

# 基于数字高程模型因子分析的地球化学异常提取

石文杰<sup>1</sup>, 魏俊浩<sup>1</sup>, 张德才<sup>2</sup>, 赵少卿<sup>1</sup>, 陈冲<sup>1</sup>, 高翔<sup>1</sup>, 翟亚峰<sup>1</sup>, 易建<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 内蒙古自治区第二地质矿产勘查开发院, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

**摘要:** 利用R型因子分析方法, 对西北某地区1:5万图幅岩屑样测试数据进行了分析, 提取了5个代表性因子, 绘制地球化学分区图。结合区域成矿地质背景、研究区地质条件及野外地质调查发现的41个矿化点, 确定具有成矿意义的因子F3(Cu-Zn-Ag组合)。利用基于GIS数字高程模型对F3因子进行异常信息提取, 结果显示76%的铜矿化点与异常吻合, 较铜单元素圈定的异常提高了10%。异常主体位于志留系公婆泉组变质安山岩与石炭纪侵入岩的接触带(岩性偏安山岩), 野外异常查证发现这些异常部位多见矿化现象。研究区北部钾长花岗岩区出现的少量弱小异常, 为岩浆热液有关的黄铁矿化及黄铜矿化引起。槽探工程进一步验证了该方法在中大比例尺异常提取方面的好效果。

**关键词:** 因子分析; 数字高程模型; 化探异常; 地球化学分区; 西北地区

**中图分类号:** P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)01-0103-06

因子分析是识别和定量评价区域地球化学异常的一种有利工具。Davis<sup>[1]</sup>于1986年指出, 当分析因子(元素组合)被赋予客观合理的地质、成矿作用解释后, 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。为此, 可以选取因子得分最大者代表该样品有可能的成矿信息。近年来, 不少学者对因子分析在地学方面的应用作过研究<sup>[2-11]</sup>, 并取得了较好的效果。区域地球化学异常提取方法有很多, 无论是单元素变量还是综合变量(如因子分析), 都会不同程度地受到地质地球化学背景、自然地理景观、采样介质、分析手段等影响。陈希清<sup>[12]</sup>利用Mapgis数字高程模型中的邻域中值统计功能对湘西鄂西地区1:20万化探数据进行了计算, 所得到的模型较好地反映了背景的变化趋势, 利用残差法提取了Zn异常, 有效地降低了上述干扰因素的影响。

笔者运用R型因子分析法对研究区1:5万图幅的2446件岩屑样品测试数据进行分析, 结合区域成矿地质特征、因子得分地球化学分区图、研究区地质背景及野外矿化蚀变现象, 筛选出与成矿有关的因子变量, 计算各个样品的因子得分, 并借助Mapgis数字高程模型中的邻域中值统计功能, 对筛选出的因子进行异常信息的提取。

## 1 工作区地质背景

研究区位于北山造山带北部, 南侧为明水—石板井—小黄山蛇绿岩带, 地层分区隶属塔里木—南疆地层大区, 中天山—马鬃山地区分区, 马鬃山地区小区。中元古界地层出露北山群石英岩、白云母石英片岩、结晶灰岩、黑云母石英片岩、黑云母片岩及少量基性火山岩等; 古生界地层主要出露公婆泉组中基性—酸性火山熔岩、火山碎屑岩夹少量大理岩; 中生界地层出露龙凤山组、赤金堡组, 龙凤山组主要为砾岩、砂岩、页岩夹煤线等, 赤金堡组主要为黏土岩、粉砂岩; 新生界主要为第四系地层(图1)。

岩浆活动主要集中在海西中期与晚期, 区内侵入岩出露面积较大, 约占总面积的40%。侵入岩岩性主要为黑云母花岗岩、钾长花岗岩等。

由于工作区的主体部分紧靠东天山, 大地构造背景与区域地质演化极为相似<sup>[13-16]</sup>, 因此东天山地区大型斑岩型铜矿床的发现, 对内蒙古—甘肃—新疆交界的北山地区寻找同类型矿床具有重要的指导意义。工作区铜、金、铁等金属矿产资源丰富, 并有大量黄铜矿化、磁铁矿化、孔雀石化、黄铁矿化、褐铁矿化等矿化(蚀变)点, 矿化点地质及蚀变特征与区域典型矿床的地质特征极其相似(表1)。

