

文章编号: 0258-7106(2006)01-0027-09

# 稳健估计方法在内蒙古新忽热地区水系沉积物 测量异常评价中的应用\*

李蒙文<sup>1</sup> 战明国<sup>2</sup> 赵财胜<sup>1</sup> 李峰<sup>3</sup> 赵红芳<sup>4</sup> 姚佛军<sup>1</sup> 陈莉<sup>5</sup> 汪莉丽<sup>5</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院, 北京 100037; 3 武警黄金第二支队, 内蒙古呼和浩特 010010; 4 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古呼和浩特 010010; 5 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要** 文章选择华北地台北缘新忽热地区 1:5 万水系沉积物金元素地球化学测量结果为实验数据, 通过多种稳健估计方法, 采用 Visual C 语言和 SPSS 统计分析程序, 对位置及尺度进行稳健估计, 并与传统的估计方法进行比较。研究表明, 对于偏态分布的观测数据, 根据稳健估计方法圈定的异常较传统方法更能准确地反映异常的规模和形态, 尤其能较好地显示大面积的弱异常。笔者认为, 在地球化学测量异常评价中, 应重视使用稳健估计方法, 并指出了该区下一步勘查找矿的方向。

**关键词** 地球化学 水系沉积物测量 偏态分布 稳健估计 找矿方向 新忽热 内蒙古

中图分类号 P632

文献标识码 A

## Application of robust estimation methods to anomaly appraisal of stream sediment survey in Xinhure area, Inner Mongolia

LI MengWen<sup>1</sup>, ZHAN MingGuo<sup>2</sup>, ZHAO CaiSheng<sup>1</sup>, LI Feng<sup>3</sup>, ZHAO HongFang<sup>4</sup>,  
YAO FoJun<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>5</sup> and WANG LiLi<sup>5</sup>

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 No. 2 Gold Geological Party of CAPF, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 4 Inner Mongolia Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 5 Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

With several robust estimation methods based on Visual C and SPSS, the authors made a robust estimation of the location and scale of the Au element data from the 1:50 000 stream sediment survey in Xinhure area on the northern margin of the North China craton, and compared the results with those of the conventional approaches. It is shown that, for the skew distributional data, the robust estimation methods can better reflect the size and shape of the anomaly, especially the large-size weak anomaly, than the conventional approaches. It is held that the robust estimation methods should be taken into full consideration in the anomaly appraisal of geochemical survey. The ore-prospecting targets in this area are also pointed out in this paper.

**Key words:** geochemistry, stream sediment survey, skew distribution, robust estimation, ore-prospecting target, Xinhure, Inner Mongolia

\* 本文得到国家自然科学基金重点项目(编号:40434011)的资助

第一作者简介 李蒙文,男,1966年生,在读博士研究生,主要从事矿产地质勘查与研究。E-mail: mwllee@126.com

收稿日期 2005-05-13; 改回日期 2005-08-10。

在传统工作方法中,地球化学背景与异常值的确定是基于观测数据服从正态分布假设前提的。但是,由于元素的地球化学迁移以及在迁移期间体系与环境之间存在物质和能量的交换,因此,元素在地壳中的分布并不是均衡的(韩吟文等,2003)。所以,化探观测数据中可能包含多个总体,如矿体、矿化、蚀变、正常围岩等。当观测数据中存在特异值(特高值或特低值)或其他原因而不符合正态分布,亦即所谓“重尾分布”时,传统估计方法对总体分布的一些“扰动”缺乏抵抗力(孙山泽,2000),其统计结果会偏离真值(Thompson et al.,1993;何锡文等,1997)。为了使观测数据服从正态分布假设条件,前人提出了许多数据转换方法,诸如对数正态变换(Ahrens et al.,1954)、广义幂变换(Howarth et al.,1979)、角变换、平方根变换(赵鹏大,2004)等。实践证明,有些数据即使经过变换处理,也不能服从正态分布。在这种情况下,按照传统作法需修改原始观测数据,以适应估计的数学模型,或将样品中的特异值全部去掉,不参加统计,或用正常值的最大值代替特异值。现代质量管理理论认为,在控制条件下产生的测试结果都有其存在的合理性,将特异值舍弃是没有道理的(Rammsey et al.,1995)。可见,采用合适的估计方法建立相应的数学模型以适应偏态数据的分布特征,是准确反映地球化学背景及异常的基础,而修改数学模型以符合数据偏离统计假设使其估计更为稳健的过程就是稳健估计方法(侯景儒等,1994)。为了在地球化学异常评价中对偏态分布的数据总体建立较优的数学模型,本研究阐述了稳健估计方法实现的统计学原理和过程,并通过具体实例探讨了其在地球化学异常评价中的应用效果。研究表明,稳健估计方法能较好地适应偏态数据的分布特征,在成矿预测中具有重要的应用价值。

## 1 基本数学原理

### 1.1 稳健估计

所谓稳健估计,是构造一个新的统计量,该统计量具有稳健性,即受特异值的影响相对较小,而对大部分的分布具有很好的拟合性。在稳健估计学中,位置(location)及尺度(scale)的估计是2个基本问题,相当于传统统计学中的均值与均方差。

#### 1.1.1 位置估计

本文采用以下3种位置估计方法:

#### (1) $a$ 切尾均值

$$T = \frac{1}{(1-2a)n} \sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad 0 < a < 0.5 \quad (1)$$

