

文章编号 : 0379 - 1726(2002)02 - 0191 - 10

# 地球化学场的连续多重分形模式

谢淑云, 鲍征宇

(中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**研究了粤北 4 292 km<sup>2</sup> 内 1 448 个基岩样品的 35 项元素、安徽省江南江北各约 22 000 km<sup>2</sup> 和 18 100 km<sup>2</sup> 内 5 489 个和 4 524 个水系沉积物样品的 14 项元素、塔里木盆地 5 个含油气区的 7 419 个土壤样品的酸解烃(C<sub>1</sub> ~ C<sub>5</sub>)、蚀变碳酸盐、紫外、荧光等油气地球化学指标值的面积校正累计频率(ACAF)特征。研究表明,地球化学指标值的 ACAF 均显示连续多重分形特征,而且具两种特定模式:简单连续多重分形(SCM)模式和具高浓集连续多重分形(HACM)模式;主要成矿元素和主要油气化探指标均不同程度地显示为 HACM 模式,而其他指标多表现为 SCM 模式。不同的分形模式可望用于区域含矿含油性和区域环境评价,而开始出现高含量叠加的“临界”含量值可能作为区域成矿成油强度的一种度量。

**关键词:**地球化学场;面积校正累计频率;连续多重分形模式;金属;油气

**中图分类号:**P59 **文献标识码:**A

## 0 引 言

分形是研究复杂系统时 - 空结构特征的基本理论和有效方法<sup>[1-6]</sup>,已广泛应用于地球科学的各个领域<sup>[7-11]</sup>。地球化学场表征为特定区域特定介质(基岩、水系沉积物、土壤和水体等)中元素和化合物的含量和其他相关地球化学变量值(在下面的讨论中我们用“元素含量”泛指地球化学介质中各种地球化学变量的测定值)的频率分布及其时 - 空结构<sup>[1]</sup>。元素含量频率分布特征,对区域地球化学演化研究、金属和油气地球化学勘查、区域环境生态调查等具有重要的作用,一直是地球化学家关注的焦点。近年来,地球化学变量在空间上的分形与多重分形特征引起了地质地球化学家的广泛关注,国内外在这方面做了大量工作。早在 20 世纪 50 年代,De Wijs<sup>[7,8]</sup>就根据矿石储量与矿床品位提出了矿床富集的分形模型,揭示出矿床累积吨位与其品位或质量分数之间呈对数关系;后来 Turcotte<sup>[9]</sup>对美国的 Au、Cu、U 和 Hg 累积矿石的总量与平均品位的研究表明,De Wijs 提出的分布模式具分形结构;我国学者<sup>[10-14]</sup>研究指出,金品位的分布具有分形结构特征;分形理论的创始人 Mandelbrot 认为,铜矿的分布具有多重分形结

构<sup>[6,15]</sup>;Allegre *et al.*<sup>[16]</sup>从理论上探讨了常态分布元素与超常富集的元素是否具有相同的分布规律的问题,创造性地提出了痕量元素常见的分布模式为正态、多重正态、分形和多重分形分布;Cheng 等<sup>[17-27]</sup>近年来采用数值 - 面积模型(number-area model)、周长 - 面积模型(perimeter-area model)和浓度 - 面积模型(concentration-area model)等方法研究元素含量的频率分布,认为其具有分形和多重分形特征,在背景值和异常值范围内,元素含量与所占面积在双对数坐标图上可以用不同的直线进行拟合,不同线段所对应的分界值认为是区分背景和异常的临界值,可作为异常的下限值,用于刻划异常值分布规律和区分矿化异常和背景、区分污染与非污染区等。

尽管越来越多的证据表明元素含量的分布具有某种分形特征,但由于多数研究仅依据少量的数据,且涉及矿石品位的居多,又多局限于少量金属元素,较少涉及油气地球化学领域,加上不同作者采用不同的分形计算方法,缺少可比性,导致诸多的分歧和矛盾。元素含量的分布是单一分形(unifractal)或是多重分形(multifractal),即在双对数坐标下元素含量的分布曲线为直线(单一幂率分布)或是双直线(在不同的浓度值标度内服从不同的幂率分布)或是

收稿日期: 2001 - 04 - 23;接受日期: 2001 - 08 - 31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49633120); 国家教育部博士点基金

作者简介: 谢淑云(1976 - ),女,博士研究生,地球化学专业。

更为复杂的曲线?双直线的转折点是否是区分地球化学背景和异常的阈值?主要成矿元素与其他元素是否具有不同的分形模式?油气地球化学场是否具有与金属地球化学场相一致的分形特征?所有这些问题都尚未取得突破性进展,值得进一步探讨。

本文通过对粤北 4 292 km<sup>2</sup> 内 1 448 个基岩样品的 35 项元素、安徽省江南江北各约 22 000 km<sup>2</sup> 和 18 100 km<sup>2</sup> 内 5 489 个和 4 524 个水系沉积物样品的 14 项元素、塔里木盆地 5 个含油气区的 7 419 个土壤样品的酸解烃 (C<sub>1</sub> ~ C<sub>5</sub>)、紫外、荧光、蚀变碳酸盐和汞等共计 330 000 余个地球化学数据进行分析,以期能解决上述问题。

## 1 数据来源

粤北韶关地区属华南褶皱系,矿产丰富,尤以 W、Mo 和 Pb、Zn、Hg、Sb 等最为重要,红岭钨矿、凡口铅锌矿、大宝山铜铅锌硫多金属矿等位于其中。於崇文等<sup>[28]</sup>在粤北地区开展了全面系统的区域地球化学研究,在南北长 58 km、东西宽 74 km、面积 4 292 km<sup>2</sup> 的区域内采用“分层取样”的方法共采集 1 448 个基岩样品,平均采样密度为每 4 km<sup>2</sup> 1.35 个样品,分析测定了 37 种元素含量,除部分元素采用催化极谱法 (W、Sn、Mo、Ag)、原子吸收 (Cu、Pb、As、Sb、Bi)、比色 (Au)、离子选择电极 (F) 和测汞法 (Hg) 测定外,其余均采用等离子体多道直读光谱 (ICP-AES) 分析。因有 1/3 样品的含量低于检出限, Hg、Au 未参与后面的讨论。

