

查明地质异常: 成矿预测的基础

赵鹏大 池顺都 陈永清

(中国地质大学, 武汉)

摘要 与成矿有关的条件都表现为地质演化过程中的地质异常事件。与成矿有关的地质异常都是“成矿可能地段”, 可能找到预期类型矿床的地质异常或异常带可以称为“找矿可行地段”, 而其中有更多的直接和间接找矿信息的部位则称之为“找矿有利地段”。地质异常在不同尺度水平上具有自相似性, 在空间上具有复杂的成因机制——混沌动力学机制, 在表现形式上, 包含显式和隐式两大类型的地质体或地质体组合。它们与成矿的关系是内在的成因联系和(或)空间联系。研究地质异常需要划分地质背景场, 采用适当方法, 根据一定准则圈定地质异常。文章指出了不同尺度地质异常圈定的不同特点, GIS、GPS、RS 等高新技术是研究和圈定地质异常的重要工具, 分形理论、自组织理论和混沌理论有助于从形态(几何)、过程和机理的角度探索地质异常的存在、发生和发展的复杂性; 指出了地质异常与物化探异常间存在着套合和耦合两种关系; 探讨了地质、地球物理、地球化学综合异常与成矿预测的关系; 最后介绍了地质异常图与成矿远景区预测图的编制。

关键词 地质异常 成矿预测 非线性理论 GIS GPS RS 地质异常图

1 成矿可能地段、找矿可行地段及找矿有利地段

矿床是有用元素或矿物在现今技术经济条件下达到可开采利用并获利的自然富集的地质体。一般认为, 矿床的形成必须是(有): ① 矿源、热源和水源的有机组合和匹配; ② 导矿、散矿、运矿通道的组合与匹配; ③ 赋矿、聚矿、成矿的空间场所和充分时间; ④ 导致矿质沉淀的失衡、失稳、失常的物理化学和生物环境; ⑤ 导致矿床形成的富集—耗散—富集的过程。

所有上述与成矿有关的条件, 都表现为地质演化过程中的地质异常事件, 在地壳范围内应是一种特殊的地质异常空间; 反言之, 通过各种方法和途径圈定出的与成矿有关的地质异常或所谓“致矿地质异常”, 都是“成矿可能地段”, 即具备了成矿的可能性。

各种成矿地质因素及其组合具有一定的成矿“专属性”, 而不同矿种类型、成因类型、工业类型和形态类型的矿床对地质条件及其组合又具有一定的“选择性”。因此, 在一个地区进行找矿必须根据所要找寻的矿种和矿床类型, 在众多的可能成矿的地质异常中确定哪些异常或异常带是有可能找到预期类型矿床的, 这些地区可以称为“找矿可行地段”。进而结合更多的直接

本文1996年10月收到

第一作者简介: 赵鹏大, 男, 64岁, 中国科学院院士, 中国地质大学校长, 教授, 著名的成矿预测及数学地质学家。通讯地址: 武汉市武昌喻家山中国地质大学; 邮政编码: 430074。

和间接的找矿信息,如物化探异常、典型围岩蚀变及矿化显示等,确定更有希望找到预期类型矿床的部位,这些部位则称之为“找矿有利地段”。综上所述,可以如图1所示。

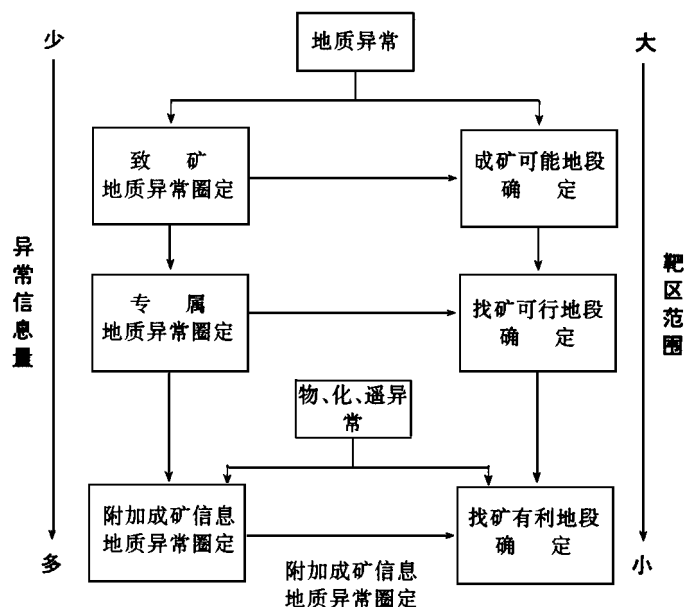


图1 地质异常研究流程框图

Fig. 1 A procedure chart of geo-anomaly study

由图1可见,随着地质异常研究的逐步深入,异常成矿信息量逐步增加,找矿靶区范围逐步缩小,找矿成功概率逐步加大。所以,查明地质异常是成矿预测的基础、找矿的前提、选靶的依据。例如,在滇中寻找铜矿床,昆阳裂谷地质异常区就是“成矿可能地段”;对于特殊的矿床类型,如“大红山式”铁、铜矿床,则只产于昆阳裂谷的特定剖面层位(时段)中。这时,在昆阳裂谷内有曼岗河组中上部层位赋存的地段,在有强烈火山活动的地区则是“找矿的可行地段”;再加上磁力异常、电法测量找矿信息——高极化率和低电阻率异常和Cu、Co、Ni等元素的化探异常诸多信息,可以确定“找矿的有利地段”。