当  $[a \cdot n] + 1 < i < n - [a \cdot n]$  时,  $a_i = 1$ ;

当  $i = [a \cdot n] + 1$  或  $i = n - [a \cdot n]$  时,  $a_i = a$ ;

当  $i < [a \cdot n] + 1$  或  $i > n - [a \cdot n]$  时,  $a_i = 0$ 。

$T$  为位置估计;  $x_i$  为元素分析结果;  $p = 1 + [a \cdot n] - a \cdot n$ ,  $[a \cdot n]$  表示  $a \cdot n$  的整数部分,  $n$  为样品总数。

#### (2) Huber 估计

$$T = \frac{1}{n_2} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_3} x_i + c \cdot s \frac{n_3 - n_1}{n_2} \quad (2)$$

$T$  为位置估计;  $x_i$  为元素分析结果;  $n_1$  是  $x_i \leq T - c \cdot s$  的样品数;  $n_3$  是  $x_i \geq T + c \cdot s$  的样品数;  $n_2 = n - n_1 - n_3$ ,  $n$  为样品总数;  $c$  为控制稳健性常数,取值通常为 0.35, 1.339 或 2.0。Huber 估计求位置要用迭代法进行,开始可用中位数代替均值,即  $T = med$ , 用中位绝对中位差代替均方差  $s$ 。

#### (3) Andrews 估计

$$T^{m+1} = T^{(m)} + c \cdot s \cdot \text{tg}^{-1} \left[ \sum_{i=1}^{n_2} \sin \left( \frac{x_i - T^{(m)}}{c \cdot s} \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^{n_2} \cos \left( \frac{x_i - T^{(m)}}{c \cdot s} \right) \quad (3)$$

$T$  为位置估计;  $x_i$  为元素分析结果;  $s$  可用中位绝对中位差估计;  $c$  为控制稳健性常数,通常取  $c = 1.340$ ;  $m$  为迭代次数。

#### 1.1.2 尺度估计

本文采用以下2种尺度估计方法:

#### (1) 中位绝对中位差

$$MAD = med [ x_i - med(x_i) ] \cdot 0.645 \quad (4)$$

该式表示相对于中位数的偏离的绝对值的中位数,即为尺度估计,  $x_i$  为元素分析结果。

#### (2) Huber 估计

$$s^2 = \frac{\sum_{i=n_1+1}^{n-n_3} (x_i - \bar{x}')^2}{n_2} \left[ (n-1)\beta - (n_1 + n_2 + \frac{(n_3 - n_1)^2}{n_2}) c^2 \right] \quad (5)$$

$$\beta = \mathcal{A} \left[ \frac{c^2}{2} - \frac{c}{\sqrt{2\pi}} e^{-c^2/2} - \frac{(c^2-1)}{\sqrt{\pi}} \int_0^c e^{-t^2} dt \right] \quad (6)$$

$s$  为尺度估计;  $x_i$  为元素分析结果;  $n_1$  是  $x_i \leq T - c \cdot s$  的样品数;  $n_3$  是  $x_i \geq T + c \cdot s$  的样品数;  $n_2 = n - n_1 - n_3$ ,  $n$  为样品总数;  $\bar{x}'$  为第一次迭代的均值(可取中位数);  $c$  为控制稳健性常数,取值通常为 0.35, 1.339 或 2.0。

## 1.2 K-S 检验

K-S 检验为柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验的简称,该检验属非参数单样本拟合优度型检验,用于比较某个变量观测值的累积分布函数与指定的理论分布间是否存在差异。假设  $F_0(x)$  是一个已知的分布函数,  $F_n(x)$  是未知的总体分布函数  $F(x)$  的一个较优的估计,取检验统计量

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)| \quad (7)$$

则样本数据服从指定分布,即  $F_n(x) = F_0(x)$  时,  $D$  的观测值应该较小,如果  $D$  的观测值较大,则零假设可能不存在。

## 2 应用实例

### 2.1 概况

研究区位于内蒙古包头市白云鄂博区西南约 70 km 处。其大地构造位置为华北地台北缘白云鄂博拗陷。区内出露地层为中元古界白云鄂博群碳质板岩、石英岩、砂岩、大理岩;奥陶系硅质板岩夹安山岩、大理岩、变质砂岩、安山岩夹凝灰岩;志留系砂岩夹板岩、变质细砂岩、大理岩夹板岩;石炭系火山岩、砂岩、板岩;侏罗系砂砾岩及火山岩。岩浆岩分布广泛,有加里东中晚期、华力西中晚期中酸性花岗岩、闪长岩、混合花岗岩,以及碳酸岩等基性、超基性岩。川井-化德区域性断裂穿过该区,次级断裂发育,地层褶皱强烈。加里东运动形成该区主要断裂,华力西运动则对这些断裂进行了改造(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。

多期构造与岩浆活动相互叠加,为金矿床的形成提供了有利的成矿条件,区内典型金矿床为长山壕金矿(图 1)。该矿床产于白云鄂博群碳质板岩中,其北侧出露华力西晚期钾长花岗岩体,南侧出露华力西中期花岗闪长岩体。高勒图弧形断裂(在研究区内,该断裂沿边汗乌拉-好依尔嘎查-长山壕一带延伸)从矿区北侧通过。矿化体为强烈硅化的碳质板岩蚀变破碎带,走向近 EW,地表露头长约 3 000 m,宽约 200 m。主矿体位于矿化体中部,其中的微裂隙多被密集平行排列的石英细脉充填,其西侧则膨大为石英脉透镜体。矿石中的金属矿物主要为黄铁矿,脉石矿物主要为石英。围岩蚀变主要有黄铁矿化、硅化、绿泥石化、绢云母化。黄铁矿呈条带状沿

