

# 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用： 成矿弱信息提取和复合信息分解

成秋明<sup>1,2</sup>, 赵鹏大<sup>1</sup>, 陈建国<sup>1</sup>, 夏庆霖<sup>1</sup>, 陈志军<sup>1</sup>,  
张生元<sup>3</sup>, 徐德义<sup>1,4</sup>, 谢淑云<sup>1,5</sup>, 王文磊<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074, 北京 100083

2. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系, 加拿大多伦多 M3J1P3

3. 石家庄经济学院资源与环境工程研究所, 河北石家庄 050031

4. 中国地质大学经济管理学院, 湖北武汉 430074

5. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 本研究的目的是应用非线性理论和高新信息处理技术获取矿产资源预测综合信息, 开展以有色金属和贵金属矿产资源潜力评价和预测靶区圈定, 提交个旧及周边地区矿产资源潜力分布图。围绕该研究任务, 重点开展了如何应用奇异性理论和方法, 对比个旧东西矿区的异同。由于区域构造和岩体分布等空间变化性, 导致东西区成矿背景存在较大差异, 受出露地表或近地表矿体分布和矿山开采的影响, 东西区的成矿异常强度和大小都存在较大差异, 东区总体呈高背景而西区为低背景, 因而, 对东西区的成矿信息对比研究和异常圈定相对困难。采用局部奇异性分析方法从地球化学分形密度的角度圈定了局部异常, 在东西区均较好地反映了致矿地球化学异常的分布, 同时采用广义自相似分析方法分解了综合地球化学异常和背景。结果表明, 东西区地球化学背景差异悬殊, 而局部异常具有显著的自相似性。据此在东西区同时圈定的局部异常具有内在的相似性和表现形式上的多样性, 以此为依据所圈定的靶区均具有找矿意义。

**关键词:** 非线性理论; 空间信息技术; 矿产资源预测; 分形与多重分形模型。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0232-11

收稿日期: 2008-12-16

## Application of Singularity Theory in Prediction of Tin and Copper Mineral Deposits in Gejiu District, Yunnan, China: Weak Information Extraction and Mixing Information Decomposition

CHENG Qiu-ming<sup>1,2</sup>, ZHAO Peng-da<sup>1</sup>, CHEN Jian-guo<sup>1</sup>, XIA Qing-lin<sup>1</sup>, CHEN Zhi-jun<sup>1</sup>,  
ZHANG Sheng-yuan<sup>3</sup>, XU De-yi<sup>1,4</sup>, XIE Shu-yun<sup>1,5</sup>, WANG Wen-lei<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Beijing 100083, China

2. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada

3. Institute of Natural Resource and Environment Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

4. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** New non-linear theory and methods of multifractal singularity are applied to map weak anomalies related to deeply buried ores and mineralization halos. The main contents of singularity theory and methodology include three main principles and models: local singularity analysis (for example  $\Delta$ -analysis) for enhancing weak anomalies caused by buried ores, generalized

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金项目 (No. 40525009); 国家自然科学基金重点项目 (No. 40638041); 国家 863 项目 (No. 2006AA06Z115); 教育部创新团队基金 (No. IRT0755); 地质调查项目 (No. 121201063390110); 云南锡业集团省校合作项目; 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助。

**作者简介:** 成秋明 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 国际数学地球科学协会最高奖——克伦宾奖章获得者, 主要从事矿产普查与勘探、数学地质、地理信息系统以及矿产资源评价的教学和研究。E-mail: qiuming@cug.edu.cn

self-similarity analysis (for example  $C-A$  and  $S-A$  models) for anomaly decomposition and for anomaly and background separation, and fractal spectrum analysis (for example mapping posterior probability) for characterizing spatial distribution of singularities and anomalies. This paper uses the local singularity analysis to map the anomalies not only in the eastern area where known mineral deposits are found but also in the western area where few mineral deposits have been found. It also uses the generalized self-similarity analysis method  $S-A$  model in integration of the principle component analysis in separating element association anomalies in both eastern and western areas. The results show that the eastern and western areas depict significant background difference and the local anomalies obtained using both local singularity model and  $S-A$  model show generalized self-similarity in eastern and western areas. Several target areas are delineated on the basis of these local anomalies.

**Key words:** non-linear theory; spatial information technology; mineral resource prediction; fractal and multifractal model.

个旧矿区是我国重要的锡、铜多金属矿集区,锡矿资源的开发与利用在个旧市乃至整个云南省的国民经济建设中占有举足轻重的地位,同时,对国际、国内有色金属工业的发展也有着重要影响。但经过几十年大规模的开采,目前个旧锡矿面临着资源匮乏的问题,深部及外围找矿勘查已成当务之急。近年来研究者们通过与云锡公司、云南省地调院、国家地质调查局等部门合作,先后在个旧地区开展了多项矿产资源勘查和预测研究项目。

为了在这种工作程度较高、有多年矿产开采历史、具有大量资料积累、成矿系统复杂、找矿难度突出的地区开展有效的矿产预测工作,赵鹏大院士强调开展新理论、新方法、新手段、新技术、新数据、新系统等应用和研究(个人交流)。为了研究个旧地区浅部与深部矿体和矿化类型的变化规律,进行个旧东西区成矿规律和找矿标志的对比研究和靶区的圈定,本项研究从“地质异常—成矿多样性—矿床谱系”(“三联式”)成矿预测理论(赵鹏大, 2001)出发,以致矿地质异常为研究对象,采用基于多重分形的“局部奇异性、广义自相似性、分形谱系”的非线性矿产资源定量评价原理和模型(成秋明, 2004a; Cheng, 2004b),在 GeoDAS(Cheng, 2000)专业 GIS 环境下对个旧岩体周边进行了成矿定量预测。在对区域地质、地球物理、地球化学、遥感数据成矿信息提取的基础上,突出了弱异常的识别、复合异常的分解和综合信息的集成等关键技术的研究与应用。分别采用局部奇异性弱异常圈定方法和  $S-A$  广义自相似性异常分解方法,结合空间主成分分析方法圈定了微量元素 Sn、Cu、Cd、Pb、Zn 等组合异常。在此基础上,采用人工智能方法—证据权模型对地球化学异常、有利岩性层、构造交汇、岩体影响范围等控矿要素进行了优化和最佳距离确定,从非线性空间叠加过程角度(multiplicative cascade process),对多种空间信息图层(证据层)进行信息综合,采用最

新研究的证据权校正模型绘制了锡铜矿床预测后验概率图,克服了证据图层不满足条件独立性的困难(Cheng, 2008)。

在研究锡铜成矿系统和成矿模式的基础上,根据锡铜矿床的空间矿化系列分布模式确定主要控矿要素和相互关系,以岩浆热液成矿或岩浆改造成矿为主要成矿模式解释空间数据处理结果。

从矿产预测理论与方法上进一步深化了地质异常矿产预测理论和非线性矿产资源预测模型和技术,建立了“三联式”成矿预测理论与多重分形理论为基础的非线性理论的联系,非线性理论的应用为三联式矿产预测理论注入了创新性内容。

