

地质勘查中的数字图像处理技术

杨文久 刘心季

(地矿部地质遥感中心)

1991年4月3日收稿

摘 要

本文介绍用于地质勘查的数字图像处理技术。所处理的数据涉及遥感、地质、地球物理、地球化学和地理等多源地学信息。针对地学信息的特殊性,研究和开发了各种数字图像处理方法,以增强和提取用于地质勘查的重要信息,辅助地质构造分析,并在矿产预测中取得初步效果,显示出数字图像处理技术在地质勘查中的应用潜力。

关键词 彩色相关 人工阴影 RGB-IHS 彩色空间变换 人工视差立体像对 数学形态学空间运算 位累加处理

一、引 言

多源地学信息综合图像处理是近年来发展起来的以数字图像处理技术为基础、综合多学科知识的地学信息处理新技术,具有交叉学科性质。它已逐步发展成为比遥感数字图像处理内容更为丰富的、独立的、系统的新技术体系。地质学是地学的重要组成部分,地质勘查数据的处理具有一定的特殊性。采用一些特殊的图像处理方法实现多源地学信息综合图像处理,辅助地质填图、构造研究、矿产资源预测和评价,是当前地质工作者正在研究和探讨的一个问题。大量事实说明,这一技术代表着当今地质学领域图像处理技术发展的最新趋势,其必要性、可行性和优越性正在被越来越多的地质学家所公认^[1,2]。

施行这一技术的基础工作是建立多种地学信息图像数据库。把包括野外地质调查报告、各种地质图件及含有大量地质信息的非图像形式的地学资料通过归纳、选择,实行属性分离,形成代表不同地质属性的多层图件;将图件数字化输入图像处理系统,形成图像文件;通过归一化处理消除因量纲不同造成的不同属性图像数据在数值上的差异;将这些图像与不同传感器、不同时相的遥感图像相结合,按照统一的地理坐标(通常以地形图为准)进行配准;从而形成多种地学信息图像数据库(集)。

为获得最终的分析结果,对图像数据库(集)中的各种数据采用不同的技术方法进行处理。本文介绍各种用于地质勘查的数字图像处理方法。其中包括旨在突出有用信息提高目视分析效果的各种地学数据显示和综合显示方法,针对地质数据的空间性采用的逻辑、空间运算方法和多种地学信息的综合处理方法等。在各种方法处理的基础上,结合地质知识和专家经验,建立找矿模型,对湖南香花岭地区多金属矿进行初步预测,取得较好效果。

二、技术方法

1. 多种地质属性的图像叠合显示

在地质分析中,对表示多种地质属性的多层图像进行综合观察分析时,叠合显示是一种行之有效的办法。叠合时可直接进行叠加,也可采用掩膜技术进行运算,把各种有用信息叠加在一起,生成一幅新图像供解译人员进行目视比较和综合分析。图版 I 图 1 就是多种信息叠加的图像。它以湖南香花岭地区陆地卫星 MSS7、5、4 假彩色合成图像为背景,黄线为航磁等值线,红线为推断解译断裂,白点为已知矿点,使该地区的地貌景观、断裂构造、航磁异常和已知矿产的空间关系一目了然。

2. 二维彩色相关处理

彩色相关处理技术是用来显示和比较同一地区两种不同类型地学信息空间关系的一种较为直观的手段。将准备生成彩色相关图像的两种不同地学信息(例如,重力和磁力数据)先按预定目的分别进行直方图调整,再用预处理后的数据生成用颜色表示两变量空间相关程度的图像。为便于观察识别,在所生成图像的右下角设置可变的二维彩色相关色标,以便于观察解译者借助于选定的色标所指示的颜色十分容易地识别出两种变量的相关程度和斜率。图版 I 图 2 为同一地区两种色标方案的重磁数据彩色相关图像。图像的右下角分别为用 9 种和 25 种颜色表示的二维彩色相关色标,水平轴表示重力数据,垂直轴表示磁力数据,通过原点与水平轴成 45° 夹角的色标表示这两种数据的正相关变化。因此左上角的颜色表示重低磁高,左下角的颜色表示重低磁低,右上角的颜色表示重高磁高,右下角的颜色表示重高磁低。