层理分布,近地表裂隙中则以褐铁矿化为主。蚀变碳质板岩也有矿化显示,多在  $0.6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$  之间。矿化体东侧的围岩蚀变,硅化较强,而绿泥石化、绢云母化不发育。矿区南部,在地层与岩体的接触带上硅化发育。矿床的平均金品位为  $0.83 \times 10^{-6}$ 。目前,该矿床的控制储量已达大型规模<sup>①</sup>。

### 2.2 样品采集、测试与质量

在该区开展 1:5 万水系沉积物测量 600 km<sup>2</sup>。根据采样方法试验结果,确定采样介质为中粗砂,采样粒度为 2~4 mm,采样深度为 5~10 cm,采样密度为 4~6 个点/km<sup>2</sup>,找金的指示元素为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi。

#### 2.2.1 样品采集与质量

采用 1:5 万地形图做为野外采样工作手图,定点采用 GPS(型号 GARMIN Venture,水平定位误差小于 10 m)。采样前勾绘工作区内所有水系,以每 1 km<sup>2</sup> 为一个采样大格,在 1:5 万地形图上布点。布点原则是:采样点分布均匀,90% 以上的采样大格内都有采样点分布,采样点应布置在每一个格子中能最大限度控制汇水面积之处,80% 以上的采样点布置在一、二级水系中。开展野外作业时,采样点主要选择在水系交汇处、河流转弯内侧、河流由窄变宽处、转石背后、水流由急变缓处。

采样时,在水系 20~30 m 范围内采取多点组合样品,河流较宽时横向组合,河流较窄时纵向组合,工程号标注在采样点周围岩石、树木等容易看到的物体上,每条水系最上游一个点留有标记。研究区内有局部地段水系不发育,沟谷开阔,无水系沉积物,为了保证样品采样密度,采取土壤样品代替。全区共采集水系沉积物样品 2323 件,土壤样品 212 件,后者占全区总样品件数的 8.4%。

以重复采样方式对野外采样质量进行检查,随机重复取样 152 件,占样品总数的 6.0%,其中 146 件合格,合格率为 96.1%。

#### 2.2.2 样品测试与精度

样品经辊式破碎机中碎至粒度小于 0.83 mm,进行混匀、缩分,再经棒磨机细碎至粒度小于 0.074 mm,送化验室分析。

##### (1) 元素检出限与报出率

所有样品的分析工作均在武警黄金指挥部第二支队实验室完成。Au、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi 等 7 种