收稿日期: 2010-12-22

基金项目: 内蒙古自治区国土资源厅地质矿产调查项目(NMKD 2008-32)

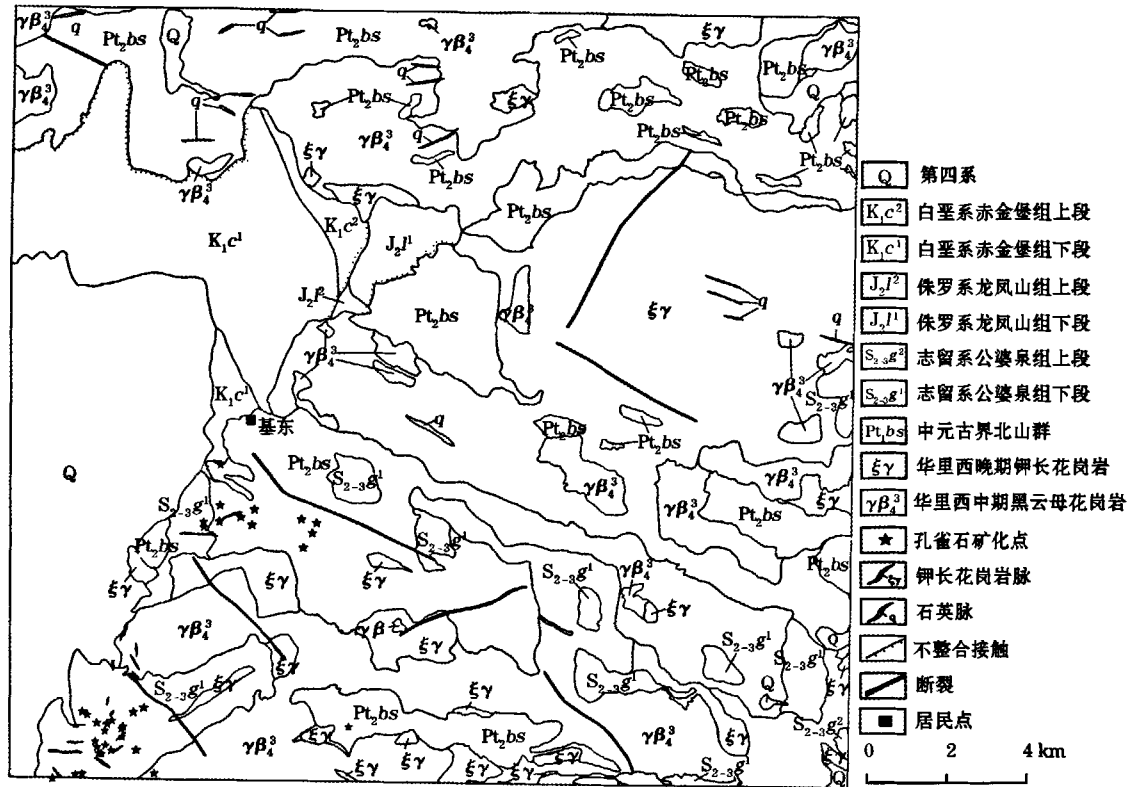


图1 工作区实测地质

表1 内蒙古—甘肃—新疆交界区与东天山斑岩型铜矿地质特征对比

	东天山土屋铜矿床 <sup>[17-20]</sup>	北山公婆泉铜矿床 <sup>[15,21-24]</sup>	北山额勒根乌兰乌拉铜矿预查区 <sup>[23]</sup>	研究区
构造环境	塔里木板块与准噶尔板块碰撞对接缝合带北侧, 石炭纪增生拼贴岛弧带	哈萨克斯坦板块北侧, 志留纪火山岛弧带	哈萨克斯坦板块与西伯利亚板块碰撞对接带北侧, 早古生代地体拼贴—增生带(岛弧带)	明水—石板井—小黄山蛇绿岩带(岛弧带)
成矿围岩	石炭系企鹅山群中基性火山熔岩, 夹少量内源碎屑岩	志留系公婆泉群中基性火山熔岩, 夹少量陆源碎屑岩。海西中晚期花岗闪长斑岩和英安斑岩也常构成铜矿床的围岩	奥陶系咸水湖组中基性火山熔岩和海西期花岗岩类侵入岩	志留系公婆泉群中基性火山熔岩, 夹少量陆源碎屑岩。英安斑岩也常构成铜矿化点的围岩
侵入岩	海西中晚期闪长玢岩和斜长花岗岩	海西中晚期辉长岩、辉绿玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩	海西中期钾长花岗岩、花岗闪长斑岩和花岗闪长岩	钾长花岗岩、黑云母花岗岩, 少量酸性斑岩脉
蚀变特征	从矿体中心向两侧依次为石英英核、黑云母化带、石英绢云母化带、泥化带和青磐岩化带	自矿体中心向外依次为次生石英岩、黑云母花、硅化、钾长石化、绿泥石化和碳酸盐化	自矿体中心向外依次为硅化、钾长石化、绿帘石化和绿泥石化	硅化、钾化、绿泥石化、褐铁矿化, 局部可见小岩体, 岩体具云英岩化

## 2 异常信息提取与评价

### 2.1 方法原理

因子分析是从数据矩阵中获取多个主因子, 每个主因子都可能指示出某种地质上具有成因联系的元素共生组合, 用于地质研究并指导找矿。对化探测试数据进行因子分析, 每个样品可获得一个对应的因子得分, 计算公式为<sup>[25]</sup>