3. 人工阴影处理

人工阴影处理技术可以突出地学信息图像上具有一定灰度变化规律的特征信息,主要用于可绘制等值线的各种地学数据。设地学数据所表示的曲面处于直角坐标系 XYZ 中,“太阳”(光源)方位角 θ 按照由北起向东顺时针方向由 $0^\circ-360^\circ$ 变化,“太阳”高度角 Φ 按照由水平方向起向上由 $0^\circ-180^\circ$ 变化,曲面的面元指向太阳方向的向量与面元法向量的夹角为 λ 。在一定的假设前提下,可认为曲面上各处反射光强度与 $\cos \lambda$ 成正比,计算出曲面上各个面元(像元)的 $\cos \lambda$ 值,就相当于得到了各点的相对反射光强度:

$$\cos \lambda = \frac{-p \cos \theta \cos \Phi - q \sin \theta \cos \Phi + \sin \Phi}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (1)$$

其中 P 和 q 分别表示曲面 X 方向和 Y 方向梯度。

根据上述原理,对地形高程或视地形高程地学数据来说,不同高度的变化在“阳光”照射下便出现明暗不同的变化,并且这种变化随“太阳”方位和高度的不同而变化。通过改变“太阳”方位角,可以突出不同走向的具有线性特征的地形或视地形变化(例如,构造线或位场线性梯度带);改变“太阳”高度角,则可以突出高低起伏不同的地形或视地形变化(例如,微地貌或位场的微弱异常)。实际应用中常把这两个参数结合使用,从而获得更好

的应用效果^[3]。

图版 I 图 3 为我国长江下游地区航磁数据图像,图版 I 图 4 为应用人工阴影技术处理图 3 所得的结果图像,处理时“太阳”方位角取 135° ,高度角取 30° ,使北东走向的线性磁异常得到明显增强。

4. RGB-IHS 彩色空间变换

RGB-IHS 彩色空间变换方法可在不改变图像本质的情况下,完成 RGB 与 IHS 两种彩色空间的互相变换。RGB 彩色空间是为人们所熟识的一种彩色空间。IHS 则是用亮度、色度和饱和度来描述物体颜色的另一种彩色空间。由于物体反射光的全部能量由亮度(I)表示,而其颜色信息反映在色度(H)和饱和度(S)上,亮度、色度和饱和度之间是不相关的,因此,IHS 彩色坐标系比 RGB 彩色坐标系更能表现出色光本身的物理特性和与人眼视觉之间的关系。RGB-IHS 彩色空间变换技术在多种地学信息图像的综合处理中有着广泛的应用。把图像由 RGB 变换到 IHS 彩色空间,根据不同的处理目的,有选择性地对 I、H 和 S 成分进行改变,最后把所得到的新 I、H 和 S 反变换到 RGB,得到最后图像^[4]。本文主要进行了以下几方面的应用研究:

(1) 去相关扩展。在 IHS 彩色空间对图像的饱和度进行拉伸,然后反变换到 RGB,达到降低红、绿、蓝三成分之间的相关性,在保真的前提下,达到改善遥感图像颜色质量的目的。

(2) 再造图像。结合两种不同传感器的遥感图像,建造集中它们优点的新图像。如在 IHS 彩色空间,用高地面分辨率图像(如 SIR-A 图像)的 I 作为新 I,用地面分辨率较低但颜色丰富的图像(如 MSS 彩色合成图像)的 H 和 S 作为新 H 和 S,反变换到 RGB 彩色空间,就可得到具有高地面分辨率的彩色图像。

(3) 多种地学信息的综合显示。将两种地学信息图像分别进行从 RGB 到 IHS 彩色空间变换,根据需要,从两种地学信息图像的 I、H 和 S 中选择合成新的 I、H 和 S,然后反变换到 RGB 得到综合信息图像。图版 II 图 5 左半部为通过 RGB-IHS 变换产生的湖南香花岭地区地质图与遥感信息的综合图像,图像的颜色来自地质图,而地表景观和纹理特征来自陆地卫星 MSS 图像。右半部是根据 DEM 制造人工视差对左半部图像重新采样生成的结果。这种新的遥感、地质综合图像十分有助于地质、地形和地貌的综合分析。

