www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

多重分形模型在区域地球化学异常分析中的应用探讨

徐明钻^{1,2)},朱立新²⁾,马生明¹⁾,陈晓锋¹⁾

1)中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000;

2)中国地质科学院,北京 100037

摘 要:地球化学异常分析是地球化学勘查中的重要环节,对有效发现异常至关重要。但是,在以往研究中, 研究者们多重视对成矿元素及其伴生元素正异常的研究,忽视对由元素贫化而形成的负异常的研究。元素的 负异常在地球化学勘查中具有与正异常同等重要的作用,以往没有重视负异常的原因之一是缺乏有效发现 此类异常的方法,尤其是确定负异常上限的方法。本文以北山地区 1:20 万峡东幅水系沉积物测量 Ba 数据为 基础,探讨了应用多重分形模型确定贫化元素负异常上限的可行性。结果发现,利用含量-面积法、含量-求 和法确定的 Ba 的异常上限,有效圈定了辉铜山矿床产出地段 Ba 的负异常,取得了预期成果。 关键词:分形模型;含量-面积法;含量-求和法;负异常上限

中图分类号: P632; P595; O14.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)04-611-08

A Tentative Discussion on the Application of Multi-fractal Models to the Analysis of Regional Geochemical Anomalies

XU Ming-zuan^{1, 2)}, ZHU Li-xin²⁾, MA Sheng-ming¹⁾, CHEN Xiao-feng¹⁾

Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei 065000;
 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: As an important step in geochemical exploration, the analysis of geochemical anomalies is of great significance in the effective discovery of anomalies. However, in previous studies, researchers only focused on the investigation of the positive anomalies of metallogenic elements and their accompanying elements, and paid less attention to the study of the negative anomalies formed by the depletion of elements. As a matter of fact, negative anomalies play the same important role as positive anomalies in geochemical exploration. The absence of effective methods for discovering negative anomalies, especially the method for determining the upper limit of the negative anomaly, was one of the factors responsible for the ignoring of these anomalies in the past. Based on the stream sediment data obtained from 1:200,000 geochemical survey in Xiadong of Beishan area, the authors probed into the feasibility of the application of multi-fractal models to ascertaining the upper limit of the negative anomaly. The result shows that the upper limit of Ba could effectively delineate Ba negative anomaly in the Huitongshan copper deposit.

Key words: fractal model; content-area method; content-summation method; upper limit of negative anomaly

地球化学勘查是通过发现异常、解释评价异常 进行找矿的(罗先熔, 2007),地球化学异常分析是发 现异常的前提和基础,是地球化学勘查中的重要环 节。有研究表明(弓秋丽等, 2009; 马生明等, 2009), 矿化过程中不仅成矿元素及其伴生元素发生富集, 同时还有部分元素发生贫化。因此,对地球化学异 常的分析就应该包括发生富集的元素,又包括发生 贫化的元素。然而,当前在地球化学异常分析过程

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212010813057)资助。

收稿日期: 2010-03-14; 改回日期: 2010-04-12。

第一作者简介:徐明钻,男,1983年生。博士研究生。资源与环境勘查地球化学专业。E-mail:hbxmz@tom.com。

通讯作者:马生明,男,1963年生。博士,教授级高工。从事矿产勘查地球化学方法及技术研究。E-mail: MSMIGGE@163.com。

中,虽然有研究者对发生贫化元素的找矿意义进行 了探讨(Govett, 1983; Levinson, 1974; 斯梅斯洛夫等, 1985; 周俊法, 1987; 史长义, 1995; 朴寿成等, 1996),但是总体上讲还是偏重对发生富集元素异常 下限的确定,而忽视对发生贫化元素异常上限的确 定。这一方面是由于以往对负异常的找矿指示作用 重视不够,另一方面则是由于发生贫化的元素通常 贫化程度不大,达不到形成负异常的程度,在这种 情况下,利用传统或规范推荐的数理统计方法不能 有效发现元素的贫化特征,进而认为异常不存在。