长江中下游是著名的 Fe、Cu、Au、Ag、Pb 和 Zn 等金属成矿带。在安徽省长江以南以北各约 22 000 km<sup>2</sup> 和 18 100 km<sup>2</sup> 区域内以平均每 4 km<sup>2</sup> 1 个样品的采样密度分别采集了 5 489 个和 4 524 个水系沉积物样品,并采用 XRF 和 AAS 法分析测定了各样品中与成矿密切相关的 14 种元素含量。著名的铜陵铜矿田位于江南区。

塔里木盆地是我国重要的含油气盆地,近年来地表油气地球化学勘查已成为油气勘探的手段之一。阿克库勒工区位于塔北地区东段,呈近东西向展布的细长矩形,东西长 100 km,南北宽 20 km,面积 2 000 km<sup>2</sup>,地表主要为松散的砂土或盐碱覆盖的荒漠,共采集 1 003 个土壤样品。雅克拉工区位于轮台-库车公路以南约 20 km,呈 NNE-SWW 向展布的矩形,东西长 24 km,南北宽 13 km,面积 312 km<sup>2</sup>,地表亦以松散的砂土或盐碱覆盖的荒漠为主,共采集

195 个土壤样品。雅克拉-轮台化探新区总体呈 NW-SE 向的“刀”形,轮台断裂贯穿其中,面积约 2 700 km<sup>2</sup>,大致以 1 km × 1 km 的网度采集土壤样品 3 136 个。艾协克-桑塔木工区位于库车-轮台县南的塔里木河南岸,面积 2 000 km<sup>2</sup>,70% 以上面积为盐碱沙土、浮软沙土和半流动沙丘,工区南部为沙漠,共采集 2 085 个土壤样品。柴窝堡勘探区位于新疆乌鲁木齐市东南部柴窝堡-达板城地区,工区地表化探面积 1 000 km<sup>2</sup>,以 1 km × 1 km 的网度采集土壤样品 1 000 个。在上述五个工区中,分别测试分析了土壤酸解烃 (C<sub>1</sub> ~ C<sub>5</sub>)、土壤紫外、土壤荧光、土壤蚀变碳酸盐和土壤汞等地球化学指标。

## 2 计算方法

地球化学采样点往往不是网格化的,局部区域可能采样较密或较稀甚或缺失。若直接应用原始样品分析数据进行元素含量频率分布研究,则可能过分强调采样较密的局部区域而相对忽视采样较稀的局部区域,不能真实地反映区域内元素含量值的分布特征。浓度-面积法<sup>[20, 22, 24-27]</sup>计算大于含量值  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为含量值分组数,  $c_{\min} \leq c_i \leq c_{\max}$ ) 的面积  $S(C > c_i)$ ,然后在双对数坐标下考察  $c_i \sim S(C > c_i)$  间是否存在幂率关系即分形。对于  $S(C > c_i)$ , Cheng *et al.*<sup>[26]</sup> 采用两种途径来确定:(1) 在对原始数据加权移动平均 (Weighted moving average method) 插值后制作的地球化学等值线图,  $S(C > c_i)$  为含量值  $C$  大于  $c_i$  的等值线圈闭的区域面积;(2) 统计原始含量数值的盒子,即用边长确定的正方形网格覆盖研究区,  $S(C > c_i)$  等于具有含量值大于  $c_i$  的正方形网格数。如果在正方形中不止一个样品,则取平均值作为该网格的含量值。众所周知,等值线的计算意味着网格结点的估值运算,运用移动平均、距离系数加权移动平均、克里格法和泛克里格法等网格估值方法可能产生不同的效果;局部特高值点 (outlier) 可能使邻近网格点的估值普遍偏高,导致孤立高值点拉高一大片;内部的采样空白区也可能以很不准确的估计值来代替。由此看来,方法(1)存在着固有的不足。本文采用方法(2),即面积校正累计频率法研究元素含量频率分布,其计算步骤如下。

(1) 以一网格覆盖采样区域。记采样空间坐标  $(x, y)$  的最小、最大值分别为  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ,  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$ , 则  $x$  和  $y$  方向的网格数  $n_x$  和  $n_y$  应满足:

$$(x_{\max} - x_{\min}) / n_x = (y_{\max} - y_{\min}) / n_y \quad (1)$$

$$d \cdot n_x \cdot n_y = N \quad (2)$$

(1) 式表明  $x$ 、 $y$  方向应具有相同的网格间距;(2) 式说明总网格数乘以平均网格密度  $d$  应为总样品数  $N$ 。由(1)、(2)式可解出  $n_x$  和  $n_y$ , 从而确定所需的覆盖网格。平均网格密度  $d$  值可取 1~2, 使得采样较密区域的网格内有 2 个或 2 个以上样品, 采样较稀区域的网格内有 1 个样品, 部分网格内没有样品, 即为采样空白区。过大的  $d$  值会产生数据的“平滑”。本研究中采用的  $d$  值为 1.5。

(2) 计算各个网格元素含量平均值  $C$ , 并对  $C$  值进行累计频率计算, 即选定一组  $c = \{c_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为非空网格数,  $C_{\min} \leq c_i \leq C_{\max}$ ), 统计所有网格平均值  $C$  大于  $c$  的网格数  $N(C > c)$ , 最后在双对数坐标下绘制  $c-N(C > c)$  曲线。因  $C$  值反映了采样面积校正后的含量分布, 作者称其为面积校正累计频率 (Area-calibrated accumulative-frequency, ACAF) 法, 其结果与浓度-面积模型方法 (1) 只相差一个常系数, 即单位网格的面积, 不影响双对数坐标下曲线的形态。可见, ACAF 既消除了由于样品点分布不均一的影响, 又不会因孤立高值点导致其邻近等值线畸变和难以剔除采样空白区等, 且算法简单。

(3)  $c_i$  值按下式确定:

$$c_i = C_{\min} \cdot \exp[(i-1)\delta], \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (3)$$

$$\delta = (1/n_s) \ln(C_{\max}/C_{\min}) \quad (4)$$

使得  $c_i$  在对数坐标下为等距, 否则容易导致数据点在低含量区过稀而在高含量区过密, 影响对其分布模式的总体认识。 $n_s$  为计算累计频率的分组数, 我们取为 50。