5. 三维透视立体观察

为了更好地对一些地学信息进行分析解释,可从透视原理出发将两类信息综合,产生透视立体图像以供观察。在这种图像中,平面数据来自一类信息,高程数据来自另一类信息,也可以平面和高程数据都使用同一类信息。这类图像可清晰地突出平面图像上所表现不出来的某些细节变化,具有立体感强,形象直观等优点。图版 II 图 6 左下、中下和右下分别为香花岭地区的地质图、DEM 和遥感图像;左上和右上分别为地质图与 DEM 结合、遥感信息与 DEM 结合生成的两幅表现该地区综合信息的三维透视立体图像,形象直观地揭示了地质环境与地貌景观的空间变化关系。

6. 人工视差立体像对观察

为了提高遥感资料的解译程度, 利用传感器直接获得供立体观察的遥感图像像对的技术早已被一些传感器设计者所采用, SPOT 卫星即可直接获得遥感图像像对。此外, 具有一定旁向重叠的航空摄影也可直接获得供立体观察的航空像片像对。事实证明, 对像对进行立体观察所获得的信息往往是平面观察不可能得到的。立体像对观察不仅适用于遥感图像, 对于地学信息中的其它一些图像也是十分有用的。因此, 本文采用制造人工视差的方法, 对非天然像对的地学信息图像生成立体像对, 以供立体观察之用。

生成人工视差立体像对的技术原理是, 根据与作立体像对图像相匹配的地形高程或视地形高程数据(如物化探测量数据), 计算出每个像元相对的视差位移距离, 对原图像重新采样, 生成一幅新图像^[5]。这种计算是按式(2)实现的:

$$\Delta D = K \times H \quad (2)$$

其中 ΔD 为图像上一个具体像元的视差位移距离; H 为与该像元相对应的高程或视高程, 像元位移距离的大小同它所对应的高程成正比; K 为常量, 其大小控制立体效果的强弱。所得到的新图像与原图像组成一个立体像对, 可供立体观察之用。图版 II 图 5 为香花岭地区遥感和地质综合图像的立体像对。左半部为遥感地质综合图像, 右半部是根据同一地区的 DEM 来计算人工视差对左半部图像重新采样产生的结果。对实际上含有地质、遥感和地理 3 种信息的这种立体像对进行立体观察十分有利于地质、地形和地貌的综合分析。

7. 数学形态学空间运算

研究不同地质单元的空间结构关系是地质构造分析的重要内容。但在地质信息图像上, 不同地质单元在空间位置上是互不重叠的, 无法直接对它们之间的相互关系进行处理。应用数学形态学空间运算方法可在不改变地学信息图像本质的情况下, 使不同地质单元的空间分布状态发生某种变化, 从而研究它们在该种条件下的相互关系。

数学形态学是研究某种现象或空间目标的分布状态和空间结构的学科。它使用膨胀、剥蚀、断开、闭合等多种空间运算方法, 通过改变目标物的分布状态或结构形式达到某种信息增强的目的^[6]。令 E^k 为 k 维欧氏空间, X 为这个空间中的一个目标: $X \subseteq E^k$, B 为这个空间中的一个结构单元: $B \subseteq E^k$, 则使用结构单元 B 对目标 X 的“膨胀”可用明科夫斯基加法表示为:

$$X \oplus B = \{y | x \in X, b \in B, y = x + b\}, \quad (3)$$

其中 b 为位移量, $(x + b)$ 为矢量和。

使用结构单元 B 对目标 X 的“剥蚀”可用明科夫斯基减法表示为:

$$X \ominus B = \{y | x \in X, b \in B, (y + b) \in X\} \quad (4)$$

其中 b 为反方向位移量, $(y + b)$ 为矢量和^[7]。

根据空间运算的幂等性, 膨胀和剥蚀可组合派生“断开”、“闭合”等组合空间运算:

先剥蚀再膨胀称为断开:

$$X_0 = (X \ominus B) \oplus B \quad (5)$$

先膨胀再剥蚀称为闭合:

$$X_c = (X \oplus B) \ominus B \quad (6)$$

笔者曾将上述空间运算方法应用于高度离散数据处理,地质体连通与扩大表示,构造骨架分析和地质体边界、岩体接触带、特定空间部位等特征提取方面,取得较好的地质应用效果^[8],初步显示了这种方法的应用潜力。

引入空间距离变量来定量表示地质体之间接触关系或构造关系等经验性的空间关系,对地质找矿问题有重要意义,因而引起不少地质学家的关注。空间运算方法为解决这一问题提供了重要手段。但经典的数学形态学空间运算方法,直接用于提取空间距离变量尚有许多具体技术问题需要解决。为合理地提取空间距离变量,使之成为地质体空间位置关系的一种合适的测度,对一般的二进制空间运算方法本文作了以下5方面的技术改进^[8]:

- (1) 用不同数值表示纯膨胀(或剥蚀)部分。
- (2) 用多种数值表示不同程度膨胀(或剥蚀)的层次,作为空间距离测度。
- (3) 将结构单元的形狀由方形变为近圆形以消除处理中的方块效应。
- (4) 应用与逻辑运算相结合的条件膨胀,表达某目标各部位与另一目标之间的距离(图7)。

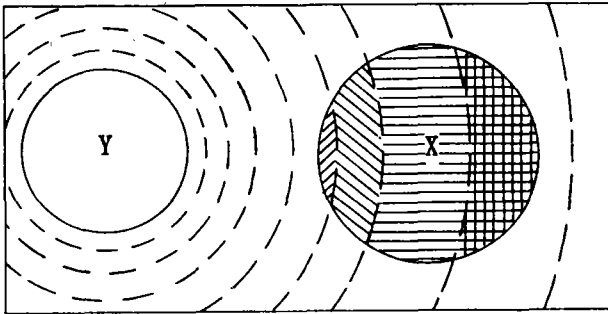


图7 条件膨胀示意图

Fig. 7 Illustration of condition expansion

应用与逻辑运算相结合的条件膨胀,表达某目标各部位与另一目标之间的距离(图7)。目标Y在目标X中的条件膨胀定义为 $Y \oplus B$; $X = (Y \oplus B) \cap X$ 。目标X中不同影纹部分表示到目标Y的不同距离,它定量表达目标X内部各组成部分与目标Y的空间关系,从而实现目标X各部位空间特性的分解。

(5) 把空间运算的处理能力从只处理二值目标扩展到既能处理二值目标又能处理多值目标。

图版II图8为通过递归的膨胀运算生成的香花岭地区到蚀变带的空间距离图像,从蚀变作用角度说明了空间各部位对成矿的有利度。计算中采用圆内接多边形滑动窗口作为结构单元,并以不同的颜色表示膨胀层次,按加权距离和不等间距原则表示不同的空间距离。

8. 位累加处理

在地学信息多变量综合分析中,对变量之间在空间上的相关性或重叠性的研究是个很重要的方面,它可为进一步推断解释提供前提和依据。采用上述叠合显示方法可对不同变量的空间重叠关系进行分析,但有一定的局限性:叠合显示只能供观察解释人员对不同变量的空间关系作出定性的对比;参加叠合显示的变量个数很有限,这一方面受显示设备能力的限制,另一方面,过多变量的叠合会导致重叠的信息量负担过重,内容杂乱无

方面,由于有利度较高的变量所占据的位也较高,因而在计算位累加值时它们所占的比重也较大,使位累加值的大小更适合于定量地表示有利度的高低,这样就可以用计算位累加值的方法提取出铅锌矿地球化学异常共现有利度。所得到的位累加图像中可有 256 种位累加值,把共现有利度划为 256 个等级。

