

地质勘查图像分析与综合

王润生 等著

地质出版社

地质勘查图像分析与综合

王润生 杨文立 黄大年
张维清 秦小光 晋佩东 著
王青华 姚国清 周群辉

地质出版社

(京)新登字 085 号

地质勘查图像分析与综合

王润生 等著

责任编辑：陈军中

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：13.75 插页：2 页 彩图：3 页 字数：322000

1992年7月北京第一版·1992年7月北京第一次印刷

印数：1—1100册 国内定价：10.35元

ISBN 7-116-01048-3/P·893

前 言

随着地质工作的日益深入和地质调查程度的日益提高,找矿难度逐年增大。除了少数边远地区外,期望依靠单一的手段和单一的信息直接发现矿床的时代可能已一去不再复返。理论找矿、模式找矿和目标找矿方法日益兴起,这需要运用正确的地质成矿理论,采取有效的技术方法,综合研究已有的各类地质资料,重新认识地质背景、成矿规律和控矿因素,建立各种信息的找矿标志和综合找矿模型,预测新的找矿靶区,寻找隐伏矿体和矿床。

多年的地质工作积累了大量的资料和数据,并且还逐年地不断增加和更新。这些资料的比例尺和表达方法各不相同,所描述的空间场特性各异,其空间特征和数学特征也各有其特殊性。如何科学地有效地综合利用这些资料,快速、准确地提取地质矿产信息,已成为地质工作者所面临的难题之一。传统的叠加对比方法不仅效率低、综合能力差,并且难以实现信息的转换,远不能适应地质信息量的日益膨胀和地质分析向定量化发展的需要。数字图像处理和空间信息系统为地质勘查数据的分析和综合开辟了新的途径。

为了跟上世界技术发展,建立我国自己的地质勘查数字图像处理的方法论体系,提高图像分析的地质应用水平,并进一步促进地质数据处理和矿产资源预测向可视化、模式化和智能化方向发展。“七五”期间,由地矿部地质遥感中心主持,联合长春地质学院、中国地质大学(武汉、北京)、地矿部矿床研究所等单位协作攻关,开展了“遥感图像与其它地质数据综合图像处理技术及应用研究”,本书为该项目主要研究成果的总结。

地质勘查数字图像分析和图像综合是在遥感数字图像处理基础上发展起来的综合技术方法,至今已有近二十年的发展历史。书中内容主要是介绍项目的成果,但为了比较全面地阐述地质勘查图像分析的原理和方法,还简要介绍了数字图像处理的基本内容,对涉及到的国内外有关重要工作成果也作了评述和介绍。除原文引用的以外,评述和介绍中有不当之处概由笔者负责。

本书第一章、第二章的一(一)和二、第三章的一(一)、一(三)、二(一)、四和六(一)、第四章的一(一)、一(二)、二(一)、三(一)、三(四)和三(五)由王润生执笔,黄大年撰写了第三章的七,杨文立撰写了第三章的二(二)、二(三)和五(一),张维清撰写了第三章的八,秦小光撰写了第三章的一(二)、二(四)第四章的二(二)和二(三),第四章的三(二)、第五章的二由晋佩东撰写。其余章节的分工为:第二章一(二):周群辉、秦小光、王润生;第三章的三:王润生、姚国清、杨文立;第三章的五(二):王润生、秦小光;第三章的六(二):杨文立、王润生、秦小光、周群辉;第四章一(三):杨文立、秦小光;第四章一(四):晋佩东、秦小光;第四章三(三)杨文立、晋佩东;第五章一:杨文立、王润生、姚国清;第五章三:王青华、张维清;王润生统稿。

参加本书所涉及内容的研究人员还有刘心季、杨文久、童隆裴、和正民、方鸿宾、刘

伊克和孙莉。研究工作得到庄培仁教授、穆石敏教授、丰茂森教授和楼性满高工的指导和帮助，湖北鄂西北地质矿产调查所提供了部分地质研究资料并在野外工作中给予热情的支持和帮助，贾美芝清绘了全部图件，在此一并表示衷心的感谢。