地球化学异常下限或上限通常利用数据集背景 值加或减两倍标准差($\overline{x}\pm 2\delta$)来确定(谢学锦, 1981), 这是建立在数据服从正态分布基础上的方法。这种 作法往往只强调数据的频率分布、相关性或协相关 性(申维, 2003), 而忽视数据自身空间的变化特征或 者相关性。此外、移动平均法、克立格法(Kriging) 和趋势面法等确定异常下限或上限的方法,都是建 立在数据服从正态分布的前提下。近年来,国内外 许多地质学家从不同角度认识到地球化学数据场具 有多重分形的特点(李长江等, 1999; 成秋明, 2000; 孙忠军, 2007)。而分形方法为我们提供了利用较少 参数描述复杂事物的一条捷径(李锰等, 2003; 张建 等,2009)。此外,利用分形方法来处理地球化学数 据,既考虑了数据的频率分布特征和空间信息属性, 同时又符合地球化学数据场具有标度不变性的自相 似性的特点。试验结果表明、利用该方法确定发生 贫化元素的异常上限是可行的。

本文以北山地区 1:20 万峡东幅水系沉积物测 量数据为对象,以圈定区内已知辉铜山铜多金属矿 发育地段的元素贫化特征为目标,探讨应用多重分 形方法确定贫化元素负异常的可行性,并通过对利 用几种分形模型确定发生贫化元素的负异常上限结 果的对比,优选出更适用于确定贫化元素异常上限 的分形模型。

1 研究区地质概况

研究区位于甘肃省与新疆自治区交界处,地处 北山成矿带内,位于哈萨克斯坦板块、塔里木板块 以及华北板块交汇地带,构造条件复杂,且洋壳向 陆壳演化过程中的各类火成岩活动频繁,多期构造 叠加,为成矿创造了有利条件,显示出该地区的良 好找矿前景。区内以北山群(Pt₁b)前长城系地层为地 壳的变质基底,主要为一套高变质绿片岩相至超变 质混合岩相的中深变质岩系。古生界盖层自上震旦 统至二叠统基本连续沉积,沉积建造有早古生代的 海相到晚古生代的海陆交互相,最后为陆相。中新 生界主要出露的为陆相沉积建造。北山裂谷岩浆岩 带横穿研究区(张廷瑞,2003),该裂谷带是在寒武纪 陆壳上发展起来的古生代裂谷。奥陶纪开始急剧拉 张,形成裂谷,志留纪进一步扩大,泥盆-石炭纪 扩张减弱。早二叠世裂谷重新剧烈拉张,形成火山 裂谷,堆积了巨厚海相双峰式火山岩。晚二叠世裂 谷转入会聚,形成沉积陆相火山岩及火山碎屑岩。 区内已发现的金属矿床有辉铜山铜矿、花牛山铅锌 矿和花黑滩钼矿(图1)。



(据聂凤军等, 2002 修改)

Fig. 1 Geological map of the study area, showing ore resources (modified after Nie Fengjun et al., 2002)

2 研究区区域地球化学异常特征

采用背景值加两倍标准差确定 1:20 万峡东幅 Cu、Zn、Ag 等成矿元素的正异常下限值分别为: 32×10⁻⁶, 70×10⁻⁶, 81×10⁻⁹, 圈定的地球化学异常如 图 2、图 3、图 4 所示。从总体上看,利用该方法能 较好地圈定辉铜山铜矿的 Cu 的正异常以及花牛山 铅锌矿的 Zn 的正异常。此外 Ag 的正异常也能较好 圈出辉铜山铜矿和花牛山铅锌矿。但在其它未知地 区上述元素的异常分布零散,而且彼此间吻合程度 不高,这无疑给依据成矿元素异常判断成矿远景区 带来一定困难。

学勘查提供新指标。

采用规范中推荐的背景值减两倍标准差方法

(以下简称为规范法), 计算出研究区内 Ba 的负异常 上限为 252×10⁻⁶, 利用该异常上限圈定 Ba 的负异常

(含量小于 252×10⁻⁶ 的为异常),结果在辉铜山铜矿

床产出部位没有 Ba 的负异常出现(图 5)。分析出现

相关研究发现, 在辉铜山砂卡岩型铜矿的矿体 和蚀变围岩中, 除了 Cu、Ag、Zn 等成矿元素及其 伴生元素明显富集以外, Ba、Sr 等元素发生明显贫 化(表 1)。除大理岩以外, 其它类型岩石中 Ba、Sr 的 含量显著低于相应的岩石丰度。因此, 有效获取 Ba、 Sr 等元素由贫化引起的负异常, 可以为地球化