在技术上,在矿床地质研究指导下,采用有效的信息处理方法和技术进行复杂的数据处理和信息提取,获取与矿产资源有关的综合信息,进行以锡铜为主的矿产资源潜力评价和预测靶区圈定。以 1:20 万地质图、矿产分布图、物探(重磁)异常图、水系沉积物分布图、遥感(ETM)图像、GIS 空间数据库等为基础资料,采用 GeoDAS 技术解决以下信息提取和信息综合关键问题:①采用多重分形奇异性分析方法形成多元素化探异常分布图。②采用广义自相似异常分析方法( $S-A$ 方法)分解水系沉积物地球化学异常,识别低缓构造化探异常。③采用空间加权主成分分析方法 SWPCA 刻画成矿元素分布与构造分布的关系,确定构造与成矿关系,区分与矿有关的构造模式,确立构造控矿标志和证据。④将多元素地球化学异常与地球物理数据处理结果相结合,确立 3D 岩浆—构造控矿标志和证据。⑤采用多重分形模拟方法建立锡矿区域空间分布的广义自相似模型,确定矿异常的空间频率( $S-A$ )、特征(MSVD)、空间谱系( $C-A$ )。⑥采用模糊证据权方法进行信息综合,形成矿产资源潜力分布图,确定矿床预测靶区并预测资源总量。提交个旧及周边地区 1:20 万比例尺锡铜矿产资源潜力分布图。

由于本项目研究内容较多,限于论文篇幅,我们将在多篇论文中系统介绍该项研究成果.本篇主要介绍成矿信息的提取和复合信息分解内容;后续论文将介绍综合信息集成和靶区圈定内容(成秋明等,2009).这些研究成果不仅直接应用于个旧地区的锡铜多金属矿床预测和资源评价,而且所介绍的矿产预测原理、信息处理方法以及软件技术等创新性成果,对同行在其他地区开展矿产预测工作会有借鉴作用.

## 1 研究区概况与空间数据库建立

研究区范围为云南个旧锡铜多金属矿区,总面积约 1 700 km<sup>2</sup>,以个旧大断裂为界分为东区和西区(图 1),其中西区约 1 100 km<sup>2</sup>,东区约 600 km<sup>2</sup>,目前已发现和开采的矿床主要集中在东区.

### 1.1 区域地质背景与研究区成矿条件

云南个旧锡铜多金属矿区位于云南省东南部,位居环太平洋成矿带与地中海—喜马拉雅成矿带的交汇处,是我国滇东南锡矿带上最重要的、规模最大的锡多金属矿集区之一(图 1).个旧矿集区所在的滇东南地区经历了自古生代以来的华南板块形成和其西南部裂解和重组的演化过程.经历了自早古生代末期加里东运动,晚古生代—早中生代印支运动,燕山期运动到喜山期多期次构造运动,形成现今复杂的构造样式.区内多次构造运动和强烈的岩浆活动,为该区多种矿产的形成提供了有利的地质条件(曾允孚等,1995;万天丰,2004;徐启东等,2009).目前区内已发现的矿种近 60 种,其中黑色金属矿产有 Fe、Mn、Cr 等;有色金属矿产有 Sn、Cu、Pb、Zn、W、

Ni、Al、Mo、Co、Bi、Hg、Sb、Pt、Au、Ag 等;稀有金属矿产有 Ta、Nb、Li、Be、Zr 及其他稀有金属等(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984).

个旧地区是几个区域地球物理场、区域地球化学场的交汇地段(庄永秋等,1996),区内有利的地层—构造—岩浆岩组合为个旧矿区提供了优越的成矿条件.个旧矿区分为东区和西区,已探明东区是超大型锡多金属矿集区,是一个以锡为主,同时蕴藏有 Cu、Pb、Zn、W、Ag、Bi、In 等 20 多种有色及稀有金属矿产的聚集地.现有矿床主要集中分布在东区的马拉格、松树脚、高松、老厂和卡房五大矿田内(图 1).目前关系到个旧市及其矿山发展前景的西区找矿工作,已经提上了议事日程(卢耀,2004).

矿区内出露的地层以中生界三叠系碳酸盐岩为主.三叠系以下的地层多出露于区域外围,仅在区域的西北及西南部有少量二叠系火山岩系分布.其中与矿化关系最密切的是法郎组( $T_2f$ )和个旧组( $T_2g$ ),中三叠统个旧组( $T_2g$ )地层为本区的主要容矿层位,由灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩互层局部夹薄层泥质灰岩组成,总厚度超过 1 000 m,尤其个旧组下段是整个矿区容矿量最为丰富的层位(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984).此外,在花岗岩接触带附近,上述碳酸盐岩遭受接触热变质作用影响而形成大理岩或结晶灰岩.

区内岩浆活动亦十分强烈,是该区形成大型、超大型矿床的重要条件之一.区内不但有一定规模的火山活动,同时表现有中生代基性、酸性以及碱性岩体先后侵入于中三叠统砂页岩及碳酸盐岩中,使围岩广泛发生程度不同的接触变质.其中燕山期花岗岩类分布广泛,与区内锡多金属矿床成矿关系密切,尤其是个旧岩体在矿床的时空分布、物质与热能供给等方面都起着决定性作用.个旧岩体展布在研究区中部,出露面积约 450 km<sup>2</sup>,它是富 Si、高 K/Na 和 Al 的具花岗岩结构的杂岩体,锡含量明显高于普通花岗岩体.

区内构造形迹以褶皱、断裂为主,尤其以断裂构造十分发育为特点.本区经历了长期而复杂的构造运动,形成了不同规模的褶皱和断裂系统.研究区东部的的主要褶皱和断裂呈南北和东西向,西部的主要褶皱和断裂呈北东—南西向和北西—南东向.纵贯全区呈南北向延伸的个旧断裂将成矿区分割为东西两部分,而矿区内两个一级大型褶皱构造即五子山复式背斜和贾沙复式向斜则分别控制了东部成矿区及西部成矿区.花岗岩产状、地层岩性及断裂构造是

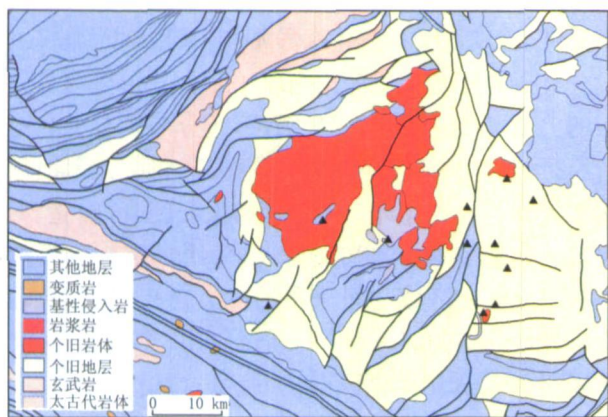


图 1 云南个旧锡多金属矿集区简化地质图

Fig. 1 Simplified geology of Gejiu district

数据来自中国地质调查局,三角符号表示锡矿床,黑线条表示断层

主要控矿要素. 一系列次级东西向、北东—南西向、北西—南东以及南北向构造相互交织控制了大型矿床的产出空间.