作 者

1991.12

目 录

第一章 导论	1
一、数字图像处理与图像处理系统	1
二、地质勘查数字图像的空间特征和数字特征	4
三、地质勘查图像分析的发展和现状	6
四、地质勘查数字图像分析与综合原理	9
五、地质勘查数字图像综合与空间信息系统	12
第二章 地质资料的图像化和预处理	14
一、地质资料的图像化	14
(一) 地质图件的数字化	14
(二) 离散数据的网格化	15
二、数字图像的配准与镶嵌	22
(一) 数字图像配准	22
(二) 数字图像镶嵌	27
第三章 地质勘查数字图像分析方法	29
一、图像的色度空间分析	29
(一) 色度空间变换	29
(二) IHS 变换在 n 维空间中的扩展	32
(三) 地质勘查图像的色度空间分析	37
二、图像纹理信息的数学表征	39
(一) 遥感图像纹理信息的物理数学特性	39
(二) 傅里叶功率谱纹理测度	41
(三) 灰度共生矩阵纹理分析	44
(四) 基于变差函数的纹理分析方法	48
三、遥感线性特征的机助解译和线性体场的数量化分析	56
(一) 引言	56
(二) 线性特征的机助解译	56
(三) 线性体场的数量化分析方法	63
(四) 铜陵线性体场的数量化分析和地质应用	73
四、地质编码图像的空间分析	76
(一) 地学图件的空间逻辑	76
(二) 地质图像的空间逻辑运算	78
(三) 二值图像的位逻辑运算和共现指数图像	80
(四) 数学形态学方法的应用初步	82
五、图像的相关矩阵分析和比值分析	84
(一) 相关矩阵分析	84

(二) 比值分析	86
六、物探和化探数据的图像处理和分析	90
(一) 物探和化探数据的显示和增强	90
(二) 物探和化探数据的图像分析	96
七、重、磁异常特征分析及识别	100
(一) 引言	100
(二) 异常单元划分和异常特征提取	101
(三) K-L 变换和特征空间压缩	105
(四) 单元识别与类别可分性定量评价	108
(五) 微机重、磁特征分析和识别系统	111
(六) 应用实例	113
八、数字地形应用初步	118
(一) 数字地形模型的建立	119
(二) 基于地形特征的控制点匹配	124
(三) 遥感图像地形影响的校正和视反射率图像的生成	126
(四) 确定阴影区的转换算法	129
(五) 任意光照条件的遥感图像模拟	131
第四章 地质勘查图像综合和地质找矿模型	133
一、特征空间的形成和分析	133
(一) 特征空间和特征空间形成	133
(二) 特征空间分析的含义和准则	134
(三) 特征压缩	135
(四) 特征选择	141
二、遥感等综合图像的地物识别	153
(一) 提高遥感图像地物识别分类效果的措施	153
(二) 地物识别的树形分类器	154
(三) 遥感图像的平面聚类分割	159
三、矿产统计预测和地质找矿模型	161
(一) 地质勘查图像的目视综合	161
(二) 多元统计方法在图像综合中的应用	162
(三) 地质勘查图像矿产预测的统计决策	164
(四) 特征图像的空间叠置分析	166
(五) 网络分析和网络模型	167
第五章 地质勘查图像分析和图像综合应用实例	169
一、铜陵地区地质勘查图像分析和综合试验	169
(一) 概述	169
(二) 遥感图像岩性地层单位解译	171
(三) 线性构造研究和区域构造特征分析	172
(四) 环形影像特征与岩体侵位	179
(五) 成矿作用和找矿标志分析	181
(六) 综合图像矿产统计预测	184
(七) 网络模型	192

二、新疆库米什地区找矿预测	193
(一) 地质特征	193
(二) 图像分析和找矿预测	193
三、鄂西北地区地质勘查图像综合和找矿预测	196
(一) 概述	196
(二) 地质勘查数据的图像分析	196
(三) 图像的叠置分析与找矿预测	203
参考文献	205
图版说明及图版	211