06°00 96°00 95°00 41°20' 20 ç 花黑 滩钼 创难钼 . 凸锌4 铅锌 ٥ € 0 0 铜 军铜山铜矿 П n 0 0 0 0 0 ď 0 0 \bigcirc ЛЭ 40°40' 20 km 16 \cap 40, $20 \,\mathrm{km}$ 40° 40 95°00 96°00 95°00 96°00 图 2 研究区 Cu 异常图 图 4 研究区 Ag 异常图 Fig. 2 Cu anomaly map of the study area Fig. 4 Ag anomaly map of the study area 95°00' 96°00' 95°00 96°00 41°20' 20, 4 花景 滩钼 花黑滩钼 3 φ∎ 铅锌 铅锌矿 \heartsuit 铜山 0 F铜山铜矿 J ^ ζ С 40°40' 20 km 16 40 16 20 km 40° **4**0 95°00 96°00 °00 图 3 研究区 Zn 异常图 图 5 研究区 Ba 异常图 Fig. 3 Zn anomaly map of the study area Fig. 5 Ba anomaly map of the study area

	表 1	辉铜山铜矿元素统计表	
Table 1	Statistics of elem	ents in the Huitongshan skarn	copper deposit

	矽卡岩	大理岩		花岗岩		辉长岩	
儿茶 -	(n=9)	含量(n=25)	丰度	含量(n=5)	丰度	含量(n=10)	丰度
Ba	37	284	155	185	700	59	450
Sr	71	92	225	99	250	122	570

元素含量为样品的算术平均值,单位-Ba、Sr:×10⁻⁶;常量化学组分:%。

岩石丰度: 据鄢明才等(1997) n: 参加统计样品数。

这种现象的原因有两个方面:一是采用规范法确定 的 Ba 的负异常上限不合适,致使客观存在的负异常 没有被发现;二是辉铜山矿床产出位置水系沉积物 中 Ba 的负异常不存在。为了对这一问题进行合理解 释,并为解决同类问题提供可借鉴的思路和方法, 探讨应用分形模型确定发生贫化元素(Ba)负异常上 限的可行性十分必要。

3 分形模型及负异常上限计算过程

地球化学场具有标度不变性的自相似性特点, 并且这样的自相似性是存在于一定的标度范围内的, 该范围就称之为无标度范围。不同的无标度范围具 有不同的分维数值,即自相似性具有局部特征 (Christopher et al, 1995)。这就为利用分形模型探讨 地球化学负异常上限奠定了理论基础。

分形模型可以归纳为:

$$N(r) = Kr^{-D} \qquad r > 0 \tag{1}$$

其中 r 表示特征尺度(统计元素给定的限定条件) 例如大于某个含量元素的含量值、距离、金属矿的 品位等); K>0,为比例常数; D>0,为一般分维数; N(r)=N(r),表示特征尺度大于等于 r 的数目(大于 等于某个限定条件的元素统计值,例如:面积、含量 之和、含量平均值等)。

3.1 含量-面积法

含量 - 面积法计算元素异常下限或上限的具体 步骤如下(Cheng et al, 1994; Cheng, 1995): 1、将统 计单元内某个元素的原始数据网格化,做该元素的 地球化学等值线图; 2、从小到大按一定间隔依次选 取不同的含量值 $r_i(r_{min} \le r_i \le r_{max})$,从地球化学等值线 图上统计出当元素含量大于等于 r_i 是所圈闭的面积 N(r_i); 3、对式(1)两边取对数,得到一元线性回归模 型如下:

$$\log[N(r)] = -D\log(r) + \log(K)$$
(2)