$$F_k = a_k R^{-1} X,$$

式中,  $F_k$  为因子得分;  $a_k$  为任一样品点第  $k$  个主因子载荷向量, 设  $a_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{pk})'$ ,  $p$  为变量(元素)数;  $X$  为各变量在该样点上的(对数标准化)数

据,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ ;  $R$  为各变量(元素)间的相关矩阵,  $R = (r_{ij})_{p \times p}$ 。

运用因子得分提取的异常信息, 是一种综合异常信息。然而对于每个样品, 由于地质地球化学背景以及后期风化、热液蚀变、变质等影响, 筛选出的可能与矿化有关的因子变量不一定能明显地反映出矿化信息, 低缓异常的识别同样需要重视。

多年来, 我们主要借助数学方法模拟背景曲面, 但地球化学背景是一个崎岖不平的面, 背景值随每点的地质、地球化学以及景观条件不同而不断变化<sup>[26]</sup>。为了尽可能真实地反应地球化学变量的背景趋势, 笔者借助 Mapgis 数字高程模型中的像元邻

域统计功能,生成以因子得分视值(因子得分经插值生成的规则网格节点值)为高程的栅格模型,以每一像元为中心,对固定窗口内的像元进行统计,选用合适的统计结果作为输出数据层中对应的像元值,模拟区域地球化学背景曲面。像元邻域统计时可改变统计窗口的大小,选择最小值、最大值、高程范围、累加值、平均值、标准偏差及中值进行统计。由于中值不易受数据分布规律及特高值的影响<sup>[27]</sup>,而是与窗口内像元个数有关,因此选择中值的统计结果作为像元值来模拟区域地球化学背景曲面,然后运用数字高程模型系统中的规则网差值运算(或数学表达式计算——求差)功能,对模拟的空间背景场值和因子得分经插值生成的规则网进行差值运算,从而削弱地质地球化学背景、地理景观、样品分析批次不同等的影响,有效识别低缓异常<sup>[12]</sup>。