### 3 结果与讨论

图 1~图 4 给出了 3 个金属成矿区和 5 个油气远景区元素含量的 ACAF 曲线, 横坐标为元素含量, 纵坐标为大于该元素含量的网格结点数, 均为对数标度。元素名称已标在图上。

由图 1~图 4 我们可得出以下列结论。

(1) 无论是多金属地球化学场的金属元素, 还是油气地球化学场的烃类等指标, 无论场介质是基岩还是水系沉积物或土壤, 其 ACAF 均显示连续多重分形特征, 即在双对数坐标下 ACAF 曲线为一连续曲线, 而不是许多研究者通常认为的由单一幂率分布所表征的单一分形。

(2) 双对数坐标下各元素含量的 ACAF 曲线有两近似线性段。低值区的近似线性段非常“平坦”, 线段拟合先从第一个点开始, 渐次加入后面各点; 第二个近似线性段拟合先从线性段中间点开始, 渐次加入两侧各点, 直至拟合度开始小于 0.8。图中参数  $C_1$  为第一条拟合直线段拟合度大于 0.8 时的最后一个点的含量值, 与各元素的测定下限十分接近, 由此可见, 第一近似线性段大致反映了介于检出限到测定下限之间或测定下限附近的低值波动; 另一近似线性段跨越了主要的含量区间, 反映了地球化学场的内禀分形特征 (intrinsic fractal, IF); 两者为连续过渡。图中标注的参数  $b_1$ 、 $b_2$  为这两个近似线性段经最小二乘拟合的直线斜率的负值, 即累计频率分布的幂率。

(3) 地球化学场的连续多重分形具两种特定模式 (图 5)。模式 I 为双对数坐标下具上述两个近似线性段的连续曲线, 称简单连续多重分形 (simple continuous multifractal, SCM) 模式。图中 IF 为内禀分形特征线。模式 II 是在 SCM 基础上, 于高含量区“叠加”有明显的正偏, 称高浓集的多重分形 (highly accumulated continuous multifractal, HACM) 模式。在粤北地区 (图 1), 属于模式 II 的元素包含了区域主要成矿元素 W、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn、Sb、Ag 和 Nd、P、Ca、F、La 等, 尤以 W、Pb 和 Sb 的正偏大, 显示一种很强的高含量叠加, 其他元素则属于或接近于模式 I。在安徽江北 (图 2a), 属模式 II 的元素有 Ag、As、Au、Cd、Pb、W, 而在江南 (图 2b) 则有 Cu、Mn、Pb, 显示江南江北金属地球化学场的重大差异, 而事实上以铜陵铜矿田为代表的铜成矿带位于江南区。在塔里木盆地北部的阿克库勒 (图 3a)、柴窝堡 (图 3b)、桑塔木 (图 4a) 与雅轮地区 (图 4b), 主要烃类指标  $C_1 \sim C_4$  多服从模式 II (仅桑塔木的  $C_1$  和雅轮的  $C_2$  例外), 而其他指标如  $\Delta C$ 、荧光 (F) 各波段、氦气测量 (He)、热释汞 (Hg)、磁化率 (Kc)、放射性测量 (Tc) 等指标多遵循模式 I, 实际上这些指标的油气指示意义较差<sup>1)</sup>。既可为模式 I 亦可为模式 II 的有正、异戊烷 ( $nC_5$ 、 $iC_5$ ) 和紫外 (U) 各波段。土壤中正、异戊烷的含量很低, 分析质量差。总之, 区域主要成矿和油气指示元素不同程度地显示为 HACM 模式, 这使得 HACM 模式可望用于区域成矿成油和区域环境评价, 而开始出现高浓度叠加的“临界”