4、将(r_i, N(r_i))值代入式(2),制作散点图;5、将 散点图上的数据分成三段,利用剩余平方和(式(4)) 最小的原则进行最小二乘法线性拟合。

3.2 含量-求和法

含量 - 求和法是利用含量大于等于某限定值的 所有采样点元素含量之和的变化来计算统计单元内 元素的特征值(异常下限或异常上限等)(申维, 2007)。具体步骤如下: 1、在统计单元内,按一定间 隔给定元素含量值 r_i,求出大于等于 r_i的该元素所有 样本含量之和 N(r_i),得到一组(r_i, N(r_i))数据集; 2、将 这组数据集取对数后进行投点,制作散点图; 3、将 散点图上的数据分成三段,利用剩余平方和(式(4)) 最小的原则进行最小二乘法的线性拟合。

3.3 含量-距离法

含量-距离法是将统计区域划分出若干单元,利 用该单元内所有样品含量的平均值代表该单元的元 素含量值(李长江等,1999),N(r)值在某种意义上代 表的是该单元的密度,分形模型如式(3)所示:

$$N(r) = Kr^{D-2}$$
(3)

式(3)中r代表离开采样点的距离, N(r)表示在距 采样点r距离内所有采样单元格内元素平均含量。 具体步骤如下:1、在某个统计区域内,以每个采样 点为中心计算随r增加对应的N(r)值,得出一组(r_i, N(r_i))数据集;2、将数据集取对数,制作散点图;3、 将散点图上的数据分成三段,利用剩余平方和(式 (4))最小的原则进行最小二乘法的线性拟合。

3.4 方程拟合的检验

利用上述方式求异常下限或上限时,需要对散 点图上的数据分段进行一元线性回归方程拟合,为 了避免人为主观因素在分段拟合中的影响,依据统 计学上的规定利用剩余平方和 E_i(*i*=1,2 和 3)最小的 方式对分段拟合进行约束,求出分三段直线最优化 的界限点,提高确定的界限点的客观性。

$$E = E_{1} + E_{2} + E_{3}$$

$$= \sum_{i=1}^{i_{0}} [LogN(r_{i}) + D_{1}Logr_{i} - LogK_{1}]^{2}$$

$$+ \sum_{i=i_{0}+1}^{i_{1}} [LogN(r_{i}) + D_{2}Logr_{i} - LogK_{2}]^{2} \stackrel{(4)}{}$$

$$+ \sum_{i=i_{i}+1}^{n} [LogN(r_{i}) + D_{3}Logr_{i} - LogK_{3}]^{2}$$

式(4)中, i_0 、 i_1 是拟合出的三条直线的界限点。 i_0 为 从左向右排列的第一条拟合直线与第二条拟合直线 的界限点, i_1 为第二条拟合直线与第三条拟合直线的 界限点。 D_1 、 D_2 、 D_3 分别是对应标度不变区间拟合 直线斜率的绝对值,对于第一和第二种分形模型 D_1 、 D_2 、 D_3 就是分维数,对于第三种模型其分维数 D_1 、 $= D_1 + 2$, D_2 = $D_2 + 2$, D_3 = $D_3 + 2$ 。

3.5 负异常上限的确定

以往研究者在对地球化学数据进行分形处理时, 多采用两段拟合的方式,即将对数散点图分成两段 进行一元线性拟合。分两段拟合的理由是将地球化 学数据划分成背景和异常两部分进行研究,这里的 异常指的是正异常,没有考虑负异常的存在。近年 来,也有学者在对地球化学数据进行分形处理时, 采用将数据分成三段进行拟合的方式(李建东等, 2006; Bai et al, 2010; Afzal et al, 2010),目的是为了 提高分形方法确定地球化学异常下限值的精确性。 本文中将试验数据分成三段,是出于地球化学 数据中包括正异常、背景和负异常三部分的考虑, 即地球化学数据中存在着三个无标度范围,利用分 形方法的目的就是尝试将这三个无标度范围内的数 据区分开来,进而确定富集元素的异常下限或贫化 元素的异常上限。经过三段拟合之后将拟合出三条 直线,三条直线间存在两个交点。试验中将从左向 右排列的第一条直线与第二条直线的交点(i₀ 点)对 应的元素含量视作地球化学负异常与背景之间的界 限点(异常上限),第二条直线与第三条直线之间的 交点对应的元素含量视作地球化学背景与正异常之 间的界限点(异常下限)。