第一章 导 论

一、数字图像处理与图像处理系统

1. 数字图像和数字图像处理

图像是人眼或传感器感知的外界景观的视觉形象。在数学上,一幅图像可表示为

$$I = f(x, y, z, t, \lambda) \quad (1-1)$$

其中 I 为图像的强度或亮度,它是三维空间坐标 x 、 y 、 z 以及时间 t 和波长 λ 的函数。

接收的电磁辐射波长不同,就可得到不同类型和不同用途的图像,如伽马射线图像(0.003—0.03 nm)、 x 光图像(0.03—3nm)、可见光图像、红外图像、微波图像、超声波图像等。

数字图像是空间坐标和强度都已离散化的图像。按一定的规则(线性或非线性)把图像强度分割成一系列离散的强度等级,称为图像的**灰度**。灰度级数一般取 2 的整次幂,如 $2^8 = 256$ 级。按等间隔在空间上对图像进行采样,将图像分割成规则的格网,所得网格单元称为图像的像元或像素。每一像元的灰度值以其中心坐标的灰度或像元内平均灰度表示。这样,一幅数字图像实际上是一个数字矩阵,矩阵的元素即是图像的像元,矩阵元素的值即是像元的灰度值。像元的坐标以矩阵的行、列数(L , S)表示,它们都是整数。图像离散化后可以用数学方法对它进行处理、分析、变换和综合。

一幅数字图像即是一个二维数字矩阵,反之,任何一个二维矩阵都可以用图像的形式形象地予以表达。事实上,任何空间数据都可以通过采样和量化的方法转换成图像的形式。广义地讲,图像可定义成

$$I = f(x, y, z, t, R) \quad (1-2)$$

对于不同的参量 R , 上式定义了不同类型的图像,如摄影图像、数字高程图像、超声图像、地震波图像等, I 为参量场的强度。一般当参量 R 和时间 t 确定之后,一幅二维图像即可表示为

$$I = f(x, y) \quad (1-3)$$

由于图像的视觉效果,非图像数据的图像表达具有直观、形象、信息量大等特点,都可以利用数字图像处理的方法进行分析、增强,从中提取有用的信息。

数字图像处理技术一般可分为四大部分,即图像恢复、图像增强、图像分析和图像理解。

图像恢复包括畸变校正、误差压缩、比例尺和地图投影变换、镶嵌配准、画面整饰以及数据格式转换等。图像恢复的主要目的是为了消除成像过程中的畸变和误差,按照存储、传输、处理和成图的要求,改变图像的数据结构、比例尺和覆盖范围,为进一步的分析和分析准备好合乎要求的图像。我们把图像压缩和编码也归入这一大类中,其目的是为了减少图像的存储量,降低数据的传输率。对地质应用来说,它们都属于图像预处理的

范畴。

图像增强是通过对图像的变换,改变图像的灰度分布、频度分布和色调特征,突出目标信息,压制背景信息和噪声,为目视解译和分析提供质量更高、目标特征更清晰的图像。图像增强运算是一种从图像到图像的映射,它既没有改变图像的原有性质,也不能增加任何新的信息。

图像解译和分析人员主要根据图像的灰度、颜色、纹理和形状等参数识别和抽取所需要的信息。按所增强的特征和效果,图像增强方法可分为反差增强、彩色增强、纹理增强、边缘增强和多图像增强方法。

反差增强的目的是通过改变图像的灰度分布,使图像或识别目标尽可能占据图像显示装置(包括显示器、胶片、照片等)的最佳动态范围,扩大目标和背景的亮度差别。常用的反差增强方法有线性灰度变换、分段线性变换、非线性变换(指数、对数、高斯和正切变换等)和直方图修正(直方图均衡、直方图匹配、直方图正态化等)。不同的变换方法用以增强图像不同的灰度级范围,而压缩其它的灰度级特征。因此用反差增强方法增强目标信息的同时,往往以压制其它信息或背景特征为代价。