个旧锡多金属矿床有砂矿和原生矿两类. 砂矿多为残积、坡积、人工堆积形成, 主要分布在原生矿床附近的岩溶盆地、山坡和侵蚀阶地, 原生矿床按空间位置可分为层间氧化矿和接触带矽卡岩矿两大类. 研究表明, 个旧锡多金属矿床与个旧组围岩、构造及侵入活动密切相关. 成矿作用的主要产物是富含 Sn、Cu、As、Ag、Pb 和 Zn 等微量元素的锡铜矿物集合体(於崇文等, 1988). 虽然花岗岩岩浆期后气液成矿可能是主要的成矿类型, 其他多期次、多来源和多成矿叠加作用也可能是造就个旧特大型矿床的原因, 更多关于成矿类型、成矿模式和成矿多样性的研究可参考文献(於崇文等, 1988; 秦德先等, 2004; 谈树成等, 2004; 夏庆霖等, 2007; Zhang *et al.*, 2008; 徐启东等, 2009). 本文将重点对本区的地球物理场和地球化学场的空间模式进行探讨. 从多重分形奇异性原理出发, 对比东西区致矿异常的广义自相似性, 从而圈定全区致矿异常并据此进行区域靶区预测.

## 1.2 GIS 数据集

本次矿产预测中涉及的主要数据有: (1) 地质图数据, 主要包括侵入岩(面要素) 图层、沉积岩(面要素) 图层、变质岩系(面要素) 地层、断裂(线要素) 图层、矿产(点要素, 研究区内 11 个锡矿床) 图层等. 比例尺为 1:20 万. 图 1 显示了个旧地区的简化地质图. (2) 化探数据, 1:20 万研究区内水系沉积物地球化学数据, 共有 1 000 个采样点, 等间距采样, 每 2 km×2 km 为一个数据点, 本次研究中用到了 Ag、As、Au、Cd、Co、Cu、Fe、Hg、Ni、Pb、Zn 以及 Sn 共 12 种元素, 采用了多重分形插值方法生成 2 km×2 km 的栅格数据. (3) 地球物理重力和航磁, 1:20 万和 1:50 万点位要素, 采用滑动平均方法生成 1 km×1 km 的栅格数据. (4) 遥感 ETM+ 数据, 遥感 ETM+ 图像, 30 m 空间分辨率.

## 1.3 信息处理方法与目的

**1.3.1 地球化学异常分析与圈定** (1) 单元素局部异常圈定. 采用多重分形奇异性分析方法形成与成矿密切相关的多元素化探异常分布图(如 Sn、As、Cu、Pb、Zn 及 Cd). 识别低弱异常和复合异常的空间模式, 对比东区和西区的成矿特征, 圈定本区可能的、新的成矿有利地段. 采用证据权法提供的空间相关性度量( $t$  值) 指标来确定最佳的奇异性指数阈值

以提取局部异常. (2) 组合元素异常圈定. 采用主成分分析方法综合局部异常(Sn、As、Cu、Pb、Zn 及 Cd) 绘制组合元素异常. (3) 复合异常分解. 根据变化背景和不同广义自相似原理分解复合与叠加异常.

**1.3.2 岩体与构造综合推断** (1) 根据地球化学组合元素异常推断岩体与构造. 采用主成分分析方法确定岩浆与构造地球化学元素异常组合. 圈定岩体包括隐伏岩体对成矿的影响范围. (2) 根据地球物理(重磁) 异常推断岩浆与构造. 通过地球物理数据处理确定岩体构造与地球化学组合元素. (3) 根据地球物理和地球化学综合异常推断岩体构造. 在获取岩体和构造地球物理和地球化学异常的基础上, 进一步采用主成分方法结合地球物理和地球化学异常圈定岩体和构造(包括隐伏岩体和构造) 的空间分布范围和对成矿的影响范围. (4) 综合地球化学与遥感图像推断岩体构造. 通过地球化学与遥感数据融合圈定岩体和构造(包括隐伏岩体和构造) 对成矿的影响范围.

**1.3.3 编制区域矿产资源分布概率图** 在确定有利成矿多元要素的基础上, 采用最新研究的证据权方法校正模型绘制区域成矿概率图, 为个旧地区进一步开展矿产勘查提供预测性靶区分布图.

本文将主要介绍地球化学异常的分析与圈定, 其他成果将在后续论文中详细介绍.

## 2 弱异常提取与靶区圈定

### 2.1 局部奇异性分析与局部异常圈定

地球化学异常的空间结构较全面地反映了异常的特征. 化探异常与其他类型地质异常相比, 除具有化学分析含量数值精度高外, 还能较连续地反映异常的多尺度空间变化模式. 因此, 对局部结构模式的定量化有助于理解异常的结构并提供异常识别的新线索. 基于多重分形理论所定义的奇异性指数  $\Delta\alpha$ (Cheng, 1999) 可以用来度量异常的局部标度性(scaling) 和奇异性(singularity). 由此而发展的局部奇异性分析方法可用于多尺度地球化学、地球物理和其他类型局部异常的圈定和奇异性程度的度量. 该方法的工作原理是根据场的尺度标度性将定义在某一小范围内的场值(通常为场密度,  $\langle \rho(\epsilon) \rangle$ ) 分解为两种组成部分( $\langle \rho(\epsilon) \rangle = c\epsilon^{\alpha-2} = c\epsilon^{-\Delta\alpha}$ ): 一是与度量尺度单位有关的密度成分( $c$ ) (如单位

$g/m^3$ ); 二是与度量尺度单位独立的标度成分  $\Delta\alpha$ , 前者具有密度的特征(如度量单位可以为  $g/cm^{1.5}$ ), 可称之为分形密度, 而后者中的指数  $\alpha$  对应分形空间维数. 因此, 局部奇异性分析方法实际上是将场的强度(或密度)在分形空间中进行度量, 以确定分形密度( $c$ )和分形维数( $\alpha$ ). 分形维数与正常的欧氏空间维数的差  $\Delta\alpha = 2 - \alpha$  (对于二维场)即可表示分形密度与正常密度的空间维数的差异. 如果  $\Delta\alpha$  不等于整数时, 密度可称之为分形密度, 在此情况下, 随着度量范围的缩小( $\epsilon \rightarrow 0$ ), 密度将变得无限大或者无限小, 比如如果密度属于分形密度而且  $\Delta\alpha = 2 - \alpha > 0$  时, 随着度量范围的缩小( $\epsilon \rightarrow 0$ ), 密度将变得无限大, 而且在该位置上出现不光滑、不稳定、不收敛等非线性奇异性特征; 当密度属于分形密度而且  $\Delta\alpha = 2 - \alpha < 0$  时, 随着度量范围的缩小( $\epsilon \rightarrow 0$ ), 场的密度将变得接近零, 在该位置上出现高阶导数不存在、不光滑、不稳定、不收敛等非线性奇异性特征; 只有当  $\Delta\alpha = 2 - \alpha \approx 0$  时, 密度与度量范围的大小无关. 从地球化学场的角度来说, 具有正奇异的地区( $\Delta\alpha > 0$ ) 对应于矿化作用或其他局部地质过程所引起的元素富集地区; 负奇异的地区( $\Delta\alpha < 0$ ) 则对应于元素亏损的地区; 无奇异的地区对应于背景场, 背景地段一般在地球化学图中占绝大部分范围 (Cheng, 1999). 如果分形密度维数(奇异性指数)在空间上是变化的, 这样的空间场称为服从多重分形分布. 由于成矿等作用可造成元素分布的高度富集而产生分形密度. 从空间统计观点来看, 在一个地球化学图上较均匀取样的大多数正常数据( $\Delta\alpha \approx 0$ ) 符合正态分布或对数正态分布, 小部分数据( $\Delta\alpha \neq 0$ , 两端截尾极高值和极低值)可能符合分形分布(成秋明, 2001; Cheng *et al.*, 1994). 由此可见, 采用局部奇异性方法与传统统计方法的最大区别在于, 奇异性分析方法所获取的信息是关于场的分形密度和多重分形维数的信息, 而传统统计学所度量的是正常的面积密度或非奇异性数据. 奇异性分析方法从一个新的角度刻画场的分布特征, 因此是一种全新的数据处理和信息获取方法.