4 分形模型确定 Ba 负异常上限结果对比

利用研究区 1568 件样品中 Ba 元素含量数据, 按照含量-面积法、含量-求和法、含量-距离法三种 分形模型计算贫化元素负异常上限的方法和步骤, 统计出研究区内 Ba 元素各项参数见表 2、表 3、表 4。利用表中所列示的三种分形模型统计参数做各种 方法统计参数的散点图,并将散点图上的数据按横 坐标从小到大的顺序分成三段,经式(4)进行约束 拟合出一元线性回归方程,做出相应的拟合直线, 结果见图 6。各条直线的分维数 D₁、D₂、D₃如图 6 所示。

取i₀点(从左向右排列第一条拟合直线与第二条

表 2 利用含量-面积法确定 Ba 元素异常上限的统计参数 Table 2 Statistical parameters of Ba data based on content-area models

	tent urea mouelb		
r(Ba含量,	N(r)(Ba 含量大于等于 r 的样占圈定的面积 km ²)	logr	logN(r)
<u> </u>	I 的什黑圈走的面积, Kiii)		
100	6479	2.0	3.8
150	6427	2.2	3.8
200	6368	2.3	3.8
250	6309	2.4	3.8
300	6256	2.5	3.8
400	5807	2.6	3.8
500	5493	2.7	3.7
600	4960	2.8	3.7
700	4186	2.8	3.6
800	3219	2.9	3.5
900	2214	3.0	3.3
1000	1536	3.0	3.2
1100	1082	3.0	3.0
1200	816	3.1	2.9
1300	583	3.1	2.8
1400	295	3.1	2.5
1500	158	32	2.2

拟合直线的界限点)对应的 logr 值(图 6(a)、图 6(b)) 或 logN(r)值(图 6(c))作为 Ba 负异常上限的对数值, 分别为 logr=2.81、logr=2.76、logN(r)=2.75,将这些 对数值转变为对应的 Ba 实际含量值,得到三种方法 确定的 Ba 负异常上限值如表 5 所示。

从表 5 中可以看到, 与规范法计算的 Ba 元素负 异常上限相比, 利用三种分形方法计算的 Ba 元素负 异常上限值明显偏高, 最低的也要高 2 倍以上。由 此看来, 表示地质作用过程中发生贫化元素贫化程 度的数据结构与表示发生富集元素富集程度的数据 结构相比, 有其特殊性, 不能简单地套用确定富集 元素异常下限的方法来确定贫化元素异常上限。

表 3 利用含量-求和法确定 Ba 元素异常上限的统计参数 Table 3 Statistical parameters of Ba data based on content-summation models

	content summution mot		
r(Ba 含量,	N(r)(含量大于等于 r	10	lo a N(-)
10 ⁻⁶)	的样点 Ba 含量之和, 10 ⁻⁶)	logr	login(r)
50	1324270	1.7	6.1
100	1324143	2.0	6.1
150	1321033	2.2	6.1
200	1317911	2.3	6.1
250	1315274	2.4	6.1
300	1312186	2.5	6.1
350	1305913	2.5	6.1
400	1294885	2.6	6.1
450	1278724	2.7	6.1
500	1255079	2.7	6.1
550	1220664	2.7	6.1
600	1167637	2.8	6.1
650	1116699	2.8	6.0
700	1054416	2.8	6.0
750	963625	2.9	6.0
800	878999	2.9	5.9
850	794239	2.9	5.9
900	691111	3.0	5.8
950	592120	3.0	5.8
1000	525576	3.0	5.7
1050	472136	3.0	5.7
1100	424822	3.0	5.6
1150	381946	3.1	5.6
1200	324670	3.1	5.5
1250	270893	3.1	5.4
1300	246815	3.1	5.4
1350	196699	3.1	5.3
1400	148493	3.1	5.2
1500	90874	3.2	5.0
2000	34773	3.3	4.5
2500	26215	3.4	4.4





