元素分析数据进行了 R 型因子分析,其中 F1 因子的方差贡献率为 36.31%, F2 因

子的方差贡献率为 26.26%, F3 因子的方差贡献率为 10.12%, 没有一个主因子所占的方差贡献率超过 50%, 这意味着,本区分析数据的方差贡献率收敛较慢,说明 10 个元素的综合信息比较分散,很难找到一个综合主因子来表征,也说明该区土壤中各元素的物质来源和成因比较复杂。依据特征根大于 1,选取前 3 个因子作为主因子(F1、F2、F3),其累计方差贡献率为 72.69%,虽然本区因子累计方差贡献率低于 80%,但从处理结果来看能够综合反映本区的成矿作用特征,可以比较全面地反映 10 个元素的主要信息。因此得出 3 组关联(按因子载荷大于 0.50 递减排列)(表 2):

- 谢永贵家庭农场:
- F1(成分 1)-Cu、As、Mo、Au、Ag;
- F2(成分 2)-Bi、Pb、Zn、Hg;
- F3(成分 3)-Sb;

谢永贵家庭农场一带土壤化探元素主因子 F1 中 Cu、As、Mo、Au、Ag 具有较高的载荷(表 2),说明 Cu、As、Mo、Au、Ag 主要为同一成矿作用的产物。因此,主因子 F1 代表中低温金的主要矿化作用,是反映石英脉-蚀变岩型金矿化的指示元素组合。F2 因子中载荷较高的元素是 Bi、Pb、Zn、Hg,可能代表了中温多金属硫化物矿化作用,即具有热液型多金属硫化物矿化作用的特点。这与聚类分析的结果在分类上具有一致性。聚类分析中 Ag、Mo 的相似系数为 0.87, Cu、As 相似系数为 0.82, Au 与 Cu、As、Mo、Ag 的相似系数均大于 0.40。本次研究元素分析数据的因子分析与聚类分析结果相似,均表现为组内

表 2 谢永贵农场一带旋转后因子载荷矩阵

Table 2 Rotated factor loading matrix for the Xie Yong-gui family farm area				
元素	F1	F2	F3	
Au	0.528	-0.035	-0.041	
Ag	0.520	0.322	-0.308	
Cu	0.721	0.073	0.156	
Pb	0.126	0.753	0.009	
Zn	0.319	0.516	0.257	
Mo	0.622	0.320	-0.196	
Sb	-0.012	0.055	0.860	
Bi	0.079	0.815	0.050	
As	0.718	-0.055	0.097	
Hg	-0.310	0.592	-0.196	
特征根(λ)	2.630	1.630	1.010	
累计方差贡献率/%	36.310	62.570	72.690	

元素的相关性较大并且在元素组合上相一致,组间元素的相关性尽量小的特点,但不同的是因子分析不是对原始变量的重新组合,而是对原始变量进行分解,找出影响变量的公共因子,从而简化数据(李新蕊 2007)。本文利用因子分析将原始数据分解为 F1 因子、F2 因子和 F3 因子,有利于对数据进行评价。

因子得分值反映每个样品在各种地质作用中的属性,是勘查地球化学中经常应用的参数之一,因子得分绝对值愈高说明该因子代表的地质过程在样品上的表现愈强烈。因子得分值可用以下 2 种方法计算,一种是利用全样品进行因子分析的计算,并得出相应的因子得分值;另一种是以典型地质体的因子分析结果为模型,计算其他地质体的因子得分值(魏浩等 2011)。本文采取第一种方法,通过谢永贵家庭农场一带正交因子得分矩阵对 6237 组样品分别计算每个样品的因子得分值(表 3)。

3.3 趋势面分析

地球化学中应用的趋势面分析认为元素具体的化探值 Z_i 由反映总体背景区域变化的 T_i 、反映局部异常变化的 N_i 和其他随机因素 e 所组成,即: $Z_i = T_i + N_i + e$ 。通过拟合趋势面将 T_i 和 $N_i + e$ 进行剥离,再通过正剩余均值来代替其他随机因素的方法(赵鹏大 2004)滤掉随机分量 e ,保留具有实际意义的局部异常分量 N_i (即剩余异常分量),可通过 Sufer 软件实现上述操作(李随民等 2007)。