本研究发现, 在东区已知矿体分布的地段地球化学异常强烈, 与此相比, 其他地区的地球化学异常被掩盖而显示不明显. 为了增强和突出局部异常, 我们采用 GeoDAS 提供的局部奇异性分析功能计算了 Sn、As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 等多种微量元素空间分布的局部奇异性指数, 编制了与锡、铜矿床分布相关的地球化学异常图. 结果表明, 应用局部奇异性分析

方法可突出局部异常, 避免由于背景场值高低对异常圈定的影响.

为了计算局部奇异性指数, 在地球化学图上以每一点为中心, 依次形成不同大小的方形窗口, 其窗口大小依次为( $\epsilon \times \epsilon$ ):  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ ,  $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ ,  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ ,  $14\text{ km} \times 14\text{ km}$ , ...,  $26\text{ km} \times 26\text{ km}$ . 计算每个窗口内的平均元素密度, 并在双对数图上绘制平均密度与窗口大小的关系图, 再对多个窗口所获得的数据进行最小二乘线性回归, 回归直线的斜率即可作为奇异性指数的估计值( $\Delta\alpha$ ). 软件还同时计算回归拟合标准差和相关系数. 将在每个采样点位上计算的局部奇异性指数进行作图即可形成局部奇异性指数图. 图 2a 为 As 局部奇异性指数分布图. 为了对比结果, 我们用最少 12 个样品点, 最大搜索窗口为  $26\text{ km} \times 26\text{ km}$  的距离反比方法, 对上述各元素原始含量数据进行了滑动平均, 其结果见图 2b. 从图 2b 中可见, 在已知矿床出露或矿山开采地区 As 的浓度值普遍显得较高, 表明这些异常可能与成矿作用有关; 而在西区, 异常值显示相对微弱, 难以被识别和圈定. 东区的特高地球化学背景强烈

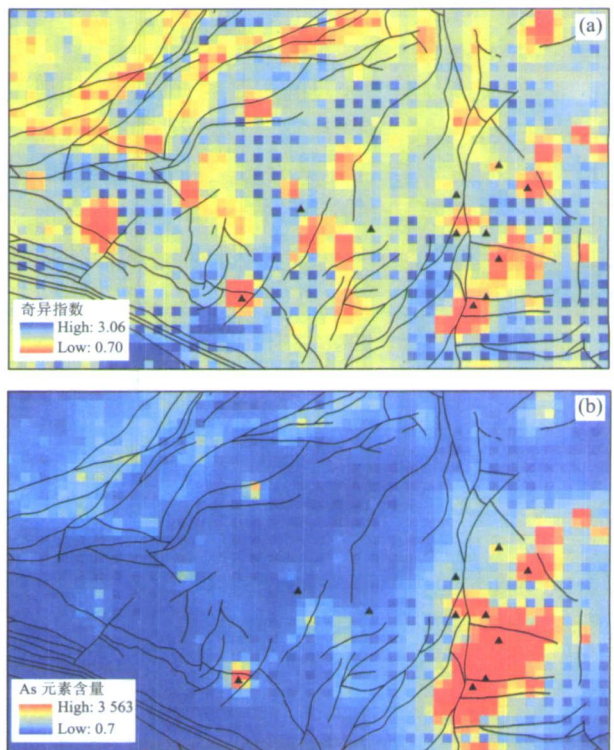


图 2 (a) 基于窗口方法估计 As 局部奇异性指数分布图; (b) As 地球化学原始数据图

Fig. 2 (a) Distribution of singularity obtained for As, (b) map of raw data of As

栅格像原空间分辨率为 2km. 三角符号表示锡矿床, 黑线条表示断层

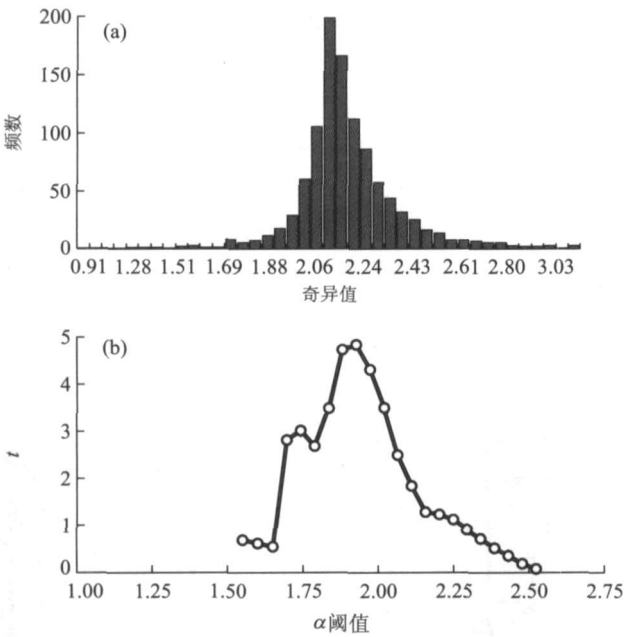


图 3 (a) As 的奇异值( $\alpha$ )与频数直方图; (b)  $\alpha$  阈值与  $t$  值的关系

Fig. 3 (a) Histogram of singularity index of As, (b) relationship between  $t$ -value and singularity index value  
划分不同  $\alpha$  阈值, 应用证据权法获取  $t$  值,  $t$  值大小反映了小于  $\alpha$  空间区域与锡矿床的空间相关性(Cheng and Agterberg, 2008)