2 地质背景场的划分与地质异常的圈定

A. H. 布加耶茨(1973)等提出:“最重要的矿床赋存于地壳中具有最大异常地质结构性质组合的地段,因此,对象的‘异常’组合应该是最有远景的”。

Д. А. 加利列夫(1982)指出:“大多数重要的工业矿床与相邻地区相比具有特殊和异常的地质特征相关联”,他用重力和磁法数据建立了8种不同的确定“非典型”地段的量度,方法是通过作直方图或变化曲线,对每种物探数据的“典型性”进行表征,具有最大频率的区间被定义为最典型区间,而其他区间的值则视为“特殊的”或“非典型的”;这种典型的和特殊的区间就用来描述每一个单元的“典型性”(typicality),并用“非典型指数”来表征每一个单元。

De Vrele P. Harris等(1990)^[8]则提出通过增加地学信息的途径,在相对一致的地质地段划分出更小的不均一地段。这些小块地段彼此互异,但其内部则相对均一。他们将这类地段称之为“信息带”。Harris等所依据的“相对特殊原则”与加利列夫的“特殊性分析”是一致的,只是

在方法上做了一些改进,即不仅是利用物探资料,同时还将地质、物探及化探资料相联系,作更综合的分析;而且考虑了变量之间的相关性,采用因子得分代替原始变量作直方图,用标准化的因子得分的变异性反映地质地段的非均质性。因此,“信息带”的圈定是以正交的综合信息为基础,并对每个变量依其与矿化的密切程度而加权后进行的。

D. A. Singer 等(1993)^[9]在美国地质调查所提出的“三部式”矿产资源定量评价,其中提出了圈定“找矿可行地段”的概念并与“找矿有利地段”相区别。

上述工作,可以说与笔者提出的地质异常有某些相似之处,但笔者所指的地质异常是在不同尺度水平上具有自相似性,在空间上具有复杂的成因机制——混沌动力学机制,在表现形式上,包含显式和隐式两大类型地质体或地质体组合。他们与成矿的关系是内在的成因联系和(或)空间联系,因而,地质异常理论不是简单的一种工作方法或圈定技术。它们的对象是“地质异常体”,具有潜在工业价值的矿化地质异常体可称为“矿产资源体”,具有现行工业价值的地质异常体便是“矿体”。可见矿体是地质异常体的一种特例。

从地质异常理论出发,为了查明研究区内不同地质环境和不同地质作用的空间分布,需要划分地质背景场。例如,在陕西南部的勉略宁地区,根据地质环境和地质作用的特点,将本区划分为4种不同类型的一级地质背景场;在一级地质背景场内,又进一步划分出二级地质背景场20个。一级地质背景场以较大的断裂为界,场的划分主要有如下标志:①地层组合及岩系特征;②复式褶皱及断裂束的特征;③岩浆杂岩体特征;④矿床成矿系列或成矿亚系列特征;⑤磁场等地球物理场的异常群特征;⑥地球化学异常群特征;⑦岩石的蚀变特征;⑧遥感影像特征;⑨成矿时代。二级地质背景场的划分标志与一级地质背景场的划分标志相类似,也是这9个方面,然而,标志的尺度水平却是不一样的,例如,岩浆岩为岩体,不是岩浆杂岩体;物化探异常特征一级地质背景场以异常群的特征为主,二级地质背景场则以异常为主;矿产特征,前者为成矿系列或亚系列尺度,后者则是矿床尺度等等。

熵在地质异常圈定中具有特殊意义。在热力学中,熵是用于判别孤立体系中过程进行的方向和体系是否处于平衡状态的一个状态函数。根据熵增加原理:“在孤立体系中,自动(自发)过程,即不可逆过程,向着熵增加的方向进行”。统计热力学认为,在无外界影响的条件下,自然过程总是自发地由规则状态趋于混乱状态,处于平衡状态时的体系混乱度最大。在信息论中,熵则是度量信息量大小的指标,它也反映事件发生的不确定度。在研究地质体数学特征及地质异常时,熵是地质空间非均质性的度量,是隐式地质异常圈定的重要工具,其表达式为:

$$100Hr = \frac{-100 \sum P_i \ln P_i}{H_m}$$

式中: P_i 为 N 元系统中,第 i 元素出现的概率; H_m 为最大可能熵:

$$H_m = \ln N$$

笔者在这方面已作过相当多的研究。图2所示宁芜盆地中段不同岩性空间组合特征的熵等值线图^[1],其结构特征,可区分为:①岩性极不均一地段,表现为多种岩性组合,且无占主导地位的岩性,熵值 $Hr > 60\%$;②岩性较不均一地段,表现为多种岩性组合,但有占主导地位的岩性, $Hr = 40 \sim 60\%$;③岩性较均一地段,表现为少量岩性组合,但无占主导地位的岩性, $Hr = 20 \sim 40\%$;④岩性极均一地段,表现为少量岩性组合,且有占主导地位的岩性或为单一岩性发育地段,熵值 $Hr = 0 \sim 20\%$ 。从图中可以看出,铁矿床,特别是大、中型的铁矿床,多数分布在岩性较不均一或极不均一的地区。“岩性分布均一性”这个隐式的地质异常,若不借助于

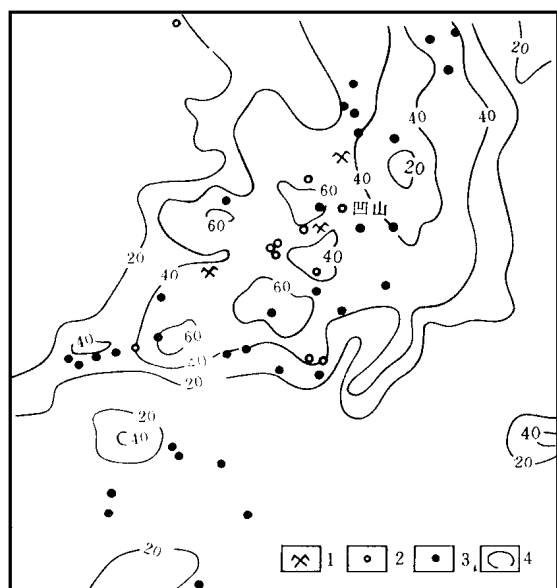


图2 岩性组合特征的熵等值线图

1. 大型铁矿床; 2. 中型铁矿床;
3. 小型铁矿床及矿点; 4. 岩性组合特征值

Fig. 2 An entropy isogram of rock assemblage

- 1- large Fe deposit; 2- medium Fe deposit;
3- small Fe deposit; 4- entropy contour
lines of rock assemblage.