表 4	利用含	·量-距离法	硫定 Ba	元素异常	上限的统i	十参数
Т	able 4	Statistical	paramet	ers of Ba d	lata based	on

content-uistance models						
r(距某采样点 的距离, km)	N(r)(距某采样点距离为 r 以内所有样本 Ba 平均含量, 10 ⁻⁶)	Logr	LogN(r)			
2	295	0.30	2.5			
4	408	0.60	2.6			
6	429	0.78	2.6			
8	468	0.90	2.7			
10	487	1.0	2.7			
12	498	1.1	2.7			
14	538	1.1	2.7			
16	582	1.2	2.8			
18	638	1.3	2.8			
20	707	1.3	2.8			
22	763	1.3	2.9			
24	763	1.4	2.9			
26	755	1.4	2.9			
28	839	1.4	2.9			
30	882	1.5	2.9			
32	896	1.5	3.0			
34	884	1.5	2.9			

表 5	不同方法计算的 Ba 元素负异常上限对比
Table 5	Upper limits of negative anomalies based on
	different methods

unrefent methous					
计	算方法	统计参数	Ba(n=1568)		
		背景值	833		
ŧ	观范法	标准离差	291		
		异常上限	252		
	含量-面积法	异常上限	645		
分形方法	含量-求和法	异常上限	575		
	含量-距离法	异常上限	562		

Ba 含量单位: ×10⁻⁶

采用表 5 中所列 Ba 元素异常上限值圈定研究区 Ba 的负异常如图 7、图 8、图 9 所示。对比图 7、图 8、图 9 结果不难发现,利用含量 - 面积法和含量 -求和法计算的 Ba 元素负异常上限能较好地圈出辉 铜山铜矿产出地段 Ba 的负异常(图 7、图 8),尤以含 量 - 面积法更为明显,而利用含量-距离法计算的 Ba 的负异常上限仍然没有圈出辉铜山铜矿产出地 段 Ba 的负异常(图 9)。由此认为,从发现贫化元素 负异常的角度考虑,含量 - 面积法的效果更好。

5 研究区铜多金属矿成矿远景分析

成矿过程中元素的富集、贫化是成矿作用的两 个方面,没有成矿元素的高度富集不可能形成矿床, 而在成矿元素及其伴生元素发生富集的同时,势必 导致其它一些元素出现贫化,也就是说,元素的富 集和贫化均是成矿作用的结果,成矿作用过程中发







生贫化的元素与发生富集的元素一样,都可以很好 地指示矿床或矿化体的存在,在地球化学勘查中具 有同等重要的作用(马生明等,2009),只是发生贫化 元素在成矿远景区预测及矿床勘查中的应用实例不 多,导致人们对其指示作用认识不足。

对比研究区内 Cu、Ba 两元素异常图可以看到. 在已知的辉铜山铜矿床产出地段, Cu 出现了明显的 正异常(+), Ba 出现了明显的负异常(-), 两个元素异 常组合不仅很好地反映了该矿床中 Cu 富集、Ba 贫 化的特征、而且为综合利用元素的富集、贫化规律 进行成矿远景预测提供了依据。除已知辉铜山矿床 产出地段以外,研究区内出现的 Cu(+)、Ba(-)组合异 常出现在辉铜山矿床以南地区。该 CuBa 组合面积 很大,除 Cu 富集以外,尚有 Zn、Co、Ni、Fe₂O₃、 MgO 等元素的富集和 Sr、Al₂O₃、Na₂O 等元素的贫 化。如果单纯从元素的富集、贫化规律分析,此处 异常成矿前景很乐观。结合异常产出地段地质背景 分析、此处异常受地层控制的可能性较大。该异常 处出露地层主要为二叠纪菊石滩组(P1j)地层,基本 由黄绿色、灰黑和黑色页岩和砂质灰岩构成(甘肃省 地质矿产局、1989)、地表地质观察此处此地沉积地 层中缺乏形成热液型金属矿床的条件, 据此推测此 处异常是由二叠纪菊石滩组地层引起的。