应当指出,在由 8 种元素形成的 256 种组合中,只有一定数量的元素组合是大量存在,而且有找矿意义的。因此,本文从成矿的共生组合规律出发,把位累加值按类分组,每类代表一组有矿产意义的地球化学异常共生组合;并对每类组合重新赋值,作为共现有利度,以便更合理地表示其对成矿作用的相对贡献程度。

图版 II 图 10 为香花岭地区与钨锡铅锌矿有关的 15 种化学元素的共现有利度图像,图像中不同的颜色表示不同的共现有利度。

三、矿产资源预测实例

综上所述,多属性图像叠合、二维彩色相关处理、人工阴影增强、RGB-IHS 彩色空间变换、三维透视立体观察、人工视差立体像对观察等数字图像的综合显示方法为解释人员观察对比和目视综合分析提供了直观、灵活的定性分析手段,作为一种计算机化的视觉,有助于地质工作者从众多的地学信息图像中识别和理解尽可能多的地质、构造、地形、地貌和矿产等方面的信息,建立地质找矿概念模型;而数学形态学空间运算和位累加处理等解析综合方法则为分析人员提供了科学而又实用的定量分析手段,为地质工作者直接提供了各种用于综合信息矿产预测的地质变量(而这些变量是目前的常规数学地质所不能提供的),为建立地质找矿数学模型准备了条件。

应用上述技术,本文以湖南香花岭多金属矿产预测为例,探讨了数字图像处理技术在地质勘查中的作用和潜力。

1. 研究区地质矿产背景

香花岭地区($N25^{\circ}20' - 25^{\circ}30'$, $E112^{\circ}30' - 112^{\circ}45'$)位于华南褶皱系赣湘桂粤褶皱带中部,为晚加里东冒地槽褶皱系。志留纪末晚加里东运动使地槽转化为地台,并与扬子准地台合并为一体。印支和燕山运动使下古生界地层再次遭到改造,上古生界地层产生褶皱与断裂,伴随强裂的岩浆侵入活动,使钨、锡、铅、锌等矿产形成¹⁾。

香花岭地区处于“湘南粤北多金属成矿带”,区内以钨、锡、铅和锌矿著名。其成矿作用具有多次多期和“迭生”特点,矿产主要为钨、锡、铅、锌多金属矿。矿产类型以接触交代型矽卡岩矿床为主,因此中酸性岩体和碳酸盐岩的接触带是寻找上述多金属矿的有利地带。已知矿区围岩蚀变发育,有明显的地球化学异常,在航磁和航放资料中亦有一定表现,因而围岩蚀变和物化探异常是指示上述矿产存在的重要标志。

2. 找矿模型的建立

根据对研究区各种地学信息图像的叠合显示和综合显示所取得的地质认识及已有的

1) 桂阳幅(G-49-XXIII)矿产图(1:20万)和区域矿产报告。

地质矿产资料和专家经验,从地层、岩浆岩、构造、蚀变、地球化学异常组合和已知矿产分布等方面总结出下列8种成矿有利因素,建立了该地区矽卡岩型钨锡铅锌多金属矿的找矿模型:

- (1) 有利的地层;
- (2) 有利的岩体;
- (3) 靠近已知矿床的有利位置;
- (4) 热液蚀变强度;
- (5) 有利的构造部位;
- (6) 靠近矿液来源的有利位置;
- (7) 靠近成矿岩体的有利位置;
- (8) 地球化学异常组合。

3. 综合信息矿产预测

应用空间运算和位累加处理技术提取了各种空间距离和共现有利度等地质变量,为研究区综合信息多金属矿产预测准备了定量参数:对8种见矿的碳酸盐岩地层按各自的见矿数目及在全部见矿地层中的见矿率确定地层成矿有利度;按不同期次中酸性岩体的含矿性确定岩体成矿有利度;用“到矿点的距离”表示与已知矿产的靠近程度;用“到蚀变带的距离”表示围岩蚀变的强弱程度;用“到断裂高密度区的距离”表示受构造有利部位影响的程度;用“到控矿断裂的距离”表示与矿液来源的接近程度;用“到成矿岩体的综合距离”表示与成矿岩体的靠近程度;用位累加算法计算“钨锡铅锌多金属综合地球化学异常共现有利度”表示地球化学异常共生组合对矿产的指示程度。