1) 鲍征宇, 苏江玉, 等. 新疆塔里木盆地北部雅克拉-轮台地区油气化探数据处理与解释报告, 1997。

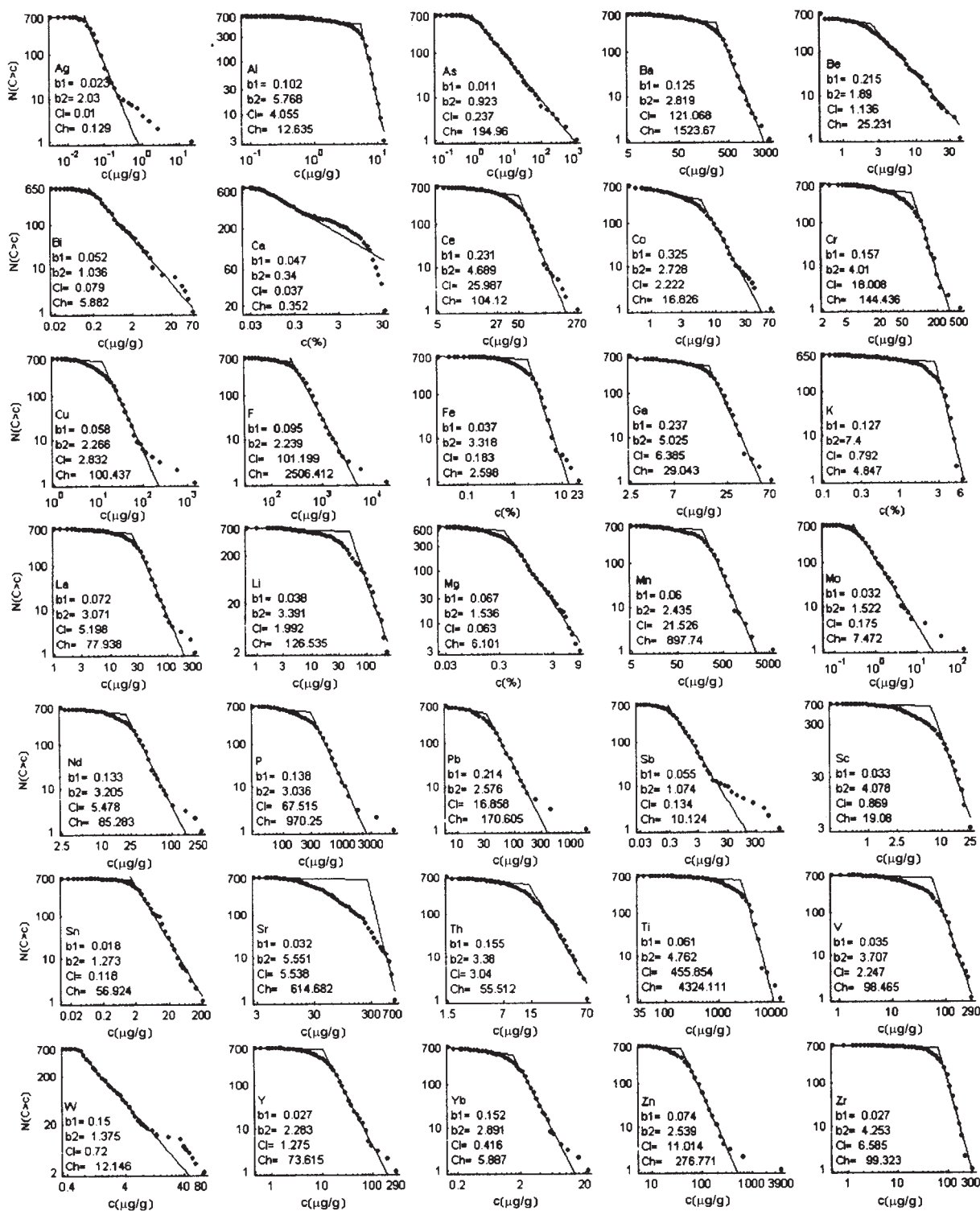


图 1 粤北地区基岩样品中元素含量的 ACAF 曲线

Fig. 1 Continuous multifractal features of elements in the bedrock samples from the Nanling district

$b_1$ ,  $b_2$  为两近似线性段的最小二乘拟合直线的斜率的负值,  $C_1$  为第一条拟合直线段拟合度大于 0.8 时的最后一个点的含量值,  $Ch$  为开始出现高含量叠加的“临界”含量。

$b_1$ ,  $b_2$  are negative values of line slopes,  $C_1$  concentration value of the last point in the first line,  $Ch$  critical cutoff value where highly accumulated portion occurs.

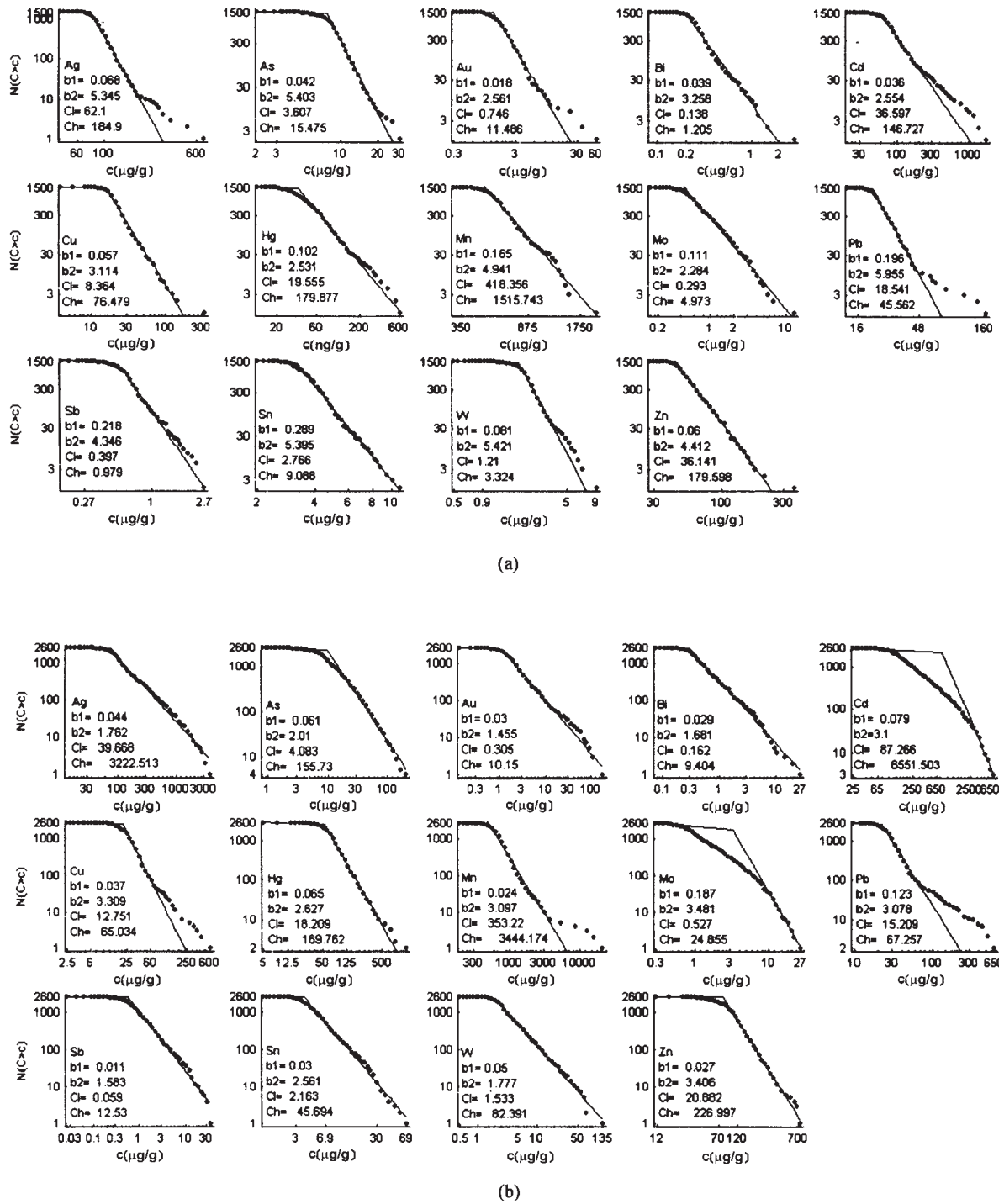


图 2 安徽江北(a)、江南(b)地区水系沉积物样品中元素含量的 ACAF 曲线

Fig. 2 Continuous multifractal features of elements in the stream sediment samples from North (a) and South (b) Anhui Province 参数意义同图 1。

Parameters are similar to Fig. 1.