地掩盖了西区可能存在的弱缓异常. 这也正说明了以含量值的高低来划分背景和异常的局限性. 从局部奇异性指数图上(图 2a)可以看出,  $\Delta\alpha > 0$  或者  $\alpha < 2$  的地区在空间上和锡矿床空间分布具有显著的相关性, 这说明  $\Delta\alpha > 0$  或者  $\alpha < 2$  可以反映元素含量的异常信息, 同时在西区也显示了多处异常. 图 3a 给出了 As 的奇异值( $\alpha$  值)频数直方图, 可以看出绝大多数  $\alpha$  值分布在 2 的附近, 反映了区域背景空间模式.  $\alpha$  值小于 2 的部分表示了元素富集地段, 用证据权法所提供的学生统计量( $t$  值)(学生分布值,  $t = C/S(C)$ )可以定量确定最优阈值, 采用该阈值可将  $\Delta\alpha$  值分为 2 个区间, 即与矿床分布有利和不利的区间. 证据权法(Bonham-Carter, 1994)不仅仅具有信息综合的功能, 在本项研究中我们应用它来定量度量  $\Delta\alpha < 2$  分布区域与已知矿床位置的空间相关性, 它提供了可供度量点一面空间相关关系显著性的指标  $t$  值,  $t$  值越大, 说明空间相关关系越强, 通常  $t > 1.96$  可以认为空间相关性具有统计显著性. 对  $\alpha$  值取不同的阈值进行二值化, 以已知锡矿床作为训练点集, 进行证据权法计算,  $\alpha$  阈值与  $t$  值的关系见图 3b,  $t$  值的大小反映了  $\alpha$  小于某一阈值的区域与锡矿床的空间相关性. 当  $\alpha$  值在 0.7 到

1.93 的区间上,  $t$  值随着  $\Delta\alpha$  的增大而增大, 当  $\alpha$  值在大于 1.93 的区间上,  $t$  值随着  $\alpha$  值的增大而减小, 空间相关性  $t$  值在  $\alpha = 1.93 < 2$  的时候达到极大值 ( $t = 4.84$ ). 因此, 我们认为  $\alpha = 1.93$  是最优的阈值,  $\alpha$  值小于 1.93 的区域与已知 11 个锡矿床具有最显著的空间相关性. 图 4 中给出了局部奇异性方法和传统统计方法所圈定的异常的对比如. 可以看出, 虽然, 奇异性分析方法与传统的基于原始元素含量的方法作确定的异常均与已知矿床的空间分布相关, 但是奇异性方法所获得的结果不仅在已知矿区与矿床分布相关, 而且在未知区也圈定了较好的异常, 因此更具有预测性.

### 2.2 局部奇异性分析与组合局部异常圈定

为了采用 Sn、As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 元素数据来圈定综合异常, 我们对这些元素的奇异值( $\alpha$  值)进行了主成分分析(图 5). 6 个主成分的特征值以第一主成分为最大, 约占方差的 60%. 结果表明, 第一主成分由 Sn、As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 元素组成, 该组合

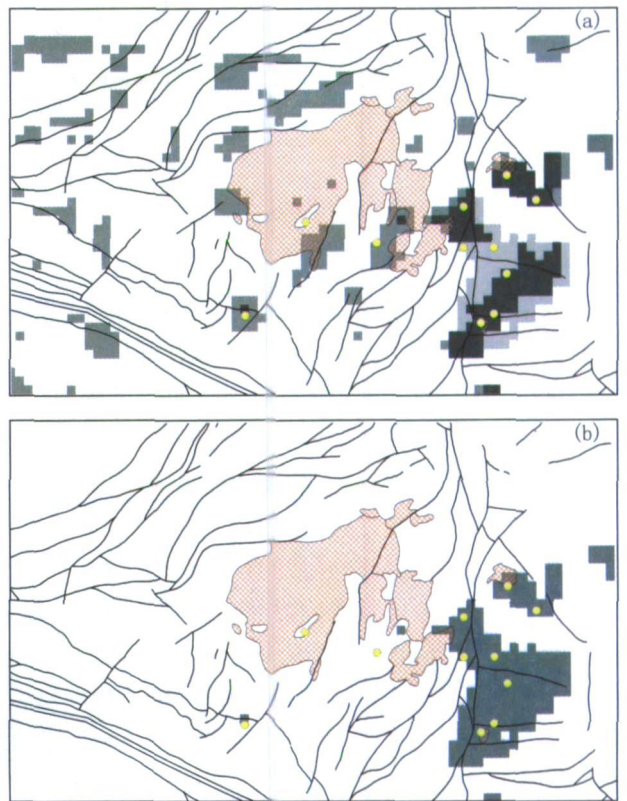


图 4 (a) 采用局部奇异性方法圈定的 As 异常区; (b) 采用传统的统计方法圈定的异常区

Fig. 4 (a) Anomalies delineated using singularity method, (b) anomalies delineated using traditional statistical method  
图中黄色圆点表示锡矿分布位置, 黑线条表示断层, 格子模式的多边形表示岩体, 黑色区域为确定的异常区

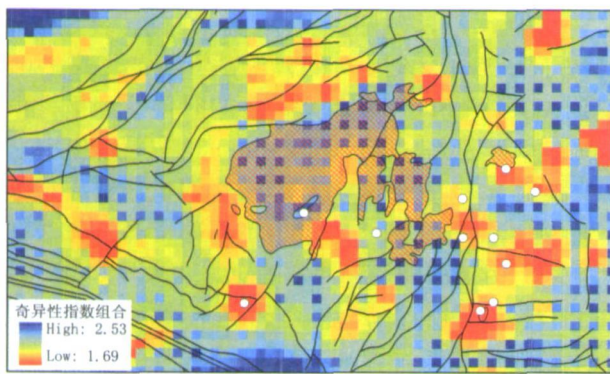


图 5 对 Sn、As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 元素奇异值 ( $\alpha$  值) 进行主成分分析结果

Fig. 5 Principal component analysis of singularity of Sn, As, Cu, Pb, Zn and Cd

第一主成分中的得分图—组合异常分布图。圆点符号表示锡矿床，黑线条表示断层

构成的综合局部奇异性图(因子得分图)清晰地反映了个旧地区的局部奇异性空间异常模式,不仅在东区已知矿区反映明显,而且在西区的低弱异常范围也反映明显。在空间上这些异常围绕个旧岩体展布,与断裂交汇关系密切,可能是矿致异常,找矿意义有待于进一步的查证。

### 3 复合异常分解与圈定

成矿作用所引起的异常模式与区域地质作用所造成的异常模式会有诸多不同,比如可以表现在异常的强度、异常的几何形态、频率分布等的差别,此外,近年来随着非线性分形理论的应用,人们发现不同的地质过程所产生的异常模式还会表现为不同的尺度标度性、异向性、广义自相似性等差异(成秋明, 2007)。合理地定量刻画异常的这些性质无疑会对异常识别有所帮助。这里我们要介绍的异常分解方法,就是基于广义自相似性原理而发展的分解复合和叠加异常的分形方法,该方法的基本原理是在能谱空间中确定地球化学背景和异常所对应的不同自相似性,从而复合和叠加地球化学背景和异常并进行分解。该方法也称之为“能谱分析”或“S-A”方法(Cheng, 1999, 2004b; 成秋明, 2001)。这里举地球化学异常与背景分解为例来说方法原理,造成地球化学异常和背景场的地质过程是不同的,而地球化学测量的结果反映的只是背景和异常的叠加和复合的结果。由于受到各种因素的影响,异常和背景混合结果往往表现为多样性和复杂性,因此直接采用地