熵,就很难圈定。类似地,笔者在宁芜地区还研究了围岩蚀变熵。

从不同的尺度水平进行考察,地质异常可分为:全球性地质异常、区域性地质异常、局部性地质异常和显微地质异常。不同尺度水平地质异常的圈定各有其特点。

全球性地质异常是与地球垂向的圈层构造和横向的地壳类型变化相联系的,是地壳圈层结构的异常。该尺度水平的地质异常是深层和全球范围的,研究的对象是巨大的地球块体。各块体边缘地质构造的空间分布、地球动力学特点及其时间上的演化历史是研究的重要内容。地质异常的圈定往往要借助于全球构造剖面的资料,其中包括重力异常、深源地震测量异常等。此外,洲际性的元素丰度异常、航天遥感影象中的特大型异常、全球性古地磁测量资料等等均起重要的作用。

区域性地质异常本身也具有不同的尺度水平,它决定于地质构造单元的级次划分。产生在岩石圈内的异常地质现象和地质事件是这一尺度水平研究的主要任务。区域性地质异常是控制自跨省区的成矿带、成矿省至成矿区的

分布,研究比例尺一般在 $1:400$ 万至 $1:50$ 万。构造-岩浆杂岩体、含矿岩石的建造组合、巨大的地块、深切的岩石圈断裂和地壳断裂、火山岩带和各种拗陷是圈定区域性地质异常的基本单元。在圈定地质异常时,航天遥感图象、区域物化探测量资料是重要的辅助资料。

局部性地质异常是控制成矿区内矿田、矿床和矿体产出的地质异常。一般来说,局部性地质异常体是提供成矿物质富集和就位的空间场所或通道。局部性地质异常所研究的是地球表层的地质现象和地质事件,研究比例尺一般在 $1:20$ 万至 $1:4$ 万。在圈定局部地质异常时,地层组段、侵入岩体或岩带、壳下和壳内的断裂构造、各类火山机构、各类褶皱构造等等是其基本单元;航空和航天遥感图象及物化探资料对地质异常的圈定有辅助作用。

显微地质异常是在岩石、矿物集合体、矿物、矿物内的包裹体这样的层次上所反映出的地质异常。在找矿意义上,它是矿物(包括矿石和岩石)形成环境的反映,成为矿床或矿体空间定位的指示物。显微地质异常包括矿物标型特征异常、矿物物理性质异常、围岩蚀变异常、矿物包裹体异常、矿物共生组合异常及岩石物理性质异常等。从预测找矿出发,研究显微地质异常的目的主要是为了矿床(体)的定位预测,对它的研究是建立矿床(体)预测-找矿模型的基础,其研究比例尺与矿床预测-找矿模型的比例尺相似,一般采用 $1:2000 \sim 1:5000$ 。

3 高新技术及非线性理论与地质异常圈定

3.1 GIS、GPS、RS 技术及地质异常的圈定

3.1.1 GIS 技术与地质异常圈定

地质异常分析,从本质上讲是个空间分析问题。而地理信息系统(GIS)正是处理空间数据的强有力工具,它能以很高的速度处理空间数据和各种特征信息,并把不同类型的数据合成为一种单个的分析。对于地质异常的定量研究,毫无疑问,GIS 是一种理想的工具。在滇中昆阳群中的铜成矿区和陕甘南秦岭泥盆系中的铅锌成矿区,进行了在总结经验基础上的地质异常研究,并对矿产的经验预测和成矿远景区圈定的 GIS 途径作了一些探索,初步研究已充分地证实了应用 GIS 研究地质异常的有效性。

在 GIS 支持下,用经验的方法确定地质异常的基本原理可以这样表述:在一定的预测尺度水平上,不同地质体或同一地质体某数值特征的不同区间,其找矿有利度与同一尺度水平的成矿单元在各地质体或各数值区间内出现的概率或频率成正比。成矿单元高概(频)率出现的地质体或数值区间,即是出现该矿种的地质异常区,为成矿可能地段。两种或两种以上地质体的组合,可以形成组合地质异常,组合地质异常区往往是找矿可行地段,而找矿有利地段,实质上就是多因素的地、物、化、遥组合异常区。

应用 GIS 技术,可进行如下研究:① 线型地质异常分析可确定地质异常区,面型地质异常可进行找矿有利度分析,通过上述分析,筛选出对成矿关系最密切的地质异常;② 组合异常的成矿有利度分析,其中包括线异常与面异常的组合及面异常与面异常的组合,通过这些研究可确定对于找矿最为有利的有效地质异常的组合;③ 用有效地质异常空间合成的方法确定找矿可行地段;④ 用有效的地、物、化、遥异常的空间合成的方法确定找矿的有利地段。

3.1.2 GPS 技术与地质异常圈定

GPS 是目前最先进的野外定位手段。非军事的 GPS 手持机定位精度通常 10~100m,军用 GPS,若有已知控制点的多机差分联测,其定位精度可达米级甚至厘米级。GPS 与 GIS 技术相结合,为实现野外数据采集标准化、数字化、自动化及高效化提供了技术保证。在野外,与 GIS 系统的 PC 机相连接的 GPS 手持机,接收一系列卫星的定位信号,快速地计算出地球表面特征的位置,自动地将空间三维坐标数据输入到 GIS 空间数据库。野外人员可采用键盘、条形码、触摸屏等手段输入电子卡片。对于多媒体 GIS 系统,还可以用手写笔输入素描图以及声像数据。另外,GIS 系统还可反过来指示你在室内计划好了的野外踏勘路线。