人眼识别色彩的能力比识别灰度级的能力要大得多。色彩可以用亮度、色调和饱和度三个参量加以描述。亮度(I)表示色彩的明亮程度,它反映了物体的反射辐射强度,色调(H)指颜色的色别,饱和度则描述了颜色色调的纯度(详见第三章“图像的色度空间分析”)。黑白图像仅表达了色度空间中亮度的变化,而未能利用人眼视觉响应较敏感的色调和饱和度信息。因而彩色图像可容纳比黑白图像多得多的信息。

彩色增强方法包括假彩色合成和伪彩色变换。

假彩色合成利用三原色原理将三种参量的图像组合成一幅彩色图像。加色系统用红、绿、蓝三原色的叠加产生不同的色调差异,而减色系统则从白色中减去黄、品、青三原色成分。

伪彩色转换用以将黑白图像转换为彩色显示,黑白图像上微小的灰度差异都可被映射为人眼易于识别的色彩差异。彩色密度分割是一种常用的伪彩色技术,它将黑白图像的灰

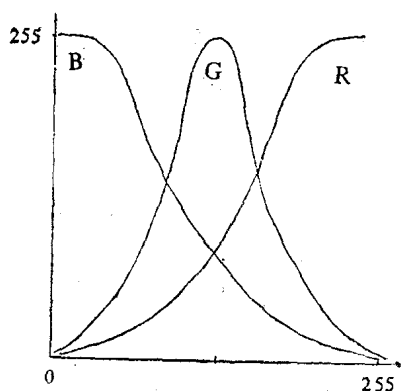


图 1—1 红、绿、蓝三色查找表曲线

度级或灰度区间映射为不同的颜色,习惯上依色调的波长顺序将灰度级从低到高依次映射为黑、蓝、青、绿、黄、橙、红和白色。另一种伪彩色技术是用三种不同的映射函数对黑白图像做灰度变换,形成三幅灰度分布特征截然不同的图像,然后给这三幅图像分别赋以红、绿、蓝三色或分别作为亮度、色调和饱和度分量做彩色合成。在实际处理中,常用图像系统三通道数据查找表拉伸赋值技术实现。最常用的转换曲线如图1—1所示,实施这种转换后,黑白图像按灰度级从

低到高依次映射为从蓝到红的各种颜色。该方法所得到的图像色彩变化连续,无密度分割技术中常出现的等值线效应。

图像灰度的空间变化特征即图像的空间频率特征是图像解译和识别的重要标志。图像

的高频信息主要对应于边缘、线条、精细纹理和图像细节，低频信息主要由主干结构、均一地物或区域背景等组成。**滤波增强**即是用数字滤波方法增强图像的某种空间频率特征。按所增强的频率分为高通滤波、低通滤波和带通滤波。

滤波增强技术分为空间域滤波和频率域滤波。空间域滤波是图像空间变量的局部运算，用卷积或掩模技术实现。频率域滤波则通过傅氏变换，将图像变换到频率域中，利用不同的数字滤波器，提取不同频率特征信息，再通过傅氏反变换返回到空间域中。

多图像增强技术将多个参量或多个时相的图像用线性组合或非线性组合方法生成新的特征图像。新图像综合了原图像各个分量的特性，从而增强了不同地物之间的某些特性差异，如场强度差异、变化率差异和空间频率差异等。常用的方法主要有图像之间的算术运算（加、减、乘、比值）和图像变换方法，如K-L变换、阿达玛变换、斜变换等。差值图像可增强图像间微小的强度变化，常用于动态监测。比值处理可消除乘积因子如遥感图像阴影的影响，以突出微弱的本征特征差别。K-L变换常用以进行去相关分析和图像压缩。

图像分析的主要目的是从图像中抽取目标特征信息，内容包括特征识别（统计特征、色调特征、邻域特征、结构特征、相关特征等）、图像分割、区域关系确定等。图像分析是将原始图像转换为专题图像、图件或专题数据的映射。经过图像分析所得到的图像已经不是原来意义上的图像，通过对图像中原始信息的选择、分解、演绎和综合，形成新的专题特征图像或组合标志图像，如统计特征图像、色调异常图像、纹理图像、相关图像等。图像分析是图像处理中的高级阶段。