① 宁夏太平矿业有限公司, 2005. 内蒙古自治区乌拉特中旗浩尧尔忽洞金矿详查报告, 1~41(内部资料)。

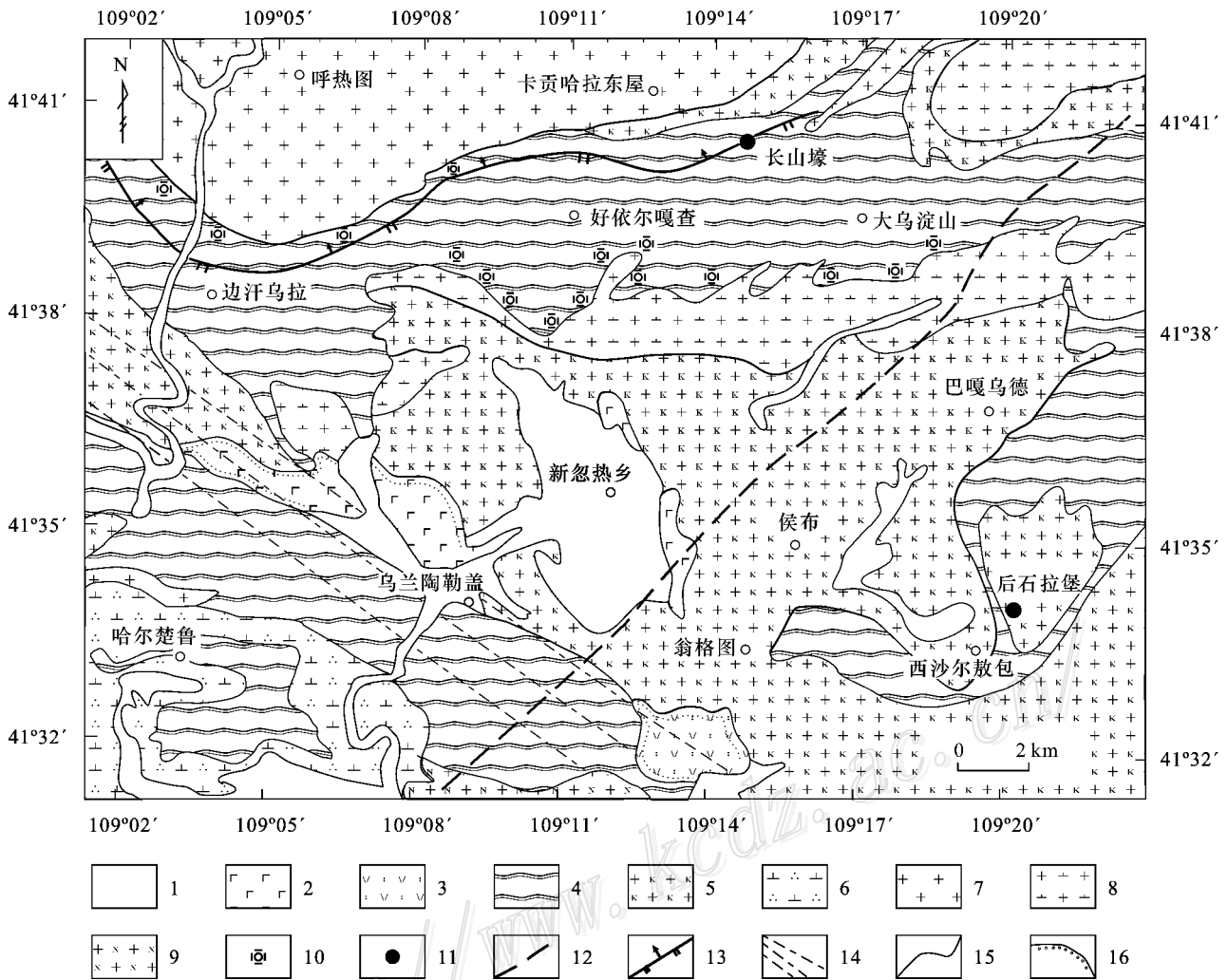


图1 新忽热地区区域地质略图(据1:200 000白云鄂博幅区域地质图修编)

1—第四系冲积沉积物 2—新近系玄武岩 3—侏罗系白女羊盘组火山凝灰岩 4—中元古界白云鄂博群碳质板岩 5—华力西晚期钾长花岗岩 6—华力西晚期石英闪长岩 7—华力西中期黑云母花岗岩 8—华力西中期花岗闪长岩 9—加里东晚期斜长花岗岩 10—硅化；11—金矿床(点) 12—推测断层 13—实测逆断层 14—糜棱岩化带 15—地质界线 16—不整合接触界线

Fig.1 Regional geological sketch map of Xinhuo area(modified from Geological Map of Baiyun Obo Region at the scale of 1:200 000)

1—Quaternary alluvium-diluvium; 2—Neogene basalt; 3—Jurassic Bainuyangpan Formation; 4—Carbonaceous slate of Mesoproterozoic Baiyun Obo Group; 5—Late Variscan potash feldspar granite; 6—Late Variscan quartz diorite; 7—Middle Variscan biotite granite; 8—Middle Variscan granodiorite; 9—Late Caledonian plagioclase granite; 10—Silicification; 11—Gold deposit (spot); 12—Inferred fault; 13—Reverse fault; 14—Mylonitization zone; 15—Geological boundary; 16—Unconformity

元素的报出率均达到90%以上;全区约有50%的样品其Ag含量小于 $0.03 \times 10^{-6}$ 。各元素实际检出限及报出率情况见表1。

(2) 元素测定方法与精度

各种元素的测定方法与精度见表2。金元素测定方法:取分析样品10g,经650℃高温灼烧1小时,用1:1王水热溶20~40min,然后用活性炭吸附,将富集金的活性炭在650℃下灰化后,加入定量缓冲剂,装入石墨电极,在发射光谱仪上以交流电弧为激

表1 元素检出限与报出率

Table 1 Detection limit and eligibility of tested elements

元素	检出限	报出率/%
Au	$0.3 \times 10^{-9}$	100
Ag	$0.03 \times 10^{-6}$	52.3
Cu	$1 \times 10^{-6}$	94.5
Pb	$1 \times 10^{-6}$	99.9
Zn	$3 \times 10^{-6}$	95.7
As	$0.5 \times 10^{-6}$	100
Sb	$0.2 \times 10^{-6}$	100
Bi	$0.1 \times 10^{-6}$	100

表 2 元素测定方法与精度

Table 2 Method and precision of element analysis

分析方法	仪器名称	仪器型号	测试元素	精度
化学光谱法	平面光栅摄谱仪	WP1	Au	定量
原子荧光法	原子荧光光谱仪	AFS-2202a	As, Sb, Bi	定量
发射光谱法	平面光栅摄谱仪	WP-2L	Ag, Cu, Pb, Zn	定量

发源进行摄谱,最后,将显影和定影后的感光板在测微光度计 9W 上进行测定。

表 4 金元素的位置及尺度估计

Table 4 Location and scale estimation of Au

位置的不稳健估计			位置稳健估计			离散尺度估计		
算术平均值	几何平均值	中位数	5% $\alpha$ 切尾均值	Andrews 估计	Huber 估计	算术标准差	中位绝对中位差	Huber 估计
1.63	0.87	0.80	0.90	0.77	0.82	7.32	0.54	0.08