3.1.3 RS 技术与地质异常的提取及圈定

RS 图象数据,一方面可提供高分辨率、高精度定位的立体观测地貌,可在前期踏勘阶段准确、迅速地查明地形、地貌、露头岩性组合和覆盖区地下构造的基本形态及断层延伸走向等信息;另一方面可利用其与地表、地下信息的相关关系,作为普查勘探的信息源。在野外,将 RS、GIS、GPS 相结合,可以很清晰、直观地利用彩色立体观测地貌图进行跑点定位。目前正探索将色度学原理应用于遥感信息的定量处理中,使遥感波谱的颜色定位性标志定量数据化,并将其应用于成矿预测中^[7]。

3.2 非线性理论与地质异常圈定

分形理论、自组织理论和混沌理论一起构成了非线性科学的核心内容。它们分别试图从形态(几何)、过程和机理的角度探索事物存在、发生和发展的复杂性。

3.2.1 分形与地质异常

分形论的核心思想是标度不变性,即自相似性(self-similarity)。层次结构是事物的固有属性,而从原子结构、地球结构,乃至太阳系结构,无不在层次上体现了这种自相似性。从集合论

的角度来看,矿体可视为构成矿田的元素,矿床可视为构成矿田的子集。矿体、矿床按一定地质规律作有序排列,则构成一个完整的集合——矿田。从本质上讲,维数(分数维和整数维)是对集合层次的度量。在自然界,维数往往是非整数的(即分维),分维是分形论刻画事物特征的重要工具。地质异常亦具有层次性,譬如,全球地质异常、区域地质异常、局部地质异常(矿田、矿床、矿体地质异常)等,并分别与洲际成矿域(intercontinental ore-forming domain)、成矿省、矿化集中区等成矿单元相联系,且前者控制后者的形成和分布。因此,分维值可用于圈定不同等级的地质异常单元和多重地质背景及其异常的定量划分等。

3.2.2 自组织理论与地质异常

比利时学者 Prigogine 认为,一个远离平衡态的开放的物理化学体系,通过自组织过程(self-organization process),不断与环境交换物质和能量,就可以从无序状态转变为时、空结构上的有序状态,并将这种有序状态称为“耗散结构”(dissipative structure)。形成耗散结构的自组织过程是一种非平衡条件下的不可逆过程。某些矿物的环带结构、矿石的带状构造以及矿床的原生晕有序分带等都是自然界耗散结构的案例。地质异常的形成是一个长期的复杂的地质历史演化过程,在其过程中,物质发生过不同尺度的迁移和富集,从微观地质异常到全球地质异常,跨越自 10^{-7}m 尺度到 10^7m 的尺度。前已述及,不同尺度的地质异常之间具有某种自相似性。某些学者认为(孟宪伟等,1994)自组织是自相似之源,因此,地质异常形成的过程亦是一种开放体系远离平衡的自组织过程。多阶段的自组织形成多重地质异常,并使其呈现出复杂的套合相嵌结构。

3.2.3 混沌理论与地质异常

混沌(chaos)是系统内非线性动力学产生的不规则(非周期性)的宏观时空行为,是一种非周期性的有序,它具有以下特性:①对初始条件的敏感依赖性,即混沌解在时间演化上以指数型式敏感于初始条件,从而导致其演化的随机性;②分维性:混沌系统运动轨迹在相空间构成无穷层次的自相似结构而具有分形几何特征;③普适性:当系统趋于混沌时,所表现的特征参数具有普适性,即其特征参数不因具体系统的不同和系统运动方程的差异而变化。在自然界,矿石的储量和品位、断裂长度和频数关系服从幂型分布。人们还发现,任一尺度断裂的长度与它们之间平均距离之比接近常数;许多矿床数的分布可以用负指数分布得到较好的拟合,在足够大的区域内,某种矿产资源量的分布趋于常数(该元素的地壳丰度)。上述表明,自然界的许多事物(其中包括地质异常)可能是在开放的远离平衡的混沌动力系统中,通过自组织过程形成的,并且具有分形结构特征。因此,混沌动力学对探索不同尺度地质异常的形成机制及其对不同等级的矿产资源体的控制关系具有重要意义。

4 地质、地球物理、地球化学综合异常与成矿预测

4.1 地、物、化异常之空间套合及耦合

地质异常与物、化探异常之间,存在着两种空间关系:套合和耦合。所谓套合是指地质异常与物化探异常空间相关,但成因不相关;而耦合则是两者空间、成因均相关,或空间不相关但成因相关。例如,断裂带属于地质异常,在出现断裂带的地段往往有地面磁异常的出现,这两者之间没有必然的成因联系,但在空间上有时会相伴出现,这就是套合。中酸性岩体与碳酸盐岩的接触带是地质异常,这种地质异常与地面磁异常有成因联系,但在空间上,这两者有可能同时出现,但也可能只有接触带而无地磁异常,即在空间上并不相关,这就是耦合。区分套合与耦合

不仅有理论意义,更重要的是在讨论地质异常与成矿的关系时有着实际的意义,为此应着重研究两者具有成因联系的耦合关系。

A. A. 阿里斯托夫(1984)^[10]研究了异常地球化学场,其划分及找矿意义见表1。

表1 不同尺度地球化学场的找矿意义

Table 1 Geochemical fields of different scales and their significance in ore prospecting.