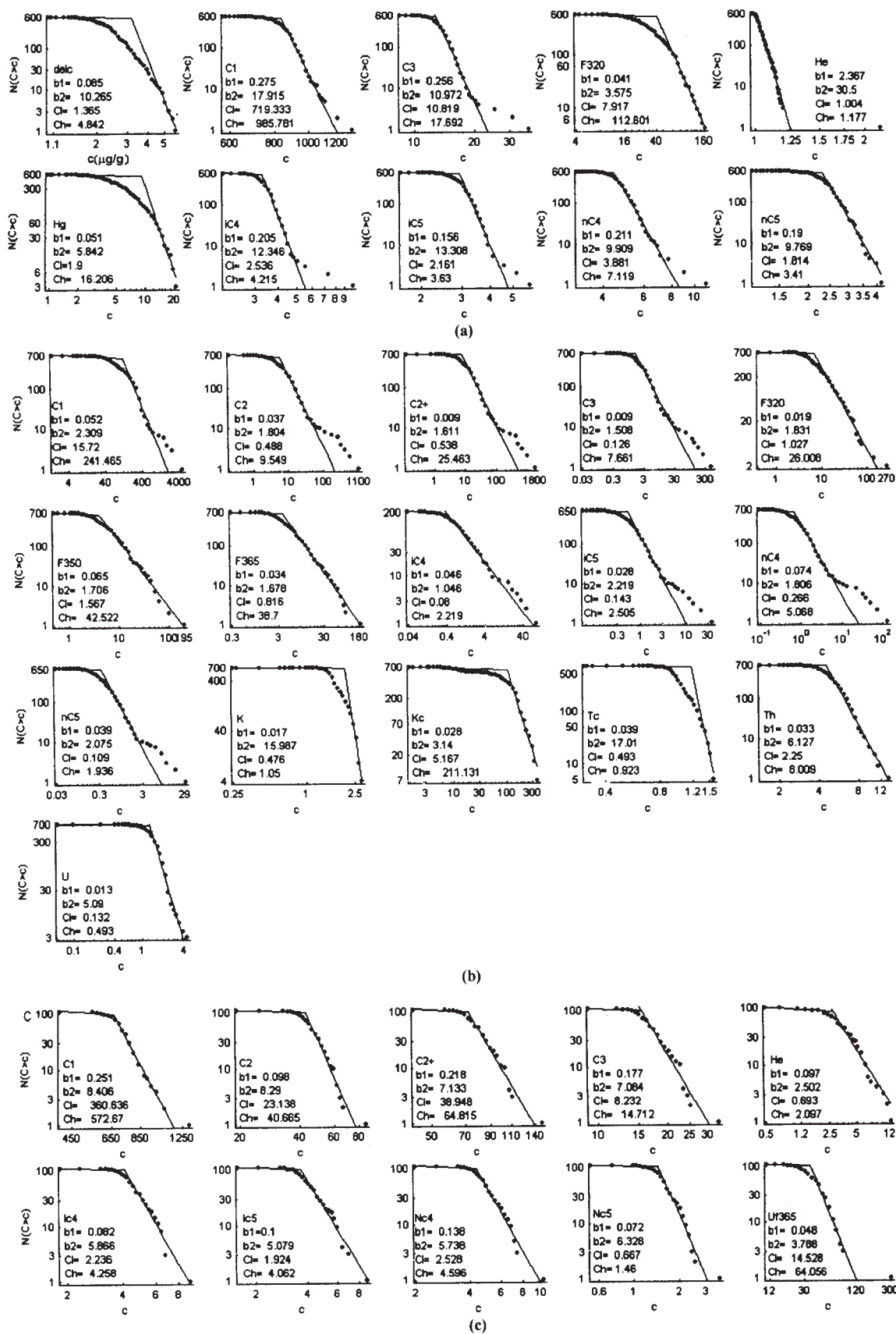


图3 塔里木盆地北部阿克库勒(a)、柴窝堡(b)和雅克拉(c)地区土壤样品中烃类等化探指标值的 ACAF 曲线

Fig. 3 Continuous multifractal features of elements in soils from Akekula (a), Chaiwopu (b) and Yakla (c) in the northern part of the Tarim basin  
 $C_1 \sim C_3$  为土壤酸解烃, delc 为  $\Delta C$ , F320 等为荧光分析各波段, He 为土壤氦气测量, Hg 为土壤吸附汞, Kc 为土壤磁化率, Tc 为土壤放射性测量, U365 为紫外分析波段, K, Th, U 为元素。参数意义同图 1。