根据所建立的找矿模型,对研究区内与多金属矿关系密切的上述8种变量按照模型:

$$V = \sum_{i=1}^n W_i \times V_i \quad (7)$$

产生多金属矿成矿综合有利度变量 V ,其中 W_i 为变量 V_i 的权。最后以已知矿产为训练样本,对综合有利度变量进行分类赋值,获得研究区的成矿预测图像。该图像分为8级远景靶区,把已知矿点叠合到它上面进行对比,可清楚地看到已知矿主要集中分布在头两类靶区中。此结果不仅与已知矿吻合,而且与常规地质、地球物理和其它技术预测的结果基本一致,并且为地质工作者提供了一批新的靶区,以便对这一地区的进一步矿产勘查作出决策。

面向地质勘查的数字图像处理技术为多源地学信息的显示、处理和综合分析提供了直观、灵活、快速而有效的手段。它可以模拟地质学家对各种成矿有利因素进行综合分析和圈定成矿远景区的研究过程,通过提取反映不同地质特征的地质变量,对那些属于定性的地质问题进行半定量乃至定量的分析处理,从而得到比较科学、比较准确的成矿预测结果。地质应用的实践进一步证明了用数字图像处理技术进行综合信息矿产预测的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] A. G. Fabbri et al., Map Logic of Data Integration in Digital Image Processing, 15th GEOCHAUTAUQUA on "Computers in the Petroleum Industry: Integrated Approaches", 1986.
- [2] T. Kasvand, Computerized Vision for the Geologist, *Mathematical Geology*, Vol. 15, No.1, p. 3—21, 1983.
- [3] 杨文久,应用数字图像处理技术处理数字高程模型数据和与数字高程模型数据相结合的遥感信息, *国土资源遥感*, No.2, p.38—43, 1989.
- [4] 杨文久等,数字图像处理中的蒙赛尔彩色坐标变换及其应用, *遥感地质*. No. 3, p. 1—8, 1987.
- [5] R. M. Batson et al., Synthetic Stereo and Landsat Pictures, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 10, p. 1279—1284, 1976.
- [6] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, 1982.
- [7] Xinhua Zhuang et al., Morphological Structuring Element Decomposition, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 35, p. 370—382.
- [8] 刘心季,地质图像的空间/逻辑运算及其应用, *国土资源遥感*, No. 2, p. 23—32, 1991.
- [9] S. Aronoff et al., Proceedings of IGARSS'86 Symposium, p. 513—520, 1986.

DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUE IN GEOLOGICAL EXPLORATION

Yang Wenjiu Liu Xinji

(Center for Remote Sensing in Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

Digital image processing technique applied to geological exploration is presented in this paper. The data processed are involved with multi-geoscience information such as remote sensing, geology, geophysics, geochemistry and geography. To be directed against the particularity of geoscience information, various methods of digital image processing have been developed in order to enhance and extract the important information used in geological exploration and to assist in geotectonic structural analysis. The preliminary result has been achieved in mineral prediction, demonstrating the potential of digital image processing technology in geological exploration.

Key words Cross-color Shaded relief RGB-IHS transformation Stereo pair by artificial parallax Spatial operation of mathematical morphology Bit accumulation processing