在研究区其他地段均未出现 Cu(+)、Ba(-)等富 集贫化元素组合异常。因此,综合考虑现有富集、 贫化两类异常特征,很难提出供进一步工作的 Cu 矿 床成矿远景区。



6 结论

成矿过程中由元素的贫化而引起的负异常对地 球化学勘查具有重要意义,但是其指示作用尚没有 受到普遍重视,原因之一是缺乏必要的研究手段, 特别是有效圈定贫化元素负异常上限的方法。本文 试验结果表明,利用多重分析模型中含量-面积法、 含量-求和法确定的贫化元素 Ba 负异常上限,进而 圈出的 Ba 的负异常,与研究区内已知辉铜山矿床产 出位置非常吻合,由此证实,多重分形模型方法在 地球化学异常分析中具有独特的作用,值得在以后 工作深入探讨和推广。此项研究结果为类似试验研 究工作提供了参考案例。

参考文献:

- 成秋明. 2000. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. 地球 科学——中国地质大学学报, 25(6): 313.
- 弓秋丽,朱立新,马生明,席明杰. 2009. 斑岩型铜矿床地球化 学勘查中岩石化学指标研究[J]. 物探与化探,(33)1:31-34.
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 208-209.
- 罗先熔. 2007. 勘查地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 12-13.
- 李长江, 麻土华, 朱兴盛, 胡永和, 赵乃良. 1999. 矿产勘查中的 分形、混沌与 ANN[M]. 北京: 地质出版社, 14-30.
- 李建东,龚庆杰,窦金龙,李晓剑. 2006. 分形理论在勘查地球 化学中的应用[J]. 中国矿业, 15(11): 91.
- 李锰, 朱令人, 龙海英. 2003. 不同类型地貌的各向异性分形与 多重分形特征研究[J]. 地球学报, 24(3): 237-242.
- 朴寿成,刘树田,连长云,杨永强. 1996. 地球化学负异常及其 找矿意义[J]. 地质与勘探, 32(2): 46-50.

马生明, 朱立新, 刘崇民, 陈晓锋, 梁胜跃. 2009. 斑岩型 Cu(Mo)矿 床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报, (30)6: 821-830.

聂凤军, 江思宏, 白大明, 王新亮, 苏新旭, 李景春, 刘妍, 赵省

京:地质出版社,2-3.

- 史长义, 汪彩芳. 1995. 区域次生地球化学负异常模型及其意义[J]. 物探与化探, 10(2): 106.
- 申维. 2003. 分形混沌与矿产预测[M]. 北京: 地质出版社, 8-9.
- 孙忠军. 2007. 矿产勘查中化探异常下限的多重分形计算方法[J]. 物探化探计算技术, 29(1): 54.
- 申维. 2007. 分形求和法及其在地球化学数据分组中的应用[J]. 物探化探计算技术, 29(2): 134.
- 斯梅斯洛夫 AA, 鲁德尼克 BA, 金科夫 HM, 帕奈奥托夫 AY. 1985. 地球化学预测与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 76-77.
- 谢学锦.1981. 地质词典(五)[M]. 北京: 地质出版社,188.
- 鄢明才,迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北 京:科学出版社,73.
- 张延瑞. 2003. 全国主要成矿远景区矿产资源调查评价重点选区 研究[R]. 北京: 中国地质调查局.
- 张建,王登红,孙宝生,陈郑辉.2009. 基于分形理论的成矿空 间分析——以新疆东天山康古尔塔格金矿带为例[J].地球学 报,30(1):58-64.
- 周俊法. 1987. 地球化学负异常的地质找矿意义[J]. 地质与勘探, 23(4): 65-69.