2.2 实现过程

工作区共采集 2 466 个样品,分析元素 Au、Ag、

Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、W、Sn、Mo 含量。对 1: 5 万的原始数据进行对数变换,降低数据中特高值的影响。利用巴特利特球度检验和 KMO 检验对所选数据进行相关关系检验,概率  $P$  小于给定的显著性水平  $\alpha$  时,认为原有变量适合作因子分析;KMO 值越接近于 1,意味着变量间的相关性越强<sup>[28]</sup>。工作区 KMO 值为 0.771, 概率  $P$  值为 0,适合作因子分析。采用基于主成分模型的 R 型因子分析方法,求出相关系数矩阵的特征根,选择特征根大于 1 和累计方差贡献率大于 70% 的 5 个因子:F1 为 W、Bi、Mo 组合;F2 为 As、Sb 组合;F3 为 Cu、Zn、Ag 组合;F4 为 Pb、Sn 组合;F5 为 Au(表 2)。

根据因子得分地球化学分区(图 2),矿化点主要分布于 F3 因子范围内,F3 因子与公婆泉组地层吻合程度较高。Cu、Zn 表现为亲硫性,Zn 活动性相当高,迁移能力强,在土壤中易析出,而 Ag 则可能与区内的断裂构造有关,这与公婆泉地层中大量发

表 2 工作区正交旋转因子载荷矩阵

成分	$\lg(w_w)$	$\lg(w_{Bi})$	$\lg(w_{Mo})$	$\lg(w_{As})$	$\lg(w_{Sb})$	$\lg(w_{Zn})$	$\lg(w_{Cu})$	$\lg(w_{Ag})$	$\lg(w_{Pb})$	$\lg(w_{Sn})$	$\lg(w_{Au})$
F1	0.758	0.668	0.570	0.256	0.277	0.303	0.348	-0.150	0.103	0.308	0.207
F2	0.184	0.225	0.275	0.897	0.885	0.071	0.245	0.141	-0.004	0.146	0.090
F3	0.067	0.202	0.284	0.120	0.137	0.787	0.729	0.609	-0.245	0.190	0.065
F4	0.189	0.115	0.038	0.063	0.087	0.025	-0.326	0.544	0.795	0.731	-0.010
F5	0.061	0.153	0.112	0.090	0.039	-0.034	0.099	0.258	0.015	-0.074	0.945