笔者将所得到的各元素的因子得分值进行趋势面分析,通过拟合趋势面将得到具有实际意义的因

子得分剩余异常(滤掉了随机分量 e),再根据因子得分剩余异常的大小(认为因子得分剩余异常愈大,成矿愈有利),将因子得分剩余异常 $N_i > 0$ 圈定为异常,绘制因子得分剩余异常等值线图(图 4)。F1 因子所代表的以 Cu-As-Mo-Au-Ag 为主的成矿作用呈北东向带状分布,矿化异常受中下泥盆统泥鳅河组及安山岩岩体接触带的控制。F2 因子所代表的 Bi-Pb-Zn-Hg 多金属硫化物成矿作用主要沿 F1 因子异常带分布。因此, F1、F2 因子得分异常可能是由同一成矿作用的不同矿化阶段引起的。

3.4 靶区圈定

地球化学预测与找矿的一般经验认为:“累加法”能够提高地球化学异常识别的宽度和衬度(马德云等 2002)。在阿荣旗谢永贵农场一带圈定靶区时,采用“多因子叠加法”,将叠加异常作为衡量本区地球化学异常的找矿标志之一。多因子叠加法采用逻辑分析,通过运算符“AND”、“OR”、“NOT”来连接多层因子图层的叠合关系,其逻辑关系可以表示为:①: $C = A \cdot \text{AND} \cdot B$,表示 A 因子异常与 B 因子异常同时存在的组合;②: $C = A \cdot \text{OR} \cdot B$,表示 A 因子异常与 B 因子异常合并组合;③: $C = A \cdot \text{NOT} \cdot B$,表示从 A 因子异常中去掉 B 因子异常的重叠部分。

本次工作将与成矿有关的 F1 因子得分剩余异常(Au-Ag-Cu-Mo-As)和 F2 因子得分剩余异常(Pb-Zn-Bi-Hg),按照异常场(异常空间分布)进行叠加,即按照:②: $C = A \cdot \text{OR} \cdot B$,其中 C 为多因子得分剩余叠加异常场;A 为 F1 因子(Au-Ag-Cu-Mo-As 元素组合)得分剩余异常场;B 为 F2 因子(Pb-Zn-Bi-Hg 元素组合)得分剩余异常场;其中 C 叠加异常场为 A、B 异常场空间位置的函数。本次研究共圈定了 4 个异常靶区,分别为 I、II、III、IV 号异常区,异常靶区总体呈北东向带状展布,异常总体叠加明显,靶区圈定形态规整,异常靶区主要位于安山岩体与中下泥盆统泥鳅河组地层的接触带,异常整体走向与地层、构造线、接触带展布方向一致(图 5)。

4 结论及建议

应用数学地质方法对多元地球化学数据中的核心信息进行处理,有助于进行合理的地质-地球化学解释。本文利用该方法对阿荣旗谢永贵家庭农场一带土壤化探数据进行了分析,得出如下结论和建议:

表 3 阿荣旗谢永贵农场一带因子得分系数矩阵

Table 3 Factor scores coefficient matrix for the Xie yong-gui family farm area

元素	因子得分系数		
	F1	F2	F3
Au	0.260	-0.081	-0.043
Ag	0.216	0.096	-0.304
Cu	0.339	-0.042	0.139
Pb	-0.028	0.372	0.028
Zn	0.092	0.234	0.255
Mo	0.264	0.087	-0.194
Sb	-0.020	0.052	0.852
Bi	0.059	0.410	0.066
As	0.353	-0.109	0.086
Hg	-0.218	0.335	-0.176