注:Huber 法  $c = 1.339$ ,Andrews 法  $c = 1.340$ ,估计量单位:  $10^{-9}$ 。

表 5 金的背景及异常下限估计量

Table 5 Estimated background and threshold values of Au

方法	位置估计	离散尺度估计	异常下限
Huber	0.82	0.08	1.00
算术平均值	1.63	7.32	16.00

注:Huber 法  $c = 1.339$ ,估计量单位:  $10^{-9}$ 。

### 2.3 金元素统计分布特征

本文仅以金元素为例探讨稳健估计方法在地球化学异常评价中的应用效果。样品中金元素的分析结果报出率为 100%,作为研究区金异常指示元素具有代表性。

为了合理地确立金元素的分布模型,首先根据金元素的 2 535 个测试结果,用 SPSS 统计分析程序对其分布特征进行了研究,所得结果列于表 3。由表 3 可见,不论是原始数据,还是自然对数,金元素的 K-S 检验统计量都较大,双侧渐近概率均小于显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,并且偏度系数和峰度系数都大于零,所以,研究区内的金元素既不服从正态分布,也不服从对数正态分布,具有很高的离散性,属于正偏正峰态分布(沈恒范,1982;薛薇,2004)。这是由于该区岩性复杂,多期构造活动和强烈的岩浆作用相互叠加,影响和控制了金元素的分散与集中,从而形成了该区特有的地球化学场特征。显然,用传统的均值与标准差来估计背景和异常下限是不可靠的。根据以上讨论,笔者采用位置与尺度的稳健估计方

表 3 金元素正态分布检验表

Table 3 Statistics of Au normal distribution test

统计量	原始数据	自然对数	正态分布
K-S 检验	32.703	10.556	检验统计量较小
双侧渐近概率	0.000	0.000	大于显著性水平
偏度系数	14.489	2.572	接近 0
峰度系数	241.473	12.169	接近 0

注:K-S 检验的显著性水平为  $\alpha = 0.05$ ,原始数据列为原始观测数据的检验统计量;自然对数列为原始数据取自然对数后的检验统计量;正态分布列为假设数据接近正态分布时的统计量特征。

法来评价研究区的地球化学异常特征,并与传统方法进行对比分析。

### 2.4 位置与尺度的稳健估计

依据上述基本数学原理,笔者用 Visual C 编写了相关计算程序,所得结果列于表 4。由表 4 可知,算术平均值和算术标准差是很不稳健的估计,受异常值的影响很大。中位数、5%  $\alpha$  切尾均值、Andrews 法、Huber 法,对位置的估计相差不大,而且也较接近几何平均值。对离散尺度的估计也有此规律,即中位绝对中位差、Huber 法较低,算术标准差较高。

### 2.5 金异常圈定与评价

以位置(背景值)加 2 倍离散尺度(均方差)作为异常下限(表 5)圈定 Au 异常,圈出的 Au 异常示于图 2、图 3。对比这 2 张图,可以看出,采用稳健估计方法圈定出的异常等值线图明显优于算术平均值法,且图 2 所包含的信息量较图 3 丰富。图 2 表明,低异常区中的弱异常与长山壕金矿床吻合得非常好,而在图 3 中,长山壕金矿床所处的部位未被圈定为异常。此外,图 2 中所圈定的异常较好地反映了不同岩性地层的分布规律,同时也较好地反映了断裂和糜棱岩化带与异常的关系。图 2 中,呼热图至卡贡哈拉东屋地区为金异常背景区,与图 1 中的华力西中期黑云母花岗岩分布区相对应;边汗乌拉-好依尔嘎查-大乌淀山一带为大面积弱异常区,与图 1 中白云鄂博群碳质板岩相对应;沿翁格图至侯布一