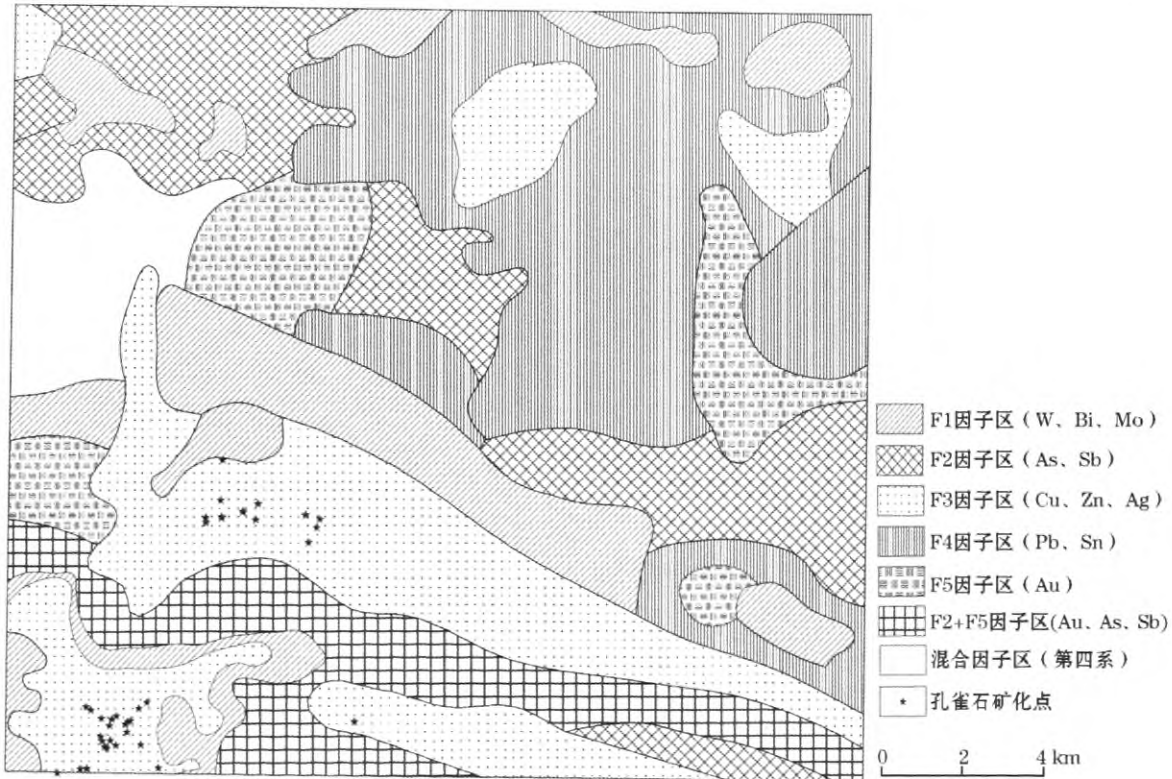


图 2 工作区地球化学分区

育的 NE、NW 向石英脉相吻合。F1 因子为高温元素组合,主要分布于岩体与北山群交界附近。F2 因子中 As、Sb 同为第 V 主族元素,属低温半金属两性元素,地球化学行为相近,迁移能力较强,As 为亲铜元素。从研究区地质背景看,F2 因子主要分布在北部的北山群地层中,附近出露有黑云母花岗岩。F4 因子中,Pb 是亲酸性元素,Sn 属高温元素,易富集于酸性的岩体中。从分布的范围看,Pb、Sn 主要集中在研究区北部的钾长花岗岩体中。F5 因子在各变量上的载荷相当小甚至存在负载,表明金富集具较大的独立性。图中白色区域(第四系)采样物质为多源混合而成(汇水盆地),因子类型较为杂乱,不能代表采样位置的地球化学背景,因此将其定义为混合因子区。

根据研究区的地质背景、矿化蚀变类型,对比区域成矿特征,筛选出可能与成矿有联系的因子 F3,采用反距离加权法将其对应的每个样品的因子得分进行规则网格化,并注意不同比例尺的网格间距,以能最真实地反应地球化学数据原貌为准,一般采用平均采样间距。研究区平均采样间距为 400 m,因此网格化间距采用 400 m。利用 Mapgis 中的数字高程模型将生成的网格数据导入,形成栅格图层。为了消除某些像元特高值的影响,首先对生成的栅格图层进行 3×3 低通滤波,以图层中某一个像元为中心,以固定大小的窗口进行移动,统计周围相邻像元的中值。经过对比后认为采用 7×7(2.8 km×2.8 km)的窗口效果最好,能有效识别异常。用网格化的原始数据和拟合的背景曲面做差值,对残差数据进行处理,以残差数据的均值+1.65 倍标准离差为异常下限圈定异常。操作流程见图 3。

### 2.3 异常评价

将 F3 因子生成的网格化数据引入 GIS 数字高程模型系统中进行异常信息的提取,考虑到数据的间隔较小,笔者以异常下限的 1、1.5、2 倍作为异常的外带、中带和内带(图 4)。圈定的异常与矿化点吻合程度达 76%,且 A4~A12 号异常主要分布在公婆泉地层中,少量异常(A1、A2)分布于北山群和花岗岩中,异常的长轴方向与地层和构造线方向一致,具有明显的三级浓集分带。

工作区已知的铜矿化点可分为两类,一类为孔雀石化石英脉,从 A7、A11 号异常处可见石英脉的产出密度较大,产状有两组,分别沿片理和切穿片理方向;另一类为孔雀石化变质安山岩,孔雀石呈浸染状和薄膜状,偶尔在岩石中见新鲜的黄铜矿,附近围岩可见强烈硅化、绿帘石化、褐铁矿化、钾化等蚀变,