References:

- AFZAL P, KHAKZAD A, MOAREFVAND P, OMRAN N R, ESFANDIARI N R, ALGHALANDIS Y F. 2010. Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration, 104(1): 34-46.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1989. Regional geology of Gansu province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 208-209(in Chinese with English abstract).
- СМЫСЛОВА А А, РУДНИКА В А, ДИНКОВА Н М, ЛАНАЙОТОВА А Н. 1985. Geochemical prediction and exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 76-77(in Chinese).
- CHENG Qiu-ming. 2000. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 25(6): 313(in Chinese with English abstract).
- CHRISTOPHER C B, PAULR L. 1995. Fractals in petroleum geology and earth process[J]. Plenum Press New York, 1: 317.
- Cheng Qiu-ming, AGTERBERG F P, BALLANTYNE S B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Geochem.Explor., 51(2): 109-130.
- Cheng Qiu-ming. 1995. The perimeter-area fractal model and its application to geology[J]. Math.Geol, 27(1): 69-82.
- BAI Jian, PORWAL A, HART C, FORD A, YUC L. 2010. Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 104(1): 1-11.
- GOVETT G J S. 1983. Rock geochemistry in mineral exploration[M]. Elsevier: Amsterdam, 30.
- GONG Qiu-li, ZHU Li-xin, MA Sheng-ming, XI Ming-jie. 2009. Petrochemical indices in geochemical exploration of porphyry type copper deposits[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 33 (1): 31-34(in Chinese with English abstract).
- LUO Xian-rong. Exploration geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 12-13(in Chinese).
- LI Chang-jiang, MA Tu-hua, ZHU Xing-sheng, HU Yong-he,

ZHAO Nai-liang. 1999. Fractal, chaos and ANN in mineral exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 14-30(in Chinese with English abstract).

- LEVINSON A A. 1974. Introduction to exploration geochemistry[M]. Calgary: Alberta, Canada, 216.
- LI Jian-dong, GONG Qing-jie, DOU Jin-long, LI Xiao-jian. 2006. Application of fractal theory in geochemical exploration[J]. China Mining Magazine, 15(11): 91(in Chinese with English abstract).
- LI Meng, ZHU Ling-ren, LONG Hai-ying. 2003. On fractal and multifractal properties for different types of landforms[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(3): 237-242(in Chinese with English abstract).
- PIAO Shou-cheng, LIU Shu-tian, LIAN Chang-yun, YANG Yong-qiang. 1996. Geochemical negative anomaly and its prospecting significances[J]. Geology and Exploration, 32(2): 46-50(in Chinese with English abstract).
- MA Sheng-ming, ZHU Li-xin, LIU Chong-min, CHEN Xiao-feng, LIANG Sheng-yue. 2009. A study of the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu(Mo) deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, (30) 6: 821-830(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, BAI Da-ming, WANG Xin-liang, SU Xin-xu, LI Jing-chun, LIU Yan, ZHAO Xing-min. 2002. Metallogenic studies and ore prospecting in conjunction area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region (Beishan Mt.), northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2-3(in Chinese with English abstract).
- SHI Chang-yi, WANG Cai-fang. 1995. The regional secondary geochemical negative anomaly model and its significance[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 10(2): 106(in Chinese with English abstract).
- SHEN Wei. 2003. Fractal and chaos with application in mineral resource prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 8-9(in Chinese with English summary).
- SUN Zhong-jun. 2007. Multi-fractal theory and geochemical threshold in mineral exploration[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 29(1): 54(in Chinese with English abstract).
- SHEN Wei. 2007. Fractal summation methods and its application in geochemical element data for population limits[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 29(2): 134(in Chinese with English abstract).
- XIE Xue-jin. 1981. Geological Dictionary (The Fifth Part)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 188(in Chinese).
- YAN Ming-cai, CHI Qing-hua. 1997. The chemical composition crust and rocks in the eastern part of China[M]. Beijing: Science Publishing House, 73(in Chinese).
- ZHANG Ting-rui. 2003. A study of investigation and evaluation of mineral resource and selection of key areas in main metallogenic prospecting region, China[R]. Beijing: China Geological Survey(in Chinese).
- ZHANG Jian, WANG Deng-hong, SUN Bao-sheng, CHENG Zheng-hui. 2009. Metallogenic Spatial Analysis Based on Fractal Theory: A Case Study of the Kangguertage Gold Ore Belt in Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(1): 58-64(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jun-fa. 1987. The geological exploration implication of negative geochemical anomalies[J]. Geology and Exploration, 23(4): 65-69(in Chinese with English abstract).