场尺度	场	找矿意义
全球性	地球化学带	找矿预测之一般准则
区域性	地球化学省	一定矿床类型找矿预测之准则
局部性	地球化学体、中心、分带、异常、晕	找矿预测之标志

(据 A. A. 阿里斯托夫, 1984)^[10]

笔者对地质异常的划分,除显微地质异常外,其尺度恰与阿里斯托夫对地球化学异常的划分尺度相对应。因此,地、物、化异常的套合和耦合可能是全尺度的。

4.2 地质异常与成矿及找矿关系的性质、关联度与显著度

地质异常与成矿及找矿的关系是一个非常复杂的问题,其影响因素至少包括:①成矿作用的发展与演化过程;②矿床(体)的埋藏条件和侵蚀程度;③矿产勘查工作程度和研究程度;④矿床学和矿产勘查学的发展水平和矿产勘查工作者在这方面的学术水平;⑤矿产勘查技术的发展水平和在勘查区所拥有的矿产勘查技术手段;⑥矿产资源体或矿体的地球物理场和地球化学场的特点;⑦成矿时间的早晚及成矿后经受改造的程度,等等。由于这些因素有各种不同的情况,就使地质异常与成矿关系的性质、关联度、显著度等各不相同。

地质异常与成矿关系的性质有显式的和隐式的。与成矿具有显式关系的地质异常,往往和物、化探异常耦合或套合,能够根据这种关系较为可靠地预测出矿产资源体或矿体。一般埋藏较浅的地表矿和浅部矿、矿体或矿产资源体及其(或)含矿建造与周围的地质建造的地球物理场和(或)地球化学场有较大反差者,成矿时间晚、成矿后没有经受较强改造者,往往具显式关系。与成矿具有隐式关系的地质异常,与物、化探异常的关系有两种情况:其一是在地质异常上,与其耦合的物化探异常并未显现;其二是,在地质背景场上,有目前尚难以解释的物化探异常套合。形成前一种隐式关系的原因往往是由于矿体埋藏深、矿体与围岩的物性差异不大等;而后一种隐式关系的出现则往往是由于工作水平和认识水平欠高所致。在后一种情况下,不能排除在该区找到新类型矿床的可能性。

地质异常与成矿的关联度和显著度与成矿作用的发展和演化有着紧密的联系。成矿作用的发展与演化有如下几种情况:①具备艾孟斯分带的亲缘成矿系列,有明显的成矿演化,属于这一类型的主要是热液矿床;②独一无二的超大型矿床,在地球历史中没有多次再生,例如元古代的维特瓦特斯兰德(南非)金-铀杂岩;③萨德伯里型地幔超基性岩浆岩(铂-铬的)和辉长苏长岩铜-镍巨大分层的杂岩,它们不与任何明显的亲缘成矿系列相伴;④加拿大(上湖区)、巴西(米纳斯吉拉斯)、印度(辛格布姆)、波罗的海地盾、乌克兰和俄罗斯(库茨克磁力异常区)等地在前寒武纪广泛再生的巨大的层控铁矿石建造,它们同样没有任何后续矿床成矿系列相伴;⑤原始沉积矿石物质地质建造,例如,浸染硫化物黑色页岩原始沉积建造。在这5种情况

中,后4种地质异常与成矿关联紧密,显著度高;而第一种情况,成矿的分带性清楚,可以见到明显的演化过程,在这种情况下,地质异常与成矿的关联度和显著度将随着远离岩体而逐渐降低。当然,可能有其它局部地质异常与成矿显现出某种联系。

除了上述主要因素以外,工作区的掩盖程度、矿产勘查的工作程度和研究程度、所采用的勘查技术手段的先进性和有效性、矿体或矿产资源体的剥蚀程度及地质背景场的不均一性等都会影响到地质异常与成矿的关联度和显著度。

4.3 地质异常单元划分及成矿预测

地质异常的单元划分,首先要考虑的是单元的尺度。有关这个问题前面已经论及,所以,在这里将重点讨论在成矿预测时应用的网格单元和自然单元的问题。

在成矿预测中,这两种单元都是有效的,具体选用主要取决于所采用的研究地质异常的方法途径和数学工具。一般说,用数理统计的方法,包括线性和非线性的方法,大多采用网格单元;在采用地理信息系统进行空间数据合成时,则采用自然单元比较方便。

在用地理信息系统研究线性地质异常时,为了便于成矿预测,要将线性地质异常转换成面型的地质异常单元。转移的方法是确定了线性地质异常的影响半径后,用缓冲带(buffer zone)来实现。

4.4 地质异常(矿)体定位与成矿预测

在进行矿床(体)尺度的成矿预测时,必须对相应尺度的地质异常体或矿产资源体定位。定位的主要方法是矿床模型法,用于地质异常体定位的矿床模型主要有:①矿田和矿床的预测普查(定性)模型。实际上是有目标的描述性分类标志模型,标志由一些在空间上用各种不同方法表示和用不同评定指标描述的与含矿空间相伴或从属的要素所组成。预测和普查对象——矿田和矿床的模型可看作是相应区域构造的一部分。预测普查模型以系统地显示最重要的一些要素的平面图和剖面图来反映。②矿床普查参数模型。由能定量表达的含矿空间要素组成。在这样的模型中,应和矿床主要地质要素的线尺寸,还有在矿体和矿体周围空间各个部分记录的地球物理和地球化学异常的尺寸和强度。在局部预测和普查时,参数模型可以评价可能的矿体距在矿体周围空间内任何观测点的距离远近,还能优化普查网的密度。模型划分出如下的近矿空间:含矿空间本身,含矿空间两侧,矿上空间本身,矿上空间两侧,矿上空间边缘,矿下空间本身,矿下空间两侧,矿下空间边缘。随着信息积累,参数模型的有关资料可存入地质数据库。在此基础上,估计观测点在近矿空间中的位置,以及确定距含矿空间或矿体的距离。