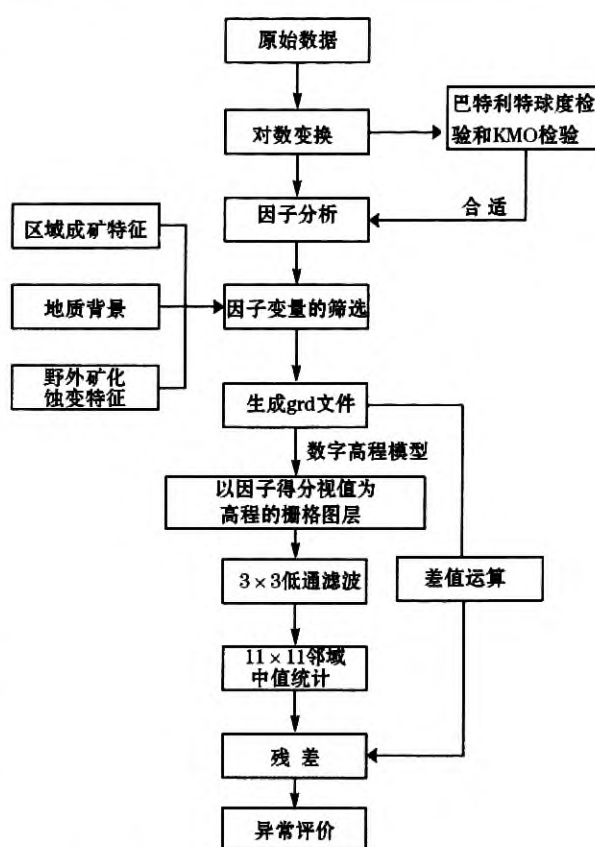


图 3 异常信息提取流程示意(据参考文献[12]修改)

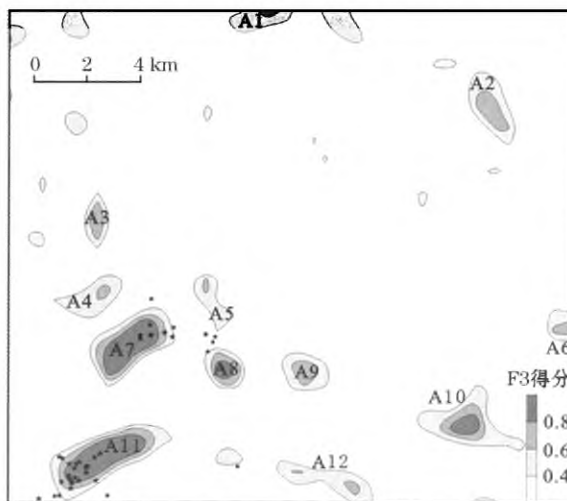


图 4 工作区 F3 因子得分的剩余异常

且围岩中常见新鲜的酸性斑岩脉,两侧的围岩往往发生破碎现象,部分可见孔雀石。在岩体中出现了多个低缓异常,与花岗岩中发育的大量石英脉以及其他脉岩类有关,其中石英脉具有褐铁矿化,部分可见斑点状孔雀石。另外部分弱小异常出现在钾长花岗岩区(如 A2 号异常),野外异常查证发现这些弱小异常与褐铁矿化、弱孔雀石化石英脉和钾长花岗岩脉有关。A3 号异常对应于第四系,A4 号异常区域中出露有小岩体,岩体风化强烈,异常原因不清。

槽探工程位于 A7 与 A11 号异常中,其中 A11 异常中的探槽长 350 m,探槽内可见片理化的变质安山岩和酸性斑岩脉,安山岩主要发育硅化、绿帘石化、褐铁矿化,局部发育孔雀石化,孔雀石主要呈浸染状和薄膜状分布,酸性斑岩脉无蚀变或具弱褐铁矿化。槽探化学样品分析结果显示,铜矿化体长度共 16 m,连续长度最大为 6 m。A7 异常中探槽长 120 m,发现铜矿化体 2 m。

根据邻域中值统计像元残差法<sup>[12]</sup>圈定工作区的铜异常(图 5),异常浓集分带  $w(\text{Cu})$  为  $(0.12 \sim 0.24) \times 10^{-6}$ ,与因子分析所得到的异常结果相比,异常主体分布一致(B6 ~ B14 号异常),均在公婆泉地层中,与矿化点吻合程度达 68%,说明邻域中值统计像元残差法对于单元异常信息的提取效果也很好,圈定的铜异常浓集分带明显,但对于岩体中局部存在的弱矿化石英脉没有显示。B2、B3 号异常位于钾长花岗岩中,钾长花岗岩中的组成矿物(黑云母,钾长石等)受区域构造变质作用已成定向排列,野外异常查证中没有发现明显的矿化线索。