球化学数据来区分异常和背景是困难的。然而,从地球化学场的频率能谱分布来看,背景和异常也许表现出不同的自相似性规律,因此可以在频率域中对异常和背景的能谱进行分解,进而通过逆变换将分解的能谱信息返回到空间域,重新组合成分解的异常和背景场。具体来说,这个方法可将地球化学图从空间域经过傅里叶变换转换到频率域,在频率域中基于广义自相似性构建分形滤波器,最后将经过分形滤波后的信息经逆傅里叶变换转换回到空间域,从而得到被分解后的背景图和异常图。异常 S-A 方法可以对地球化学数据所展现的广义标度不变性及空间模式的各向异性标度特征进行定量化刻画。它不仅能对由不同埋深的地质体引起的各向同性的异常,如各种地球物理位场进行分离,而且也能对由更加复杂的地质过程所引起的各向异性的异常进行分离。例如,能分离由矿化作用引起的局部地球化学异常与区域地质作用造成的背景场。由于个旧东西区不仅遭受了不同的构造—岩浆作用,而且受到不同程度地表露头矿和矿山开采的影响,背景和异常往往表现为复合和叠加特点,东区异常强度较西区强烈,西区异常相对微弱,因此应用传统的统计分析方法对异常和背景分离很难获得满意的效果。这里我们采用 S-A 广义自相似分形方法对东西区地球化学异常进行分解和圈定。

首先采用主成分分析方法对 Sn、As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 元素原始数据进行分析,考虑到元素分布的多重分形特点,在进行主成分分析之前先对原始数据进行了对数变换。图 6 中分别给出了主成分分析所计算的特征值分布图(6a)和第一主成分的载荷图(6b)。可以看出,第一主成分反映了所有 5 种元素的共同贡献。图 7a 中给出了第一主成分的得分图。结果显示,第一主成分反映了与锡、铜相关的元素组合。较强的组合异常分布在东区并且与已知矿床的分布吻合较好,说明该元素组合异常与矿床分布有关,同时还可能还受到出露地表或近地表矿体的影响以及矿山开采的影响(Cheng and Agterberg, 2008)。而西区组合异常强度相比东区较低,在主成分得分图上反映不明显。这可能与组合元素背景值较低以及地表介质中受其他次生污染作用影响有关。虽然东西区的组合元素异常分布强度具有较大差异,两区域的组合元素异常还有无相似之处?是否存在内在的可比性?是东西两区地球化学异常完全不同还是表现形式上异常多样性(成矿多样性)?这是我们感兴趣的问题。虽然分布在东西两区域的组合元素异常貌似不同,但它

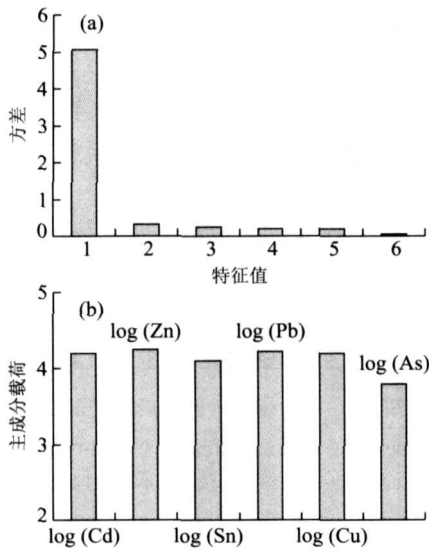


图 6 对元素 Sn, As, Cu, Pb, Zn 和 Cd 的对数变换值进行主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of log-transformed values of Sn, As, Cu, Pb, Zn and Cd

a. 特征值分布, b. 第一主成分中的载荷, 即各元素对第一主成分

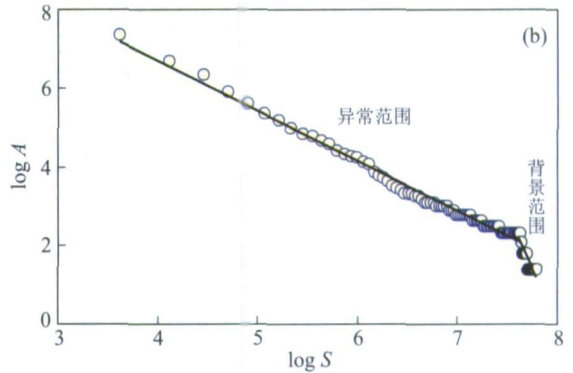
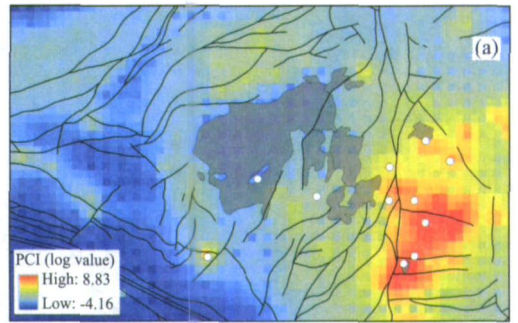


图 7 (a) Sn, As, Cu, Pb, Zn 和 Cd 元素对数变换后获得的第一主成分载荷图; (b) 第一主成分中载荷的 S-A 曲线图

Fig. 7 (a) Score map on the first principal component, (b) S-A plot

分界点对应能谱  $S = 1919$ . 图 b 中直线表示异常呈分形分布, 右边为背景分布. 分界点由计算机自动生成

们是否存在广义自相似性? 即在其他空间中是否具有自相似性? 这里我们将采用 S-A 异常分解方法对全区的组合异常分布进行广义自相似性检验, 在频率域中寻找全区地球化学组合异常的自相似性. 以此为依据对东西区地球化学异常进行对比分析.

应用 S-A 方法, 首先通过傅里叶变换将组合元素异常图(图 7a) 转换到频率域, 分别形成相(phase)分布图和能谱(power-spectrum)分布图, 然后在双对数图上绘制能谱密度(S)与累计面积的关系图, 结果见图 7b. 能谱密度(S)与累计面积( $A(\geq S)$ )的关系可以用二条直线段进行最小二乘法拟合, 从而形成能谱密度 S 的 2 个取值区间, 这 2 个取值区间以阈值  $S = 1919$  所分开. 在第一取值区间内能谱密度与面积的关系为:  $\log [A(\geq S)] = 11.77S^{-1.27}$ , 拟合结果的标准误差仅为 0.01. 在第二取值区间内能谱密度与面积的关系为:  $\log [A(\geq S)] = 43.1S^{-5.4}$ , 拟合结果的标准误差为 0.015. 采用以上两个取值区间可以构造出两个滤波器: 一个是能谱密度小于 1919 的能谱范围, 称为异常滤波器; 另一个是能谱密度大于 1919 的能谱范围称为背景滤波器(Cheng, 1999). 这两个滤波器的形状是不规则的, 它们保持了所对应地球化学场的各向异性和在二维能谱空间中的内部结构. 由于在每个滤波器所对应的能谱区间内, 能谱密度和面积

都服从幂率分布(分形分布), 也就是说, 在这两区间中能谱密度分布分别具有自相似性, 而且由于他们所对应的幂指数的显著差别(-1.27 与 -5.4), 可以认为能谱分布具有完全不同的自相似性. 可以根据这种差异对地球化学场进行分解.