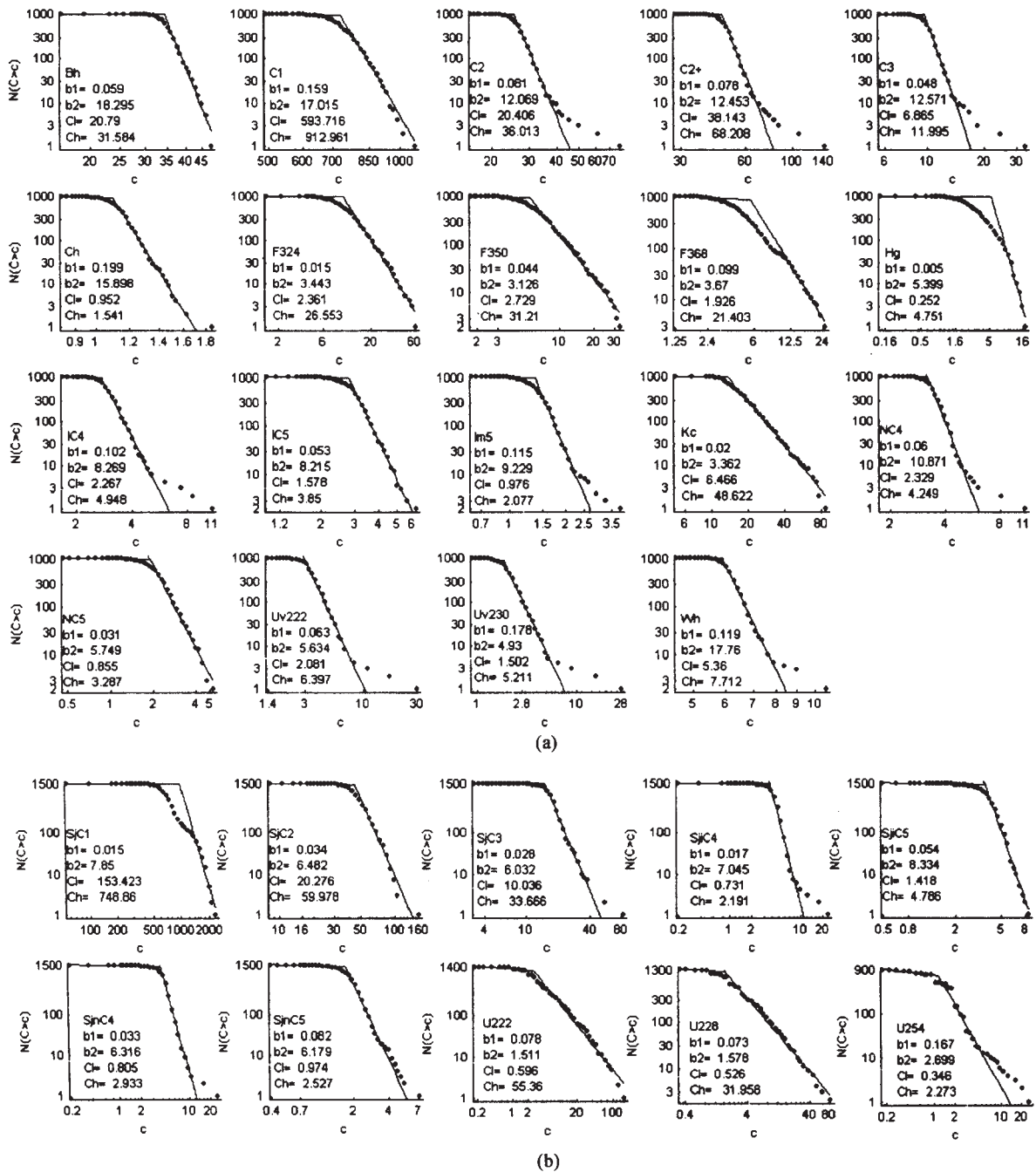


图 4 塔里木盆地北部桑塔木(a)和雅轮(b)地区土壤样品中烃类等化探指标值的 ACAF 曲线  
 Fig. 4 Continuous multifractal features of elements in soils from Sangtamu (a) and Yalun (b) in the northern part of the Tarim basin  
 参数意义同图 1。

Parameters are similar to Fig. 1.

含量值可能作为区域成矿成油强度的一种度量。图 1 ~ 图 4 中标注的参数  $C_h$  给出了这一“临界”含量值。

雅克拉工区似乎是一个例外，在那里各指标未显示明显的正偏叠加，这可能是由于该区样品数较少所致。雅克拉工区只有 195 个样品，而其他地区的样品数均超过 1 000。当然，矿床或油气藏埋藏较深

和盖层致密也可能导致地表无“显示”。

对于幂率指数，从前面分析可以看出，第一近似线性段大致反映了介于检出限到测定下限或者测定下限附近的低值波动，从这个意义上说，幂率指数  $b_1$  并没有指示分形特征的实际意义。详细分析各元素  $b_2$  值的大小可以得出如下结论。

在南岭地区，如果按  $b_2$  值的大小把上述元素进

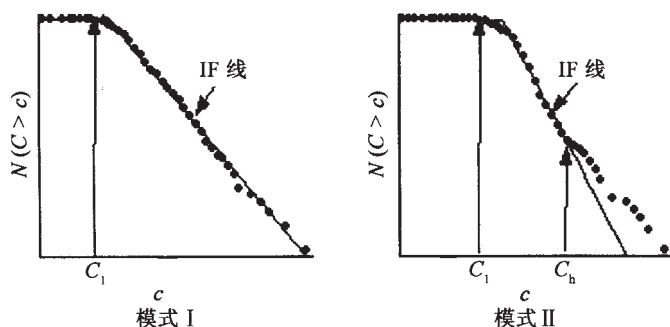


图 5 地球化学场连续多重分形模式示意图

Fig. 5 Continuous multifractal model of geochemical fields

行排列, 得到  $K > 7 > Al > Sr > Ga > 5 > Ti > Ce > Zr > Cr > Sc > 4 > V > Li > Th > Fe > Nd > La > P > 3 > Yb > Ba > Co > Pb > Zn > Mn > Y > Cu > F > Ag > 2 > Be > Mg > Mo > W > Sn > Sb > Bi > 1 > As > Ca_0$ 。由此可以看出, 本区服从模式 II 分布的元素其  $b_2$  值均较小, 基本介于 1~3 之间, 而服从模式 I 分布的所有元素其  $b_2$  值均大于 3, 即该区与成矿密切相关的主要成矿元素的  $b_2$  值均偏小, 而非主要成矿元素则相反。这可以解释为,  $b_2$  值越小, 即直线越缓, 自低含量点到高含量点的频率下降慢, 表明有较多的高含量点分布, 有利于成矿; 反之,  $b_2$  值越大, 则直线下降很快, 频率成分主要集中在低含量区, 不利于成矿。

从图 2 来看, 无论是江南、江北, 各元素  $b_2$  值都比较接近, 江北介于 2.2~6 之间, 江南介于 1.5~3.5 之间。分析江南江北地区对应元素的  $b_2$  值可以进一步看出, 江南除 Cu、Cd 和 Mo 的  $b_2$  值略大于江北外, 其他元素的  $b_2$  值均小于江北, 从这个意义上来说, 江南更有利于成矿, 而事实也证明主要的大型矿床均位于江南。在江北, 服从模式 II 分布的 Pb、W、As、Ag 的  $b_2$  值都比较大, 在该区基本上属最大之列, 而同样属模式 II 分布的 Au、Cd 的  $b_2$  值却较小, 在该区又属于最小之列了; 而在江南地区, 属模式 II 分布的 Cu、Mn、Pb 三元素的  $b_2$  值同样都比较大, 均大于 3。从这点来看, 江南、江北地区  $b_2$  值所显示的规律性不如南岭地区明显, 究其原因, 作者认为可能与南岭地区分析样品为全岩而江南江北为水系沉积物有关。