4.5 精度评价

成矿预测的精度评价是个相当困难的任务。地质异常研究和成矿预测的误差,存在于研究和预测工作的全过程。首先是用于预测资料的误差。地质数据的不确定性和“灰色”特性,地质测量的低精度及测量结果表达误差是产生预测资料误差的主要原因;特别是工作程度较低的地区,这种误差往往大得惊人。研究和预测的方法途径和数学模型的选择不当是带来误差的又一重要原因。在研究和预测过程中地质变量的取值、筛选、预处理不当也会带来相当大的误差。

严格地说,目前尚无完善的精度评价方法。在已知区,将预测的结果与已有资料比较,计算错判率,是精度评价的一种常用的方法;但是这种方法并不严格,因为所谓的“已知区”并不见得全部已知。

5 地质异常图与成矿远景区预测图的编制

地质异常图与成矿远景区预测图的编制, 按照其方法特点, 可以分为在概念找矿基础上的编图和在经验找矿基础上的编图, 而后者又可分为单因素异常的组合编图和综合变量编图。

5.1 在概念找矿基础上的地质异常图和成矿远景区预测图的编制

奥林匹克坝铜铀金矿床的预测可以作为概念预测的例子^[6]。70年代初, D. W. Haynes 在该区进行博士论文时, 研究了铜矿化作用, 得出铜是在氧化作用过程中从玄武岩中淋滤出来的结论, 并提出, 大量氧化的大陆拉斑玄武岩可提供充足的铜源, 使之能形成巨型的铜矿床的矿产勘查概念。另一个矿产概念是有关矿床的构造背景。E. S. T. O' Driscoll 在该区地质填图时及在以后的博士论文研究工作中提出区域的剪切运动控制了成矿作用, 差异剪切运动能够解释在矿床中观察到的大多数独特褶皱形式和旋转现象。在找矿工作中人们发现, 隐伏在中生代沉积物之下的玄武岩可能引起磁异常和重力异常, 于是可以将重力异常和磁异常的分布区看成是潜在的隐伏玄武岩的分布区, 有北西向构造走廊通过的重力异常和磁异常区是寻找铜矿床的有利地段。在上述概念的指导下, 绘制了地质异常图和成矿预测图, 成功地指导寻找奥林匹克坝铜铀金矿床(图3)。

5.2 在经验找矿基础上的单因素异常的组合编图

在经验预测基础上的编图是我国当前应用最广的方法。单因素异常的组合编图特点是首先对单一因素或同一类地质体进行研究, 确定其地质异常; 然后对不同类型的地质异常及物、化、遥、矿化和蚀变等异常进行空间数据叠加和组合预测成矿远景区。现以陕甘南秦岭泥盆系铅锌矿矿产预测为例加以说明。地质异常图和成矿远景区预测图是借助地理信息系统(GIS)编制, 整个过程包括如下步骤:

(1) 铅锌找矿信息找矿有利度分析:

主要有: ① 铅锌矿的优势成矿时代分析: 通过铅锌矿点与成矿时代关系的空间分析, 得出 D_2-D_3 是本区铅锌矿最重要的成矿时代, 其中尤以 D_2 最重要, 包括了区内大部分矿床, 从而确定了进行地质异常分析和成矿预测的目标地层

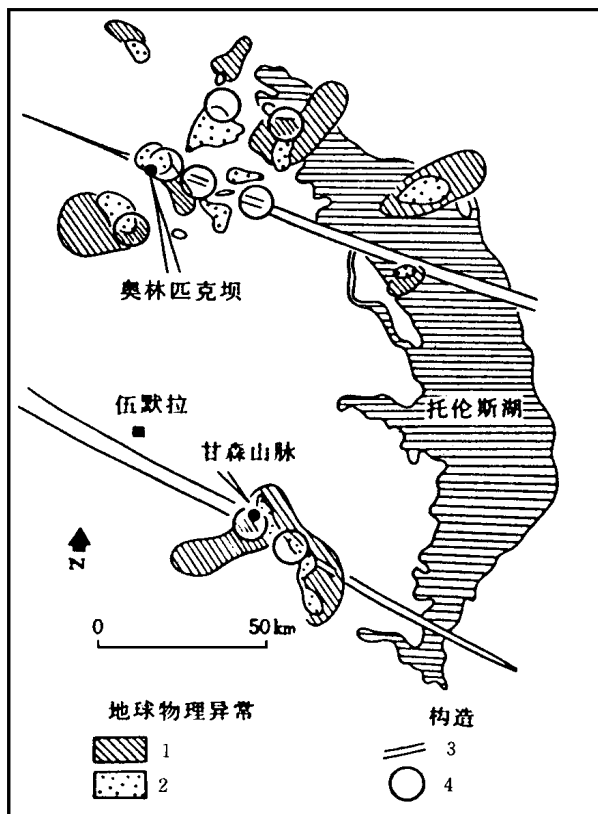


图3 Stuart 陆架的铜找矿靶区概念预测图

(据 R. Woodall, 1995)

Fig. 3 A conceptual prognostic map of Cu prospecting target area in Stuart continental shelf (after Woodall, 1995)

1- gravitational anomaly; 2- aeromagnetic anomaly;

3- tectonic corridor; 4- target area.