采用以上定义的正常与背景滤波器可将原始地球化学图分解成背景图与异常图(图 8a 和 8b). 所分解的背景图(图 8a) 基本反映了东西两区的差异, 如以个旧岩体为中心将东西分为两个北东向展布的背景区域. 东区高背景区中心与东区矿床分布集中区相吻合. 产生这一背景差异的其他原因还有待于进一步研究. 在消除这一背景差异影响的基础上所得到的剩余异常(图 8b) 不仅在东区缩小了异常范围, 而且在西区增强了局部异常的强度, 局部异常分布更显清晰. 将锡矿以及其他相关控矿地质要素如岩体和构造叠加到异常图上, 我们可以清晰地看到个旧岩体东西两区均有较好的异常显示. 东区异常分布与已有的主要矿床分布相吻合, 西区局部异常则主要沿岩体周围分布并受到多组构造交汇点的影响. 回到 S-A 关系图上我们可以看出, 去除背景和污染的干扰后, 东西区



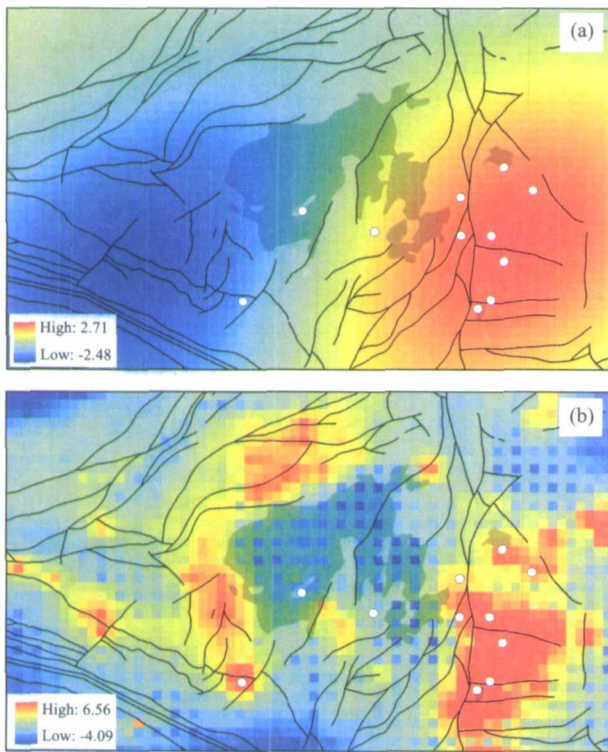


图 8 (a) 分解第一主成分载荷背景场; (b) 分解第一主成分载荷异常场

Fig. 8 (a) Background values of scores on the first principal component, (b) anomalies of scores on the first principal component

黑线表示断裂构造

异常在频率谱分布上具有较强的自相似性,在双对数能谱分布上呈直线(图 7b),说明分布在东西区的大小不同的局部异常在频率域中具有自相似性,属同一分形分布,表明可能属相似过程的产物。这也说明,与矿有关的地球化学异常在东西区呈异常多样性,然而,它们在频率分布、能谱分布、组合元素分布等谱系方面表现出一致性。由于这些异常与已知矿床的分布以及控矿要素的空间相关性显著,可以推断这些异常反映了本地区矿致异常。该结果不仅为对比东西区地球化学异常提供了有益的信息,为圈定致矿异常和找矿靶区奠定了基础,也从地球化学元素分布角度定量反映了该研究区的成矿多样性和成矿谱系的基本特征。这些表现形式上呈多样性,谱系上呈相似性的现象可称之为具有广义自相似性(Cheng, 2007a, 2007b)。我们研究发现,不同地质过程所产生的空间模式往往具有不同的广义自相似性,因此可以根据不同的广义自相似性来分解不同过程所产生的异常,这就是  $S-A$  方法的工作原理(Cheng *et al.*, 1994; 成秋明, 2001)。从该方法原理可以看出,东西区所圈定的

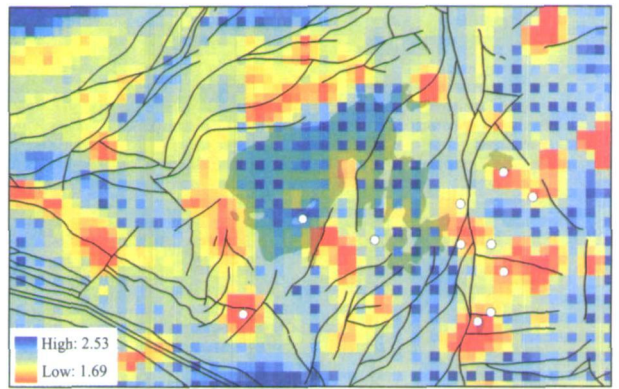


图 9 对图 8b 中异常增加常数 5 后求局部奇异性指数  
Fig. 9 Singularity obtained from anomalies of fig. 8b plus 5  
窗口半径为 23 km; 黑线表示断裂构造

异常均具有成矿指示意义,可以作为找矿要素对待,尤其东区以外所圈出的异常尚待进一步勘查。

为了细化局部异常,我们进一步对异常图 8b 进行了局部奇异性分析,首先对该异常图进行了非负数据变换,如对整个图的像原值增加了一个常数 5,这样整个异常图均只有正数,由于所加的只是不大的常数,这样做不会改变异常的局部奇异性。对变换后的异常图进行局部奇异性分析,采用窗口大小为  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ ,  $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ ,  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ ,  $14\text{ km} \times 14\text{ km}$ ,  $18\text{ km} \times 18\text{ km}$  的一系列正方形窗口计算奇异性指数。图 9 给出了局部奇异性指数分布图。尽管计算过程是不同的,图 9 与图 5 中的结果很近似。图 5 的结果是先对每一个元素求局部奇异性指数,然后再对所求得的多元素奇异性指数进行主成分分析所得到的第一主成分得分。而图 9 的结果是先对多元素进行主成分分析,得到第一主成分,然后采用  $S-A$  方法去除区域背景的基础上再对异常进行局部奇异性指数的计算。由于,局部奇异性指数相对区域背景场的反映不敏感,因此,这两种处理方法所得到的结果是可比的。

## 4 结论与建议

本文研究了如何利用非线性理论和方法开展个旧地区勘查地球化学数据处理和致矿异常圈定,重点介绍了局部奇异性分析方法和广义自相似分析方法的应用。首先计算了多种微量元素地球化学图的空间局部奇异性指数,进而采用广义自相似原理和方法分解了复合组合异常,在个旧东区和西区都圈出了致矿局部异常,为个旧地区东西区进一步找矿

勘查工作提供了一定依据。以致矿地质异常为研究对象, 采用基于多重分形的“局部奇异性、广义自相似性、分形谱系”非线性矿产资源定量预测原理和模型, 在 GeoDAS 专业 GIS 环境下对个旧岩体周边进行了成矿定量预测。在对区域地质、地球物理、地球化学、遥感数据的信息提取的基础上, 突出了弱异常的识别、复合异常的分解和空间信息的综合等关键技术的研究与应用。分别采用 GeoDAS 软件所提供的局部奇异性弱异常圈定方法和  $S-A$  广义自相似性异常分解方法, 结合空间主成分方法圈定了微量元素 Sn、As、Cu、Cd、Pb、Zn 等组合异常。异常不仅清楚地反映了与已知矿床分布的空间关系, 而且在未知区均圈定了多处组合异常, 虽然这些异常在不同的位置具有各自的特点和多样性, 如异常强度高、范围大小各异等, 但在频率域中表现了自相似性, 在元素含量密度与空间分布上均呈现分形密度特点。换句话说, 在地球化学图上貌似各异的异常在频率域内可以显示自相似性和可比性。所圈定的异常的规模(强度、范围、大小等)与异常的个数具有多重分形特征, 这种特征可以采用分形维数谱函数来表达。