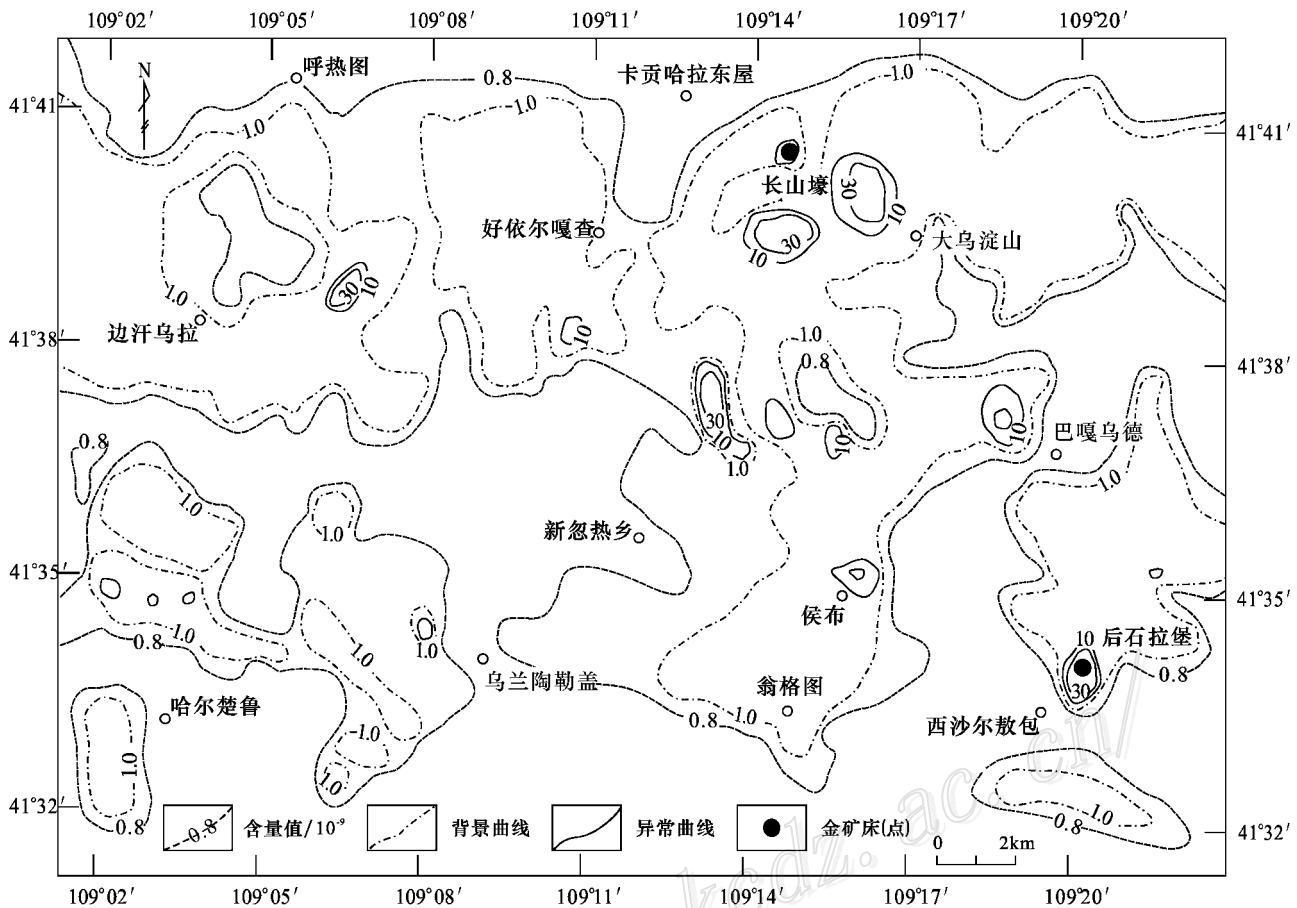


图2 尤伯法圈定的水系沉积物测量金元素异常等值线图

Fig.2 Au anomaly contour map of stream sediment survey based on Huber method

带展布的弱异常可能与图1中的推断路层有关;哈尔楚鲁东北部沿135度方向展布的弱异常,经查证与研究区西南部沿135度延伸的糜棱岩化带关系密切;巴嘎乌德弱异常与白云鄂博群碳质板岩相对应;剩余部分为大面积分布的金异常背景区,与图1中华力西晚期钾长花岗岩分布区相对应。图2与图3中各高异常区吻合得较好。后石拉堡高异常区位于华力西晚期钾长花岗岩与白云鄂博群碳质板岩的接触部位,经查证,区内砂金矿点较多。图2也具有一系列由高到低多层套合异常组成的套合地球化学异常分布模式。

通过对研究区全部样品的统计分析,发现Au在中元古界白云鄂博群石英岩、板岩类中含量高、变化大,在各类花岗岩和第四系中含量较低(表6)。在金元素地球化学异常图(图2)中,地球化学场的基本特征是高低变化悬殊,不同背景区相间出现,元素等值线疏密不均,形态复杂,具高离差和大变化系数的特点,这种分布有利于金矿的形成。

表6 地层及岩体中金的统计分析结果

Table 6 Statistics of Au values in strata and granites

岩性	平均值(X)	标准差(S)	变异系数(Cv)	化探样品数
第四系	1.216	3.548	2.918	29
白云鄂博群	2.323	10.905	4.695	1101
各类花岗岩	1.277	5.477	4.289	1142

注:平均值(X)、标准差(S)的单位:10<sup>-9</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 稳健估计法可确立套合地球化学异常分布模式

套合地球化学模式谱系(王学求,2001)是指由一系列从高到低多层套合异常组成的地球化学异常分布模式,局部异常被区域异常所包裹,而区域异常又被更大规模的地球化学省所包裹。地球化学块体(谢学锦,1999)是指地壳上具有元素高含量的巨大异常体,在地表平面上表现为面积大于地球化学省以上规模,并且内部具有一系列套合的地球化学模式特征,在垂向上可能具有一定的深度,也就是说具