组段。②铅锌矿找矿的有利岩性分析和有利于铅锌成矿的岩性异常的确定: 在目标地层组段内, 经过铅锌矿点与岩石相交分析后, 从中检索出有矿的岩性或岩性组合总共有10种; 在作铅锌矿(点)对岩石(区)及区对点相交分析后, 其找矿有利度排序依次为: 浅海堤礁, 台地碳酸盐岩, 滨海泥岩, 浅海砂岩, 浅海砂岩夹灰岩等等, 并计算了每种岩性的单位矿产当量。单位矿产当量是单位面积内所具有的根据矿床规模折算的矿产量, 若以0.5单位矿产当量作为阈值, 则上述5种岩性都是有利于铅锌成矿的岩性异常。③铅重砂异常及 Pb-Zn 化探异常找矿有利度分析: 铅重砂异常, 在作异常检查时, 根据异常的规模和强度, 将其划分为3个级别: 一级(z1), 二级(z2)和三级。在全区37个矿点中有重砂异常显示的有21个, 其中20个在一级异常中, 只有1个在二级异常中, 三级重砂异常中未发现有矿产地。从总体上说, 所有8个大型的铅锌矿中, 只有5个矿床有铅重砂异常存在, 说明只根据重砂异常找铅锌矿, 有可能漏掉一些重要的铅锌矿床。化探 Pb 异常与重砂铅异常一样也划分为三级: 一级(h1)、二级(h2)和三级。化探 Pb 异常中, 对于预测铅锌矿床重要的只有第一级异常, 其中有6个大型矿床, 7个中型矿床及7个小型矿床产出; 第二级异常的成矿重要性相对不大, 只发现1个矿点。

(2) 铅锌成矿预测区的圈定及远景评价。

通过前面的分析, 可以挑选出如下找矿信息, 作为铅锌矿的预测标志: ①岩性及岩性组合标志: 浅海堤礁, 台地碳酸盐岩, 滨海泥岩, 浅海砂岩及浅海砂岩夹灰岩; ②重砂铅异常标志: 一级重砂铅异常; ③化探 Pb 异常标志: 一级化探 Pb 异常。将所选出的这些证据层(标志), 按以单位矿产当量乘以20取整作为色标着色, 然后进行区对区相交的空间分析, 得到不同证据层的相交图。根据色标确定预测区及其级别; 根据相邻预测区的组合确定预测矿田及其级别, 预测铅锌矿田的组合得到成矿区。最终, 得到了如图4所示的铅锌矿预测图。

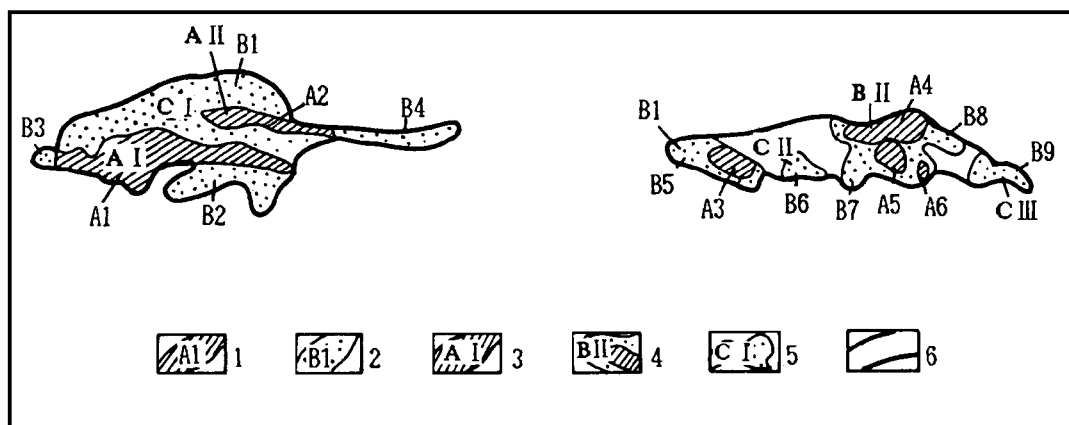


图4 某铅锌成矿区的矿产预测图

1. 权系数总和大于40的 A 级预测区; 2. 权系数总和在10~39的 B 级预测区;
3. A 级预测矿田; 4. B 级预测矿田; 5. C 级预测矿田; 6. 成矿区

Fig. 4 Prognostic map of a Pb-Zn metallogenic province.

5.3 在经验找矿基础上的综合变量编图

综合变量编图的特点是在地质异常研究时, 虽然也涉及各种单一的地质变量, 但在作地质

异常图时,所作的不是物理意义十分清楚的某种单一的地质变量异常,而是应和某些数学方法处理后得到的综合变量的等值线图(异常图)。根据所采用的数学工具的不同,得到的综合变量也各不相同,其地质异常图也有较大的差异。现仅举2个例子加以说明。

(1) 应用特征分析得到综合变量的地质异常图和成矿远景区预测图的编制

用这种方法进行成矿预测分4个阶段进行,即:地质异常场预测、成矿地质场预测、矿化异常区预测和矿田(成矿区或矿床)靶区的圈定。其特点是利用地质信息及遥感信息求得地质异常;利用矿床、矿点、矿化点、重砂异常和地质信息求成矿地质场;利用化探、物探、遥感信息,辅以地质信息求矿化异常区。从3种不同的信息角度研究区域里的成矿有利地段,提高各种信息的利用水平。

地质异常场的预测主要运用地质类变量,通过特征分析方法计算地质有利度,在这中间还引入了遥感线性影象变量参加地质变量的预测。求取地质异常的关键问题是如何确定异常的存在。为此,要从如下4个方面入手:①在不同地质背景场中确立地质异常的地质概念模型;②根据上述模型选取地质变量;③利用地质有利度衡量地质异常的强度;④依据地质背景场求取地质异常的有利区间。图5是用上述方法所编制的地质异常图的一个实例。在勉略宁地区进行1:10万矿产预测时,用特征分析的方法,选出了构造类变量:NE向断裂、近EW向断裂、断裂交叉点数、向斜翼部或背斜核部等;地层岩性类变量:细碧岩及中酸性岩体;组合特征类变量:断裂、蚀变、中酸性侵入岩体与围岩接触带及片理化带与硅化、绢云母化叠加;矿化类变量:金矿点、铜矿点和铅锌、银矿化等。将每个单元所存在的变量的权系数相加,作为该单元的成矿