从非线性理论角度看, 成矿过程可以看作是一种奇异性地质过程, 奇异性过程可以导致在很小的时间或者空间范围内能量的巨量释放或者物质的超常堆积和富集。奇异性过程中所产生的结果如矿床、成矿异常等具有分形和多重分形分布规律, 可以采用幂率(power-law)函数来度量。

从矿产资源勘查与评价方法与理论上来说, 本研究从地球化学角度定量刻画了“地质异常”与“奇异性”、“成矿多样性”与“广义自相似性”, “矿床谱系”与“多重分形谱系”之间的内在关联性。再次说明, 将多重分形非线性理论与“三联式”成矿预测理论相结合, 为从“求异”的角度定量识别弱异常、从多样性和自相似性角度分解复合和叠加异常、从谱系角度关联和评价异常提供了有效的实用方法、技术。尽管文中主要采用了地球化学数据, 该理论和方法同样可应用于对地球物理、地质和遥感等各种地学空间数据的处理。

综上所述, 非线性理论和 GIS 技术为矿产资源定量预测提供了新的思路和方法(Zhao *et al.*, 2008), 对地学信息提取和综合具有独到之处, 值得进一步研究和发展。

## References

- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Oxford, 398.
- Cheng, Q. M., 1999. Multifractality and spatial statistics. *Computer & Geosciences*, 25(9): 949–961.
- Cheng, Q. M., 2000. GeoData analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: User's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDAS held at York University, Nov. 1 to 3, 2000. 204. [www.gis-world.org/geodat](http://www.gis-world.org/geodat).
- Cheng, Q. M., 2001. Multifractal and geostatistic methods for characterizing local structure and singularity properties of exploration geochemical anomalies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 161–166 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004a. Quantifying the generalized self-similarity of spatial patterns for mineral resources assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 733–744 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004b. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*, 36(3): 345–360.
- Cheng, Q. M., 2007a. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 314–324.
- Cheng, Q. M., 2007b. Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, Fourier frequency and Eigen domains. *Nonlin. Processes Geophys.*, 14: 293–303.
- Cheng, Q. M., 2007c. Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: New theories and methods. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, DOI 10.1007/s11004-008-9172-6.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 2008. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments. *Computers & Geosciences*, DOI: 10.1016/j.cageo.2008.02.034.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109–130.
- Cheng, Q. M., Xu, Y. G., Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly sep-

- aration. *Natural Resources Research*, 9(1): 43–51.
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Zhang, S. Y., et al., 2009. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Information integration and delineation of mineral exploration targets. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 243–252 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., 2004. Study on the metallogenic conditions and the ore-hunting prospect for the western district of Gejiu tin mine, Yunnan Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 57–61 (in Chinese with English abstract).
- Qin, D. X., Tan, S. C., Fan, Z. G., et al., 2004. Geotectonic evolution and tin-polymetallic metallogenesis in Gejiu-Dachang area. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 117–123 (in Chinese with English abstract).
- Southwestern Metallurgy Exploration Company of the Ministry of Metallurgy Industry, 1984. *Geology of Gejiu mineral district*. Metallurgy Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Tan, S. C., Qin, D. X., Chen, A. B., et al., 2004. Regional crust evolution and metallogenesis of Gejiu tin deposit—A discussion. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., 2004. *Essentials of tectonics in China*. Geological Publishing House, Beijing, 75–271 (in Chinese).
- Xia, Q. L., Zhang, S. T., Chen, S. Y., et al., 2007. The key problems for deep mineral potential assessment in Gejiu tin deposit, Yunnan, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(Suppl.): 530–531 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Xia, Q. L., Cheng, Q. M., 2009. Tectono-magmatic evolution related to metallogenic system in Gejiu ore-concentration area, Southeast Yunnan of China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 307–313 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., Tang, Y. J., Shi, P. F., et al., 1988. *Dynamic system of Gejiu polymetallic mineralization processes*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 394 (in Chinese).
- Zeng, Y. F., Liu, W. J., Chen, H. D., et al., 1995. Evolution of sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, South China. *Acta Geologica Sinica*, 69(2): 113–124 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. T., Xia, Q. L., Zhao, P. D., et al., 2008. Diversity of mineralization and spectrum of the Gejiu superlarge tin-copper polymetallic deposit, Yunnan, China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 363–370.
- Zhao, P. D., 2002. “Three-component” quantitative resource prediction and assessment: Theory and practice of digital mineral prospecting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482–486 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Cheng, Q. M., Xia, Q. L., 2008. Quantitative prediction for deep mineral exploration. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 309–318.
- Zhuang, Y. Q., Wang, R. Z., Yang, S. P., et al., 1996. *Sn and Cu polymetallic mineral deposits in Gejiu*. Seismic Publishing House, Beijing, 124.

### 附中文参考文献

- 成秋明, 2001. 多重分形与地质统计学方法用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(2): 161–166.
- 成秋明, 2004a. 空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(6): 733–744.
- 成秋明, 2007c. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法. *地学前缘*, 14(5): 42–53.
- 成秋明, 赵鹏大, 张生元, 等, 2009. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 综合信息集成与靶区圈定. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(2): 243–252.
- 卢耀, 2004. 云南个旧矿区西区成矿条件及找矿远景探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 57–61.
- 秦德先, 谈树成, 范柱国, 等, 2004. 个旧—大厂地区地质构造演化及锡多金属成矿. *矿物学报*, 24(2): 117–123.
- 谈树成, 秦德先, 陈爱兵, 等, 2004. 个旧锡矿区域地壳演化与成矿探讨. *矿物学报*, 24(2): 157–163.
- 万天丰, 2004. *中国大地构造学纲要*. 北京: 地质出版社, 75–271.
- 夏庆霖, 张寿庭, 陈守余, 等, 2007. 云南个旧锡矿深部资源潜力评价的几个关键问题. *矿物学报*, 27(增刊): 530–531.
- 徐启东, 夏庆霖, 成秋明, 2009. 云南个旧矿集区区域构造—岩浆演化与锡铜多金属成矿系统. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(2): 307–313.
- 冶金工业部西南冶金地质勘探公司. 个旧锡矿地质. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- 於崇文, 唐元骏, 石平方, 等, 1988. 云南个旧锡多金属成矿区内生成矿作用的动力学体系. 武汉: 中国地质大学出版社, 394.
- 曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 等, 1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化. *地质学报*, 69(2): 113–124.
- 赵鹏大, 2002. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 482–489.
- 庄永秋, 王任重, 杨树培, 等, 1996. *云南个旧锡铜多金属矿床*. 北京: 地震出版社, 124.