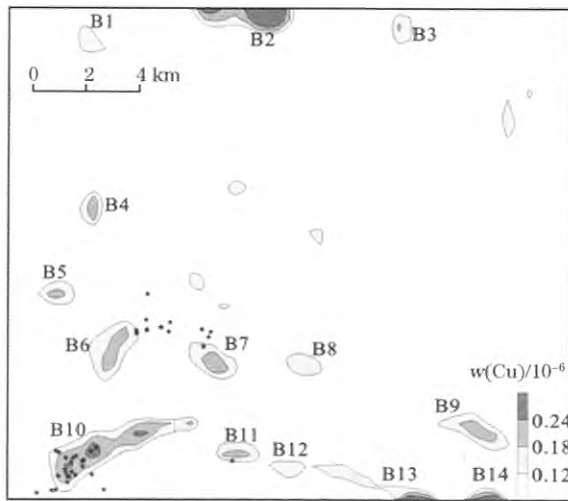


图 5 工作区铜的剩余异常

### 3 结论

(1)以因子分析为基础,结合区域成矿地质背景、典型矿山成矿地质特征、研究区地质条件、地球化学分区及野外地质调查等研究,可以有效地筛选出与成矿有关的因子变量。

(2)应用 Mapgis 数字高程模型中的邻域中值统计功能对由因子得分生成的规则网格数据进行背景校正,并用残差数据提取异常信息,不仅在一定程度上避免了单元提取异常的单一性和局限性,而且能有效地识别低缓异常,所提取异常与研究区的矿化点吻合较好。探槽工程也验证了该方法在异常提

取方面效果较好。

(3)因子分析所圈定的地球化学分区与研究区实际的地质情况相符,验证了地球化学分区在中大比例尺预测中的可行性。

### 参考文献:

- [1] Davis J C. Statistical and Data Analysis in Geology [M]. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons. 1986:646.
- [2] 金友渔. 矿化地质异常的演化趋势因子分析[J]. 中国地质大学学报:地球科学,1991,16(3):295-302.
- [3] 孙华山,赵鹏大,张寿庭,等. 因子分析在成矿多样性定量研究中的应用——以滇西北富碱斑岩矿产类型成矿多样性分析为例[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2005,32(1):82-86.
- [4] 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):10-12.
- [5] 余先川,王世称,王桂安. 稳健协同克立格因子分析及其在化探中的应用[J]. 中国地质大学学报:地球科学,1998,23(2):171-174.
- [6] 董毅. 因子分析在水系沉积物测量地球化学分区中的应用探讨——以青海都兰地区为例[J]. 矿产与地质,2008,22(1):78-82.
- [7] 董庆吉,陈建平,唐宇. R 型因子分析在矿床成矿预测中的应用——以山东黄埠岭金矿为例[J]. 地质与勘探,2008,44(4):64-68.
- [8] 董毅,范丽琨,段焕春,等. 青海大坂山地区水系沉积物测量元素组合分区[J]. 地质与勘探,2009,45(1):70-74.
- [9] 焦保权,白荣杰,孙淑梅,等. 地球化学分区标准化方法在区域化探信息提取中的应用[J]. 物探与化探,2009,33(2):165-169.
- [10] 王永华,龚鹏,龚敏,等. 成矿带 1: 20 万水系沉积物地球化学分区的方法及地质意义:以西藏冈底斯铜多金属成矿带为例[J]. 现代地质,2010,24(4):801-806.
- [11] 戴慧敏,鲍庆中,宫传东. 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):246-251.
- [12] 陈希清,杨晓君,陈富文,等. 应用 MAPGIS 数字高程模型提取区域地球化学异常信息的方法探讨[J]. 地球学报,2009,30(1):119-125.
- [13] 李春昱,王荃,刘雪亚,等. 亚洲大地构造图说明书[M]. 北京:地图出版社,1982.
- [14] 涂光炽. 初议中亚成矿域[J]. 地质科学,1999,34(4):397-404.
- [15] 戴霜,任育智,高兆奎,等. 公婆泉铜矿岛弧型含斑岩地质地球化学特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2002,38(5):100-107.
- [16] 代双儿. 北山地区板块构造演化及成矿系列研究[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2001,37(6):112-120.
- [17] 芮宗瑶,王福同,李恒海,等. 新疆东天山斑岩铜矿带的新进展[J]. 中国地质,2001,28(2):11-16.
- [18] 任秉琛,杨兴科,李文明. 东天山土屋特大型斑岩型铜矿成矿地