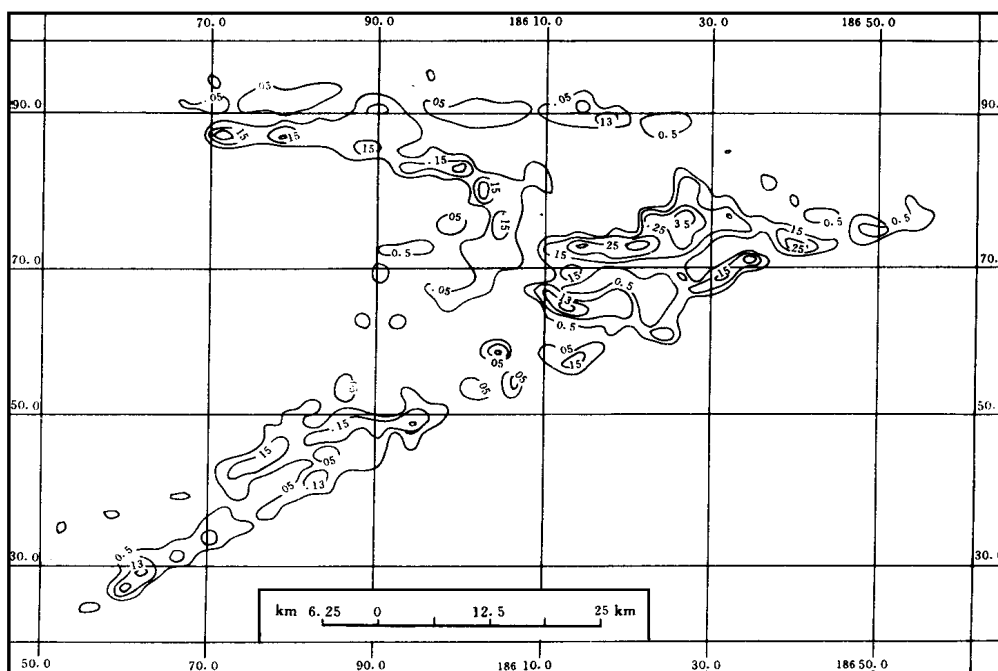


图5 勉略宁地区地质异常图
(据胡光道等, 1993)

Fig. 5 Map showing geological anomalies map of Mianluening region, western China
(after Hu et al, 1993)

有利度。图5的地质异常图就是根据成矿有利度绘制的。

(2) 应用变差函数和分维得到的综合变量的地质异常图和成矿远景区预测图的编制

笔者在云南腾冲地区进行金矿预测时,就是应用这种方法,分别对地层、岩浆岩相对熵和TM 图象解译线性构造应用变异函数和分维等数学工具,提取与矿化有关的地质异常信息;以分维权系数用克里格估值绘制等值线图作为地质异常等值线图,进行金矿的预测。有关方法流程及预测成果等方面的详细论述,请参阅文献[4]。

参 考 文 献

- 1 赵鹏大. 试论地质体数学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 1982, 7(1): 145- 155.
- 2 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常. 地球科学——中国地质大学学报, 1991, 16(3): 241- 248.
- 3 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社, 1983.
- 4 赵鹏大, 孟宪国. 地质异常与矿产预测. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(1): 39- 47.
- 5 赵鹏大, 王京贵, 饶明辉, 李浩昌. 中国地质异常. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(2): 117- 127.
- 6 R. Woodall. 成功勘探矿床中的经验和概念. 地质科学译丛, 1995, 12(1): 34- 39.
- 7 陈建平, 苗放. 成矿预测中的遥感分析. 成都科技大学出版社, 1996.
- 8 De Verle P. Harris and Guocheng Pan. Subdividing consistent geologic areas by relative exceptionalness of additional information: Methods and case study. Economic geology, 1990, 85: 1072- 1083.
- 9 Donald A. Singer. Basic concepts in three part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. Nonrenewable resources, 1993, 2(2): 69- 81.
- 10 А. А. Аристов. Методика геохимических поисков твердых и скопаемых. «Недра», 1984.

A THOROUGH INVESTIGATION OF GEO-ANOMALY: A BASIS OF METALLOGENIC PROGNOSIS

Zhao Pengda Chi Shundu Chen Youngqing
(*China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract The factors related to mineralization are all regarded as geological anomalous events in geologically evolving processes. All geo-anomalies related to mineralization can be considered as “possible regions of exploring mineral resources”, the geo-anomalies (or anomalous zones) where expected mineral deposits may be found are called “practicable zones for prospecting”, among them those abounded with more direct and indirect ore-prospecting information may be defined as “favorable segments for prospecting”. Geo-anomaly is of self-similarity on a different scale. Spatially, it is of complicated genetic and chaotic dynamic mechanism. In form of expression, it contains two categories: hidden and obvious geological bodies (or associations). There is an intrinsic connection between geo-anomalies and mineral deposits both in spatio-temporal relation and in genesis. Study on geo-anomalies must be based on the division of geological background fields. Geo-anomalies can be quantitatively delineated by certain methods and rules. This paper points out the different features of delineating geo-anomalies on different scales. The sophisticated techniques such as GIS, GPS, RS etc. are powerful tools of studying and delineating geo-anomaly. Fractals, self-organizations and chaos facilitate, from sides of morphology (geometry), process and mechanism, to explore the complexity in existence and development of geo-anomaly. There are two kinds of relationships, i.e. telescoping and coupling, between geo-anomaly and geophysico-geochemical anomaly. Eventually the paper gives the compilation of geological anomalous map and prognostic map for favorable area of ore-prospecting.

Key words: geo-anomaly, metallogenic prognosis, nonlinear theory, GIS, GPS, RS, geological anomalous map.