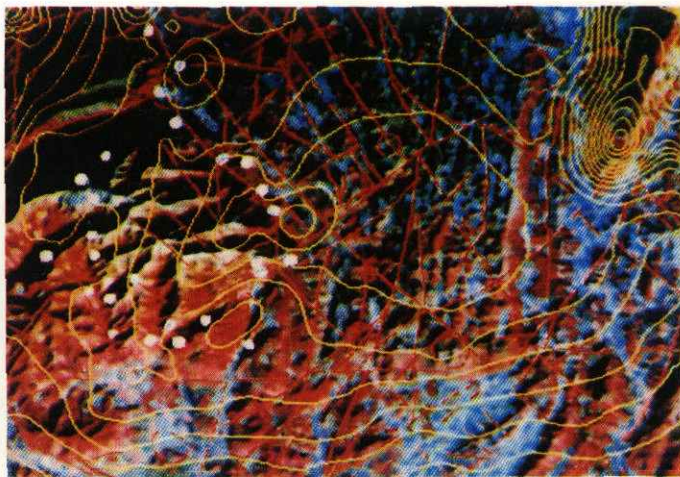


图1 多种地学信息叠加图像



图2 重磁彩色相关图像



图3 长江下游地区航磁数据图像

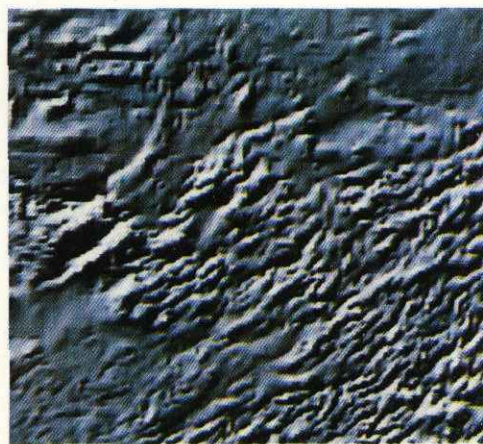


图4 经人工阴影技术处理后的
长江下游地区航磁数据图像

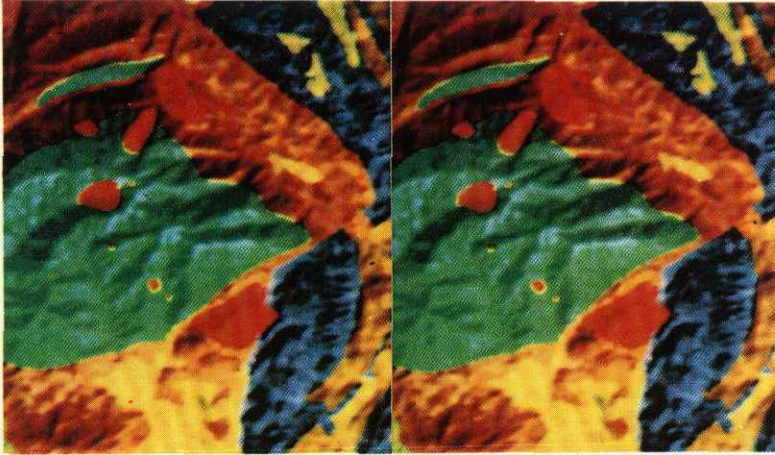


图5 遥感和地质综合图像的立体像对

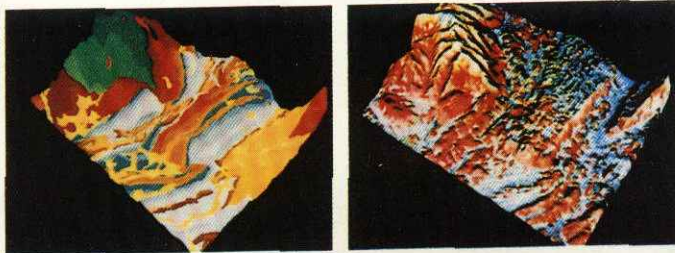


图6 综合信息三维透视立体观察图像



图8 到蚀变带的空间距离

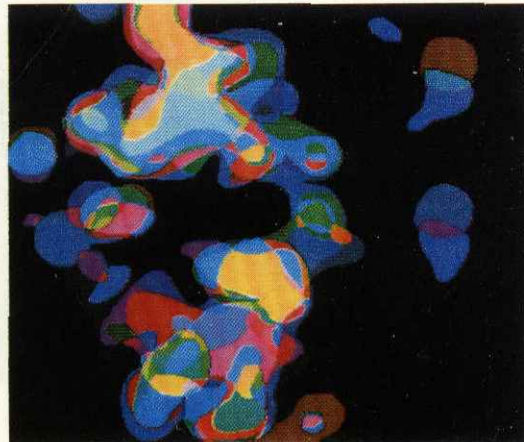


图10 与钨、锡、铅、锌矿有关的
15种化学元素共现有利度图像