- 质特征与矿床对比[J]. 西北地质, 2002, 35(3): 68-75.
- [19] 陈文明, 曲晓明. 论东天山土屋—延东(斑岩)铜矿的容矿岩[J]. 矿床地质, 2002, 21(4): 331-340.
- [20] 李智明, 赵仁夫, 霍瑞平. 新疆土屋—延东铜矿田地质特征[J]. 地质与勘探, 2006, 42(6): 1-4.
- [21] 王大为, 邹治平, 李绍雄. 甘肃公婆泉铜矿成矿地质特征及矿床成因[J]. 西北地质科学, 1995, 16(1): 115-122.
- [22] 游小毛. 甘肃公婆泉斑岩铜矿地质特征及形成机制[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(1): 14-15.
- [23] 聂风军, 江思宏, 白大明, 等. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 203-281.
- [24] 许荣科. 北山中北部金铜矿床区域成矿规律分析及成矿预测[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [25] 曾道明, 纪宏金, 高文, 等. R-Q型因子分析与对应分析[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(1): 78-80.
- [26] 周蒂. 分区背景校正法及其对化探异常圈定的意义[J]. 物探与化探, 1986, 14(4): 263-273.
- [27] 史长义, 张金华, 黄笑梅. 子区中位数衬值滤波法及弱小异常识别[J]. 物探与化探, 1999, 23(4): 250-257.
- [28] 薛薇. SPSS统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004, 9-12.

## GEOCHEMICAL ANOMALY EXTRACTION USING FACTOR ANALYSIS METHOD BASED ON MAPGIS DIGITAL ELEVATION MODEL

SHI Wen-jie<sup>1</sup>, WEI Jun-hao<sup>1</sup>, ZHANG De-cai<sup>2</sup>, ZHAO Shao-qing<sup>1</sup>, CHEN Chong<sup>1</sup>,  
GAO Xiang<sup>1</sup>, ZHAI Ya-feng<sup>1</sup>, YI Jian<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. No. 2 Institute of Geological and Mineral Exploration of Inner Mongolia, Bayannur 015000, China)

**Abstract:** This paper analyzed the 1: 50000 rock-scrap data obtained from northwestern China, using the R-mode factor analysis method. Geochemical subdivisions were carried out with the extracted five representative factors from the data. Then the authors decided factor F3 (Cu-Zn-Ag) which was related to mineralization, in comparison with regional mineralization characteristics, geological conditions and mineralization in the study area. Geochemical anomalies were extracted with the factor analysis method based on MAPGIS digital elevation model. The result suggests that the anomalies are well consistent with 76% Cu mineralizations, raising the efficiency by 10% in comparison with the single element copper geochemical anomalies. The main anomalies are located in Gongpoquan Group, particularly in the contact zone with parts of magmatic rocks. Mineralizations were found in most of the anomalies. In addition, some small anomalies were found in the K-feldspar granite, and field anomalies inspection has proved that these anomalies are caused by limonitization and malachite of quartz veins and K-feldspar granite. The project of trench has also proved the superiority of the method in the medium-large scale anomaly extraction.

**Key words:** factor analysis; digital elevation model; anomaly; geochemical subdivisions; northwestern region

**作者简介:** 石文杰(1985-),男,中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业在读硕士,主要从事于矿产勘查学研究。