图 3、图 4 显示, 除柴窝堡外, 其他四个油气地球化学场中服从模式 II 分布的化探指标的  $b_2$  值明显高于其他服从模式 I 分布的指标的  $b_2$  值, 即油气地球化学场中地球化学指标的  $b_2$  值大小与金属地球化学场存在着明显的差异, 这可能进一步证

实金属化探与油气化探在场的空间结构上存在着本质的差异。

(4) 无论是多金属地球化学场的金属元素, 还是油气地球化学场的烃类等指标, 无论场介质是基岩还是水系沉积物或土壤, 上述地球化学场特征具普适性。

早期的许多研究者多倾向于地球化学变量分布为单一的幂率分布即单一分形<sup>[9, 11-13]</sup>, 近年来则多倾向于两直线段式的双重分形<sup>[20, 24-27]</sup>。

Laherrere<sup>[29]</sup>与 Pillet<sup>[30]</sup>通过对人口数量、城镇大小、碳氢化合物的聚集程度以及地震发生频率等的研究, 指出其分布在双对数坐标下并不呈简单的直线分布, 而是抛物线, 称之为抛物线分形 (Parabolic fractal); Cheng<sup>[19]</sup>、Sim *et al.*<sup>[20]</sup>也获类似结果, 称连续分形 (continuous fractal)。作者认为, 用于研究的样品数偏少、计算误差 (如计算等值线所围面积的误差) 和频率统计时分组数太少 (有的在双对数图上仅几个点) 或分组不合理等原因可能掩盖了地球化学元素频率分布曲线的整体结构。雅克拉工区就可能受到样品点太少的影响。即便是相同的数据, 作者也曾只认识到简单的连续分形<sup>1)</sup>。

事实上, 两直线段式的双重分形、Laherrere 和 Pillet 的抛物线分形、Cheng 等的连续分形在形态上与我们的第 I 类分形模式相似, 因其特征的两近似线性段, 当样品数较少或频率分组数较少时极易被认为是两直线段式的双重分形。如前所述, 第一近似线性段只反映了介于检出限到测定下限之间或测定下限附近的低值波动, 与分析质量有关, 并非系统的内禀属性; 地球化学场演化产生跨越主要含量区间的内禀分形特征线。成矿作用是成矿元素的一种局部性叠加, 这将驱使地球化学场偏离内禀分形特征线, 产生第 II 类分形特征。地球化学场具有两类分形特征看来是合适的。

元素含量频率分布曲线上的两近似线性段之间为连续过渡, 并非有截然的转折点, 且第一直线段只反映了介于检出限到测定下限之间或测定下限附近的低值波动, 因此不同于一些研究者<sup>[10, 20-27]</sup>根据两线性段的转折点作为异常下限区分矿化区、污染区或者部分元素相对集中的地区中一些元素的地球化学背景和异常的结论。事实上, 对于一个几千

1) Xie S Y, Bao Z Y. Continuous multifractals: Intrinsic characteristics of geochemical field. Abstracts of AGU Spring Meeting, Washington D. C., 1999.

甚至数万平方千米的地球化学场,其内受不同地层、构造、表生条件的影响,并不是所有元素都会有“异常”,除受成矿作用等局部异常叠加的成矿元素外,其他元素更可能显示“正常”的地球化学场的分形特征,即模式 I 分布;对于具模式 II 分布的元素,我们认为,开始出现高含量叠加的“临界”含量可能作为区域成矿成油强度的一种度量,但是否就是通常意义下的异常下限值得进一步讨论。

## 4 结 论

(1) 面积校正累计频率法是一种研究地球化学指标分形特征的有效方法。

(2) 地球化学指标值的 ACAF 具有连续多重分形的两种特定模式:简单连续多重分形(SCM)模式和具高浓集连续多重分形(HACM)模式。主要成矿元素和主要油气化探指标均不同程度地显示为 HACM 模式,而其他指标多表现为 SCM 模式。不同的分形模式可望用于区域含矿含油性和区域环境评价,而开始出现高含量叠加的“临界”含量值可能作为区域成矿成油强度的一种度量。地球化学场的这一分形特征具普适性。

(3) 油气地球化学场与金属地球化学场在场的空间结构上存在着本质的差异。

西北石油局、安徽地质调查局等提供了宝贵的第一手资料,特此致谢。

### 参考文献(References):

- [1] 於崇文,岑况,鲍征宇,等. 成矿作用动力学[M]. 北京:地质出版社,1998. 1~230.  
Yu Chong-wen, Chen Kuang, Bao Zheng-yu, et al. Dynamics of Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing Houses, 1998. 1~230 (in Chinese).
- [2] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 85~102.  
Yu Chong-wen. Large ore deposits and metallogenic areas(zones) at the edge of chaos[J]. Earth Sci Frontier, 1999, 6(1): 85~102 (in Chinese with English abstract).
- [3] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: Freeman, 1982. 1~468.
- [4] Mandelbrot B B. Fractals: Form, Chance and Dimension[M]. San Francisco: Freeman, 1977. 1~361.
- [5] Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science[M]. New York: Springer-Verlag, 1992. 1~59.
- [6] Mandelbrot B B. Multifractals and 1/f Noise[M]. New York:

- Springer-Verlag, 1999. 1~442.
- [7] De Wijs H J. Statistics of ore distribution: (1) Frequency distribution of assay values[J]. Geol Mijnbouw, 1951, 13: 365~375.
- [8] De Wijs H J. Statistics of ore distribution: (2) Theory of binomial distribution applied to sampling and engineering problems[J]. Geol Mijnbouw, 1953, 15: 12~24.
- [9] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geophysics[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1994. 1~398.
- [10] 张哲儒,毛华海. 分形理论与成矿作用[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 195~204.  
Zhang Zhe-ru, Mao Hua-hai. Fractal theory and Ore-forming[J]. Earth Sci Frontiers, 2000, 7(1): 195~204(in Chinese with English abstract).
- [11] 沈步明,沈远超. 新疆某金矿的分维特征及其地质意义[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(3): 297~302.  
Shen Bu-ming, Shen Yuan-chao. Fractal dimension of some gold deposit in Xinjiang and its geological application [J]. Sci China (B), 1993, 23(3): 297~302 (in Chinese with English abstract).
- [12] 程小久,卢建杭,宋亮明. 铅锌品位分维 D 值的意义和计算程序[J]. 地质与勘探, 1994, 30(5): 32~35.  
Cheng Xiao-jiu, Lu Jian-hang, Song Liang-ming. The meaning and program of fractal dimension of Pb and Zn [J]. Geol Prospect, 1994, 30(5): 32~35 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李长江,蒋叙良,徐有浪,等. 浙江中生代热液矿床的分形研究[J]. 地质科学, 1996, 31(3): 264~273.  
Li Chang-jiang, Jiang Xu-liang, Xu You-lang, et al. Fractal study on Mesozoic hydrothermal deposits in Zhejiang Province [J]. Sci Geol Sinica, 1996, 31(3): 264~273 (in Chinese with English Abstract).
- [14] 陈春仔,兰朝利. 分形理论在地质科学中的应用[J]. 地学探索, 1998, 6: 123~128.  
Chen Chun-zi, Lan Chao-li. Fractal Theory and Its Application in Earth Science[J]. Earth Sci Explor, 1998, 6: 123~128(in Chinese with English Abstract).
- [15] 仪祥祥. 非线性科学及其在地质学中的应用[M]. 北京:气象出版社, 1995. 1~273.  
Yi C. Unlinear Science and Its Application in Earth Science [M]. Beijing: Weather Press, 1995. 1~273.
- [16] Allegre C J, Lewin E. Scaling laws and geochemical distribution [J]. Earth Planet Sci Lett, 1995, 132: 1~13.
- [17] Bölviken B, Stokke P R, Feder J, et al. The fractal nature of geochemical landscapes[J]. J Geochem Explor, 1992, 43: 91~109.
- [18] Agterberg F P, Cheng Q, Wright D F. Fractal modeling of mineral deposits[A]. International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries[C]. Montreal: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 1993. 43~53.
- [19] Cheng Q. Multifractality and spatial statistics[J]. Comput Geosci, 1999, 25(9): 949~961.
- [20] Sim B L, Agterberg F P, Beaudry C. Determining the cutoff between background and relative base metal smelter contamination levels using multifractal[J]. Comput Geosci, 1999, 25(9): 1 023~1 041.
- [21] Cheng Q. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly

- separation[J]. *J Geochem Explor*, 1999, 65: 175 ~ 194.
- [22] Cheng Q, Bonham G F, Hall G E M, *et al.* Statistical study of trace elements in the soluble organic and amorphous Fe-Ma phases of surficial sediments, Sudbury Basin: 1, Multivariate and spatial analysis[J]. *J Geochem Explor*, 1997, 59(1): 27 ~ 46.
- [23] Cheng Q, Agterberg F P. Comparison between types of multifractal modeling[J]. *Math Geol*, 1996, 28(8): 1 001 ~ 1 015.
- [24] Cheng Q, Agterberg F P, Bonham-Carter G F. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation[J]. *Explor Geochem*, 1996, 56: 183 ~ 195.
- [25] Cheng Q. The perimeter-area fractal model and its application to geology[J]. *Math Geol*, 1995, 27: 69 ~ 82.
- [26] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. *J Geochem Explor*, 1994, 51: 109 ~ 130.
- [27] 成秋明. 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*, 2000, 25(3): 311 ~ 318.
- Cheng Qiu-ming. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern [J]. *Earth Science — J China Univ Geosci* 2000, 25(3): 311 ~ 318 (in Chinese with English abstract).
- [28] 於崇文, 骆庭川, 鲍征宇, 等. 南岭地区区域地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. 1 ~ 543.
- Yu Chong-wen, Luo Ting-chuan, Bao Zheng-yu, *et al.* Regional geochemistry of the Nanling District[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 1 ~ 543 (in Chinese).
- [29] Laherrere J. Distributions de type "fractal parabolique" dans la nature[J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II. Sciences de la Terre et des Planetes*, 1996, 322(7): 535 ~ 541.
- [30] Pillet R. Mise en evidence du comportement multifractal de la distribution frequence-magnitude d'un echantillon sismique(loi de Gutenberg-Richter) [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II. Sciences de la Terre et des Planetes*, 1997, 324(7): 805 ~ 810.

## Continuous multifractal model of geochemical fields

XIE Shu-yun, BAO Zheng-yu

(*Institute of Geochemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** A method based on area-calibrated and accumulative frequency (ACAF) distribution of geochemical data from three metallic and five oil/gas geochemical fields is proposed to study fractal characteristics of geochemical fields. The data include 35 elements of 1448 whole rock samples from a region of 4 292 km<sup>2</sup> in North Guangdong Province, South China, 14 elements of 5 489 and 4 524 stream sediments in South and North Anhui Province, South China, respectively, and more than 15 hydrocarbons and other indices in 7 419 soil samples from 5 oil fields with total survey area > 8 000 km<sup>2</sup> in the Tarim basin, North China. The results show that log-log diagrams of ACAF of geochemical indices clearly demonstrate that geochemical fields are of continuous multifractal features, which are quite different from the results of some authors who showed that geochemical dispersion of indices bear unifractal features as single power-law relationship on log-log diagrams. The curves of ACAF on log-log diagrams can be approximately fitted by two straight lines. The first one covers the relatively low concentration portion and reflects the fluctuated detection limit of measurement, and the other covers the major concentration region and represents the intrinsic multifractal characteristics of geochemical fields. There does not exist any turning point but rather a continuous transition section between them and the intersection cannot be used as a threshold to distinct anomalies from geochemical background. The continuous multifractals of geochemical fields can be categorized by two models: simple continuous-multifractal model (SCM) and highly accumulated continuous-multifractal model (HACM). Main ore-forming elements and major oil indices show HACM to different degrees, while others SCM. These different fractal models are expected to be applicable to appraise regional ore-bearing and or oil-bearing strata and even regional environment. Whereas, the threshold occurring in highly-accumulated part will be useful to measure ore-forming or oil-forming strengths. Continuous multifractals are quite universal in geochemical fields.

**Key words:** geochemical fields; area-calibrated accumulative frequency (ACAF) method; continuous multifractal model; metal; oil