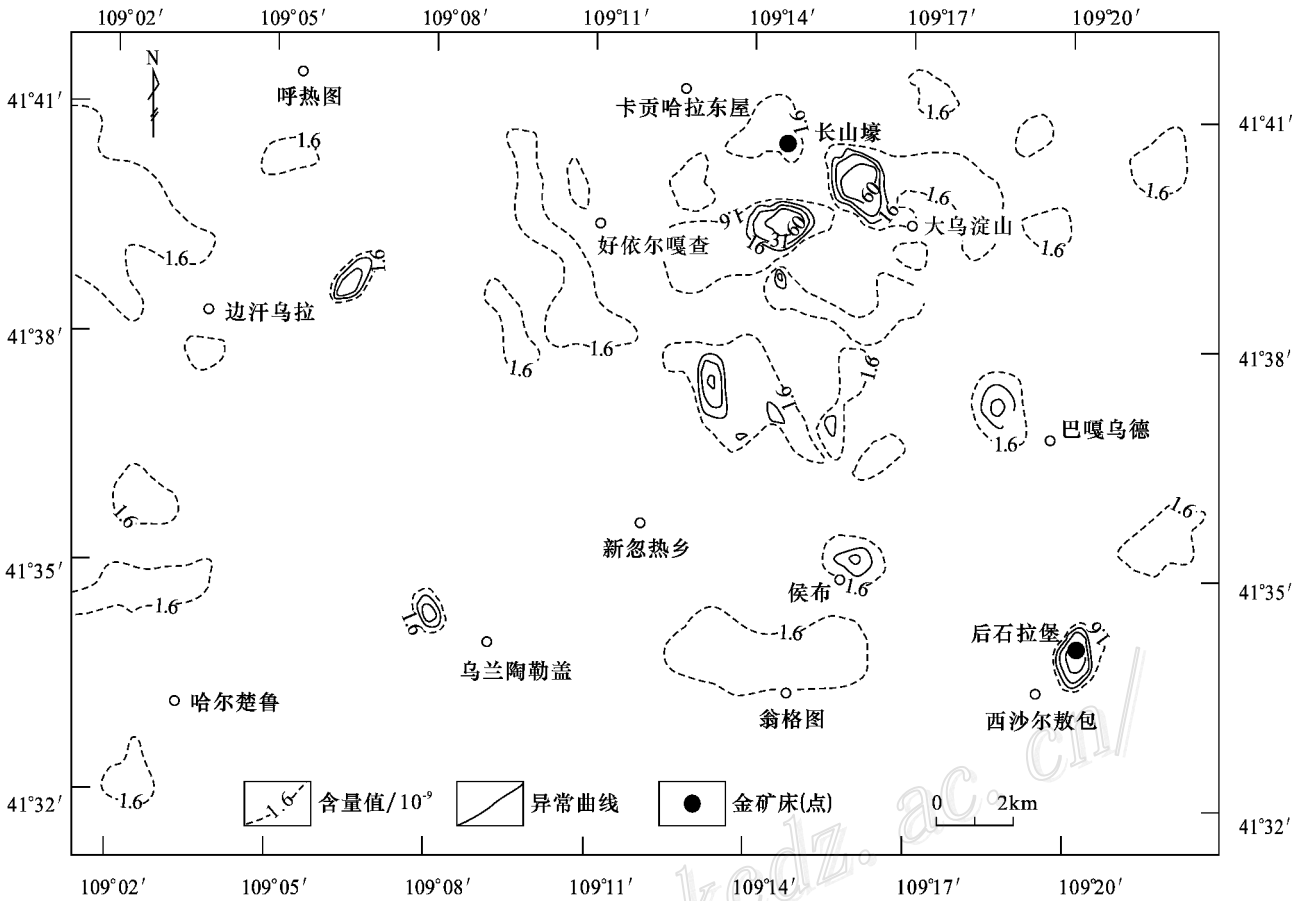


图 3 算术平均值法圈定的水系沉积物测量金元素异常等值线图

Fig.3 Au anomaly contour map of stream sediment survey based on simple average method

有较大规模立体异常的地壳物质体。本次研究地区的面积虽然只有 600 km<sup>2</sup>,但推而广之,笔者认为采用稳健估计方法在更大面积的异常(地球化学省、地球化学巨省、地球化学域)评价中同样能够确立地球化学模式谱系和地球化学块体,因为图 2 表明,采用稳健估计方法圈定的异常存在着明显的套合关系,而这正是建立地球化学模式谱系和地球化学块体的基础。

### 3.2 稳健估计法在地学领域具有广阔的应用前景

稳健估计方法属非参数统计方法,对研究的总体分布不作具体的模型假定,只有一些定性的描述,在这样比较弱的条件下对总体的一些未知特征进行种种统计推断。由于成矿过程的多期性和复杂性造成矿化元素分布的不均一性,元素含量观测值经常表现为多总体混合分布特征或偏态分布特征,在这种情况下,往往难以满足某种假设分布。因此,稳健估计方法在地质领域中具有广泛的应用前景,除可应用于地球化学测量数据的分析和处理外,还可应

用于克立格法储量计算中稳健变异函数的获取等(侯景儒等,1994)。

### 3.3 稳健估计法的适用性

非参数统计方法也有一些缺陷,如果对总体分布有充分的了解且足以确定其分布类型时,稳健估计方法就不如参数统计方法具有更强的针对性,有效性可能会差一些(王星,2005)。从图 2 可看出,由于异常下限的降低,圈出的异常面积较大,给异常的查证工作增加了难度。但如果将地质、物探、遥感等综合资料与化探异常的查证工作密切结合起来,重视弱异常或高异常区边缘部位,就有可能发现有价值的矿床。督冷沟铜钴矿床(潘彤等,2003)和骆驼河金矿床(寇玉才,2001)就是在查证地球化学弱异常的过程中发现的。

### 3.4 研究区下一步勘查找矿方向

边汗乌拉-好依尔嘎查-大乌淀山是本次研究所圈定的金成矿预测区,属金元素大面积弱异常区,位于高勒图弧形断裂带两侧,呈近东西向展布,长 30

km,宽6~10 km。出露地层主要为中元古界白云鄂博群碳质板岩、千枚岩,其北侧主要出露华力西中期黑云母花岗岩,华力西晚期钾长花岗岩,其南侧主要出露华力西中期花岗闪长岩。高勒图弧形断裂呈近东西向穿过预测区,次一级断裂构造比较发育。多元素异常密集,包括高值 Au 异常4处( $>10 \times 10^{-9}$ ),Ag 异常9处,Cu 异常9处,Zn 异常9处,As 异常4处,Sb 异常4处,Bi 异常4处。长山壕金矿床即位于该预测区中。在白云鄂博群尖山组碳质板岩中普遍发育磁黄铁矿和黄铁矿,是找矿的直接标志。因而,该预测区是寻找金最为有利的地区。