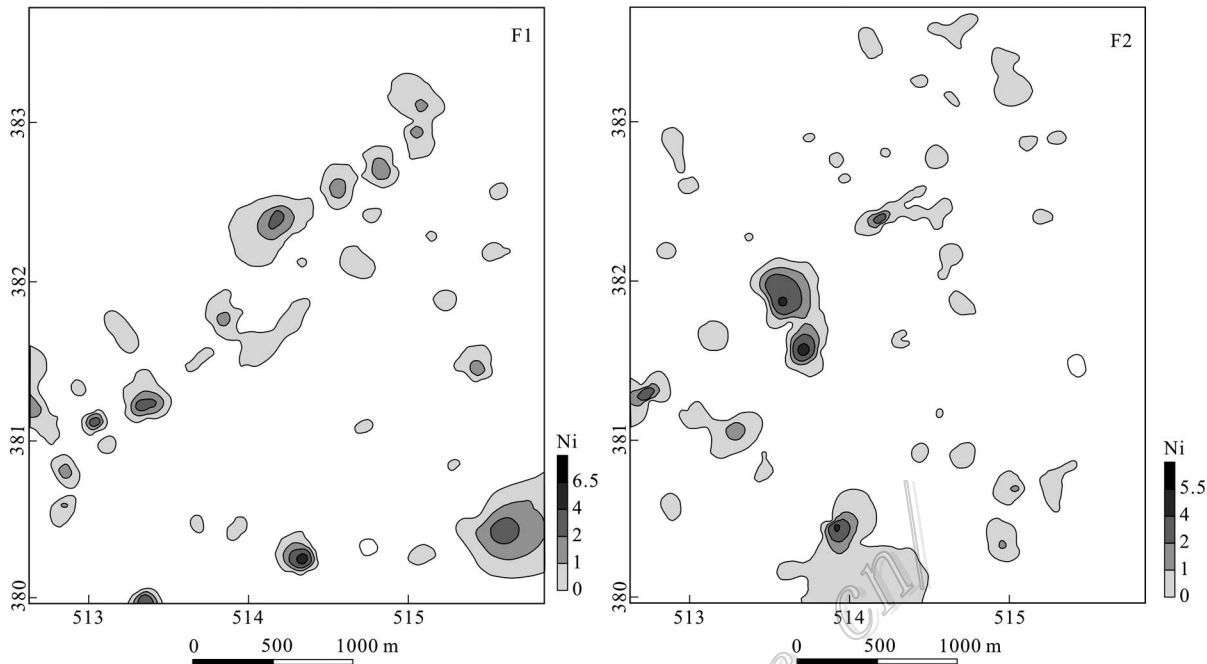


图 4 谢永贵农场一带土壤地球化学测量 F1、F2 因子得分剩余异常图

Fig. 4 Residual anomaly maps of F1, F2 factor score of the soil geochemical survey in the Xie Yong-gui family farm area

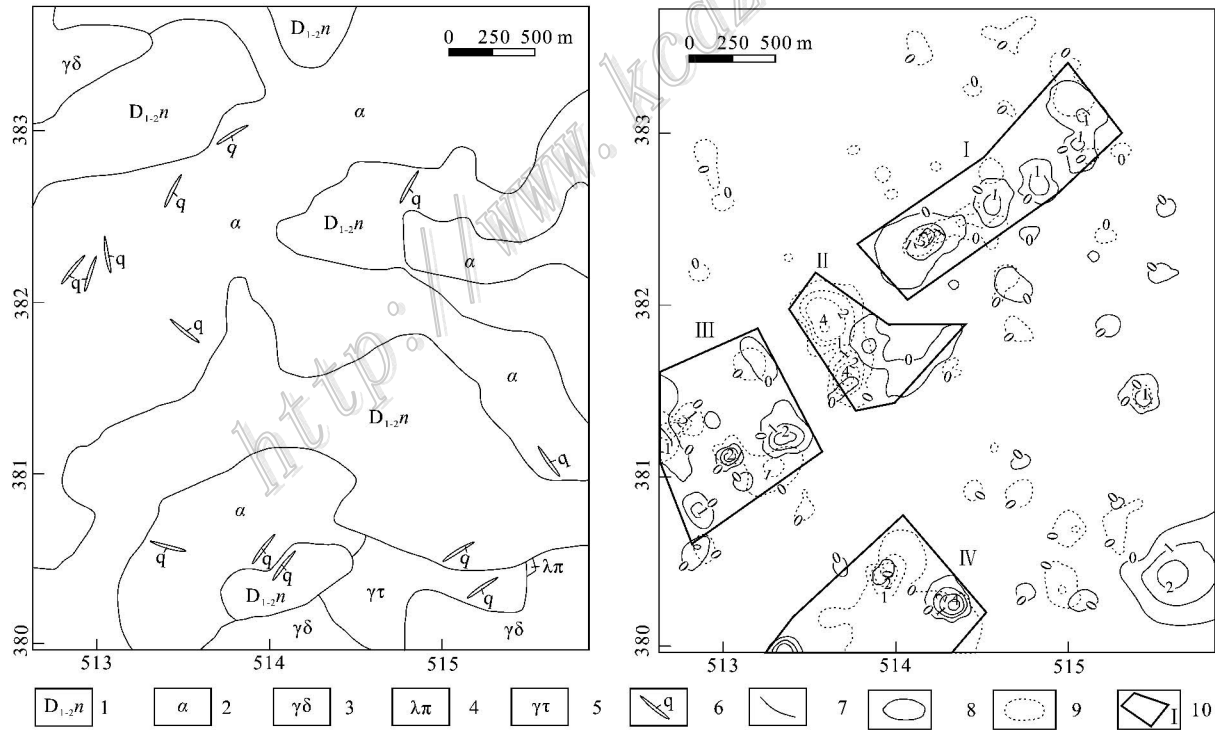


图 5 谢永贵农场一带土壤地球化学测量因子得分剩余异常叠加异常及靶区图

1—中下泥盆统泥陂河组; 2—安山岩体; 3—花岗闪长岩体; 4—石英斑岩; 5—细晶岩; 6—石英脉; 7—地质界线; 8—F1 因子得分剩余异常; 9—F2 因子得分剩余异常; 10—预测靶区及编号

Fig. 5 Maps of superimposed anomalies of residual factor scores and anomaly target of soil geochemical survey in the Xie Yong-gui family farm area

1—Middle-lower Devonian Niquihe Formation; 2—Andesite rock body; 3—Granodiorite body; 4—Quartz porphyry; 5—Aplite; 6—Quartz vein; 7—Geological boundary; 8—Residual anomaly map of F1 factor score; 9—Residual anomaly map of F2 factor score; 10—Predicted target and its serial number

(1) 本文利用多元统计学方法提取 F1、F2 因子的因子得分剩余异常,通过多因子叠加法圈定出 4 个异常靶区。异常靶区位于安山岩体与中下泥盆统泥鳅河组地层的接触带,异常整体走向与地层、构造线、接触带展布方向一致。异常形态完整,叠加性较好,以石英脉或蚀变岩型金矿化为主,是下一步重点的找矿区域。

(2) 聚类分析、因子分析结果表明,本区元素 As、Ag、Cu、Mo 与 Au 相关性较强,Pb、Zn、Bi、Hg、Sb 与 Au 相关性较差,反映了石英脉型金矿化或蚀变岩型金矿化的指示元素组合特征。

(3) 本区 Au、As、Cu、Mo、Ag 异常图与 F1、F2 因子得分剩余异常等值线图的异常分布情况基本吻合,因子得分剩余异常等值线图更为直观,分布范围进一步缩小,有助于异常解释与评价。

参考文献/References

核工业二〇八大队. 2012. 内蒙古阿荣旗谢永贵农场一带金多金属矿普查地质报告[R]. 内部资料.

黄宏业,肖建军,欧阳平宁,唐智源,王江波. 2009. 基于多元统计的微量元素地球化学特征分析——以广西资源县向阳坪地区构造蚀变岩型铀矿为例[J]. 地质找矿论丛, 24(3): 213-214.

李 宾,李随民,韩腾飞,韩玉丑. 2012. 趋势面方法圈定龙关地区化探异常及应用效果评价[J]. 物探与化探, 36(2): 203-207.

李随民,姚书振,韩玉丑. 2007. Sufer 软件中利用趋势面方法圈定化

探异常[J]. 地质与勘探, 43(2): 72-75.

李新蕊. 2007. 主成份分析、因子分析、聚类分析的比较与应用[J]. 山东教育学院学报, 124(6): 24-25.

马德云,高振敏,陶 琰. 2002. 构造地球化学勘查方法在个旧高松矿田找矿中的应用[J]. 矿床地质, 21(增刊): 1177-1180.

石文杰,魏俊浩,张德才,赵少卿,陈 冲,高 翔,翟亚峰,易 建. 2012. 基于数字高程模型因子分析的地球化学异常提取[J]. 物探与化探, 36(1): 103-107.

王小敏,张晓军,华 杉,张翰夫,罗 华. 2010. 小波勒山地区 1:5 万地球化学数据处理与异常评价[J]. 地质与勘探, 46(4): 683-684.

魏 浩,徐九华,刘振刚,金 岩,刘玉堂,吴家国. 2011. 内蒙古凉城县草几坝一带土壤化探的数学地质分析[J]. 地质与勘探, 47(3): 473-480.

吴 越,张 均,胡 鹏. 2010. 剩余异常分量因子得分法在西秦岭凤太矿集区西段化探找矿靶区优选中的应用[J]. 物探与化探, 34(3): 340-343.

姚玉增,金成沫,肖向军. 2005. 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, 29(1): 10-12.

赵鹏大. 2004. 定量地学方法及应用[M]. 北京:高等教育出版社. 54-57.

赵少卿,魏俊浩,高 翔,易 建,陈 冲,翟亚峰,田 宁,秦志刚,张文胜. 2012. 因子分析在地球化学分区中的应用:以内蒙古石板井地区 1:5 万岩屑地球化学测量数据为例[J]. 地质科技情报, 31(2): 27-33.

Davis J C. 1986. Statistical and data analysis in geology[M]. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons. 646p.