## 4 结 论

(1) 当原始观测数据为偏态分布时,采用传统统计方法计算的均值和均方差都较大,因而,所确定的异常下限也较高,往往掩盖了一些低缓异常。

(2) 当观测数据不服从正态分布或有特异值存在时,根据稳健估计方法获得的统计量是较优的估计,能够准确反映异常的位置与形态,尤其是一些低缓异常。

(3) 应用稳健估计方法所获得的结果一般有良好的稳定性,即不会产生由于总体分布的一些变化而导致结论性错误,因此,在地球化学测量的异常评价中应重视使用稳健估计方法。

(4) 地球化学测量不仅要研究局部异常,而且要注意背景的变化,不少有经济价值的异常通常位于高背景带的边缘或弱异常区。地球化学背景的变化往往与不同的岩性、构造有一定的关系,这可为研究区域成矿地质条件提供有益的参考信息。

(5) 研究区位于内蒙古高原南缘,属典型的干旱-半干旱大陆型气候,冬、春季盛行5~6级大风;基岩出露差,仅在山顶或部分冲沟中见岩石露头,植被不发育,地表覆盖物以岩屑和风成砂为主。受特殊地貌景观的制约,在该区开展水系沉积物地球化学测量可能受风成砂的影响较大,因此,直接使用算术平均值方法所圈定的异常很弱,并且规律性不强,而使用稳健估计方法则能较好地捕捉弱异常信息。

致 谢 在论文撰写期间得到石家庄经济学院胡华斌副教授、中国地质科学院矿产资源研究所叶会寿高级工程师、河南省有色地质勘查局郭保健副处长、武警黄金第五支队李海泉高级工程师以及武

警黄金第二支队任俊梅高级工程师的帮助与指导,在此深表谢意。

## References

- Ahrens L H and Aubrey K V. 1954. The lognormal distribution of the elements [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5(2): 49~73.
- Geology and Mineral Resource Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous Region [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 25~105 (in Chinese).
- Han Y W, Ma Z D, Zhang H F, Zhang B R, Li F L, Gao S and Bao Z Y. 2003. Geochemistry [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~139 (in Chinese).
- He X W, Guo W and Hu J. 1997. Study on the soil sampling using robust variance analysis [ J ]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 25(3): 253~257 (in Chinese with English abstract).
- Hou J R, Huang J X, Wu Y P and Zhang S Q. 1994. Theoretical analysis of nonparametric and multivariate geostatistics and its application [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1~102 (in Chinese).
- Howarth R J and Earle S A M. 1979. Application of a generalized power transformation to geochemical data [ J ]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 11(1): 45~62.
- Kou Y C. 2001. Attention to the weak anomaly investigation in regional geochemical surveying [ J ]. *Geology Geochemistry*, 29(3): 175~178 (in Chinese with English abstract).
- Pan T and Sun F Y. 2003. Evaluation of regional geochemical anomalies with big area, low concentration zoning as exemplified by the discovery of Dulenggou Cu-Co deposit [ J ]. *Geology Geochemistry*, 31(3): 39~42 (in Chinese with English abstract).
- Rammsey M H, Argyraki T and Thompson M. 1995. Estimation of sampling bias between different sampling protocols on contaminated lands [ J ]. *Analyst*, 120: 1353~1356.
- Shen H F. 1982. The course for the theory of probability [ M ]. Beijing: Higher Education Press. 1~93 (in Chinese).
- Sun S Z. 2000. Nonparametric statistics [ M ]. Beijing: Beijing University Press. 178~188 (in Chinese).
- Thompson M and Magurie M. 1993. Estimating and using sampling precision in surveys of trace constituents of soils [ J ]. *Analyst*, 118: 1107~1110.
- Wang X. 2005. Nonparametric statistics [ M ]. Beijing: China Renmin University Press. 28~61 (in Chinese).
- Wang X Q. 2001. Geochemical patterns and their geneses [ J ]. *Mineral deposits*, 20(3): 216~222 (in Chinese with English abstract).
- Xie X J. 1999. Exploration geochemistry in the 21st century [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 61~69 (in Chinese).
- Xue W. 2004. Method and application of statistical analysis for SPSS [ M ]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 1~232 (in Chinese).
- Zhao P D. 2004. Quantitative geoscience: methods and its applications [ M ]. Beijing: Higher Education Press. 11~35 (in Chinese).



## 附中文参考文献

- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1~139.
- 何锡文, 郭薇, 胡军. 1997. 稳健方差法探讨土壤取样[J]. 分析化学, 25(3): 253~257.
- 侯景儒, 黄竞先, 吴雨沛, 张树泉. 1994. 非参数及多元地质统计学的理论分析及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1~102.
- 寇玉才. 2001. 区域地球化学调查中注意弱异常查证[J]. 地质地球化学, 29(3): 175~178.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 25~105.
- 潘彤, 孙丰月. 2003. 区域地球化学中大面积、低浓度分带异常评

价[J]. 地质地球化学, 31(3): 39~42.

- 沈恒范. 1982. 概率论讲义[M]. 北京: 高等教育出版社. 1~93.
- 孙山泽. 2000. 非参数统计讲义[M]. 北京: 北京大学出版社. 178~188.
- 王星. 2005. 非参数统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社. 28~61.
- 王学求. 2001. 地球化学模式及成因初探[J]. 矿床地质, 20(3): 216~222.
- 谢学锦. 1999. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 61~91.
- 薛薇. 2004. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社. 1~232.
- 赵鹏大. 2004. 定量地学方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社. 11~35.

<http://www.kcdz.ac.cn/>