图像理解是图像处理与人工智能方法的结合，是面向模式的知识处理。它要求开发面向对象的处理方法，使计算机能模仿人对景物的分析识别过程，对具体的目标图像，按照已有的知识，产生一种演绎推理，形成导致识别的规则和“先验”信息，理解所识别目标的性质，对识别的图像作出描述和解译，用智能方法采取合适的图像处理技术达到这一目的，并评价识别处理的效果。

图像处理中数据的运算和变换方式主要有以下几种。

（1）点运算，输出的像元值仅依赖于输入图像中同一像元的灰度值。如图像的灰度变换、算术运算、多图像各种变换以及图像分类等。

（2）邻域运算，运算在图像像元的某一邻域内进行，输出图像的像元值依赖于输入图像中该像元某一邻域内各像元的灰度值。如卷积、邻域统计、纹理分析等。

（3）几何运算，输出图像的像元值取决于输入图像中与该像元有特定几何位置关系的像元的值，几何位置关系由所确定的几何变换方式确定。该运算方式仅出现在图像的几何变换中，如放大、旋转、比例尺变换和图像匹配等。

2. 数字图像处理系统

数字图像处理系统是专门用于处理数字图像的计算机系统。与一般的计算机系统相比，数字图像处理系统具有以下几个特点：（1）数字图像阵列一般都比较大，因此要求系统要有较大的存储容量和较快的运算速度；（2）具有视频信息的输入、输出和显示能力；（3）图像作为一种视觉信息，其质量的好坏不仅取决于应用目的和实际效果，而且在很大程度上取决于用户的视觉特征。因此，图像处理系统必须具有较强的交互式处理能力。一般的图像处理系统由下列几大部分组成。

(1) 主机 (CPU): 系统的核心, 完成主要图像处理任务, 并负责系统和文件管理、外围设备控制和调配以及人机交互界面操作。

(2) 图像帧存和图像监视器: 用于图像的快速存储和显示。其存储和显示能力与帧存容量和监视器的分辨率有关。对于地质勘查数字图像的分析来说, 至少要求系统具有 2 兆字节的帧存容量, 可同时存储和显示四幅 512×512 大小的图像。三幅用于显示三个参量的彩色合成图像, 第四幅用于图形的叠加。

为了提高图像处理的速度和交互处理能力, 许多系统都设计了专门的图像处理器, 如 I²S 公司的 M 75、DIPIX 公司的 ARIES 系列, 不仅具有图像采集、存储和显示控制的功能, 还具有功能强大的实时或准实时的图像交互式处理能力。

(3) 图像输入输出设备: 包括摄像机、图像扫描仪、磁带机和各种硬拷贝记录仪等设备, 用以将各种形式的原始图像, 包括数字图像、图片、胶片等输入到处理系统中, 并将处理结果以用户所需要的形式记录下来, 供进一步的处理、分析和保存。

二、地质勘查数字图像的空间特征和数字特征

1. 地质勘查数字图像的概念

地质图像可定义为空间地理位置 (x, y) 的函数。从不同观测场, 可得到不同类型的图像, 如光量场图像、雷达图像、地球化学场图像、矿物岩石场图像等。我们把用于地质矿产勘查的各种数字图像总称为地质勘查数字图像, 包括各种遥感图像、地质矿产图像、地球物理图像、地球化学图像、数字地形图像以及由这些图像所导出的派生图像。地质勘查数字图像的综合即是研究如何用图像处理方法, 对这些图像进行综合分析, 从原始图像中提取地质矿产标志信息, 进行地质分析和找矿预测。

由于受到观测手段的限制, 特征场是无法在所有的位置 (x, y) 上进行观测的, 或者无法进行直接观测。一般地, 摄影和扫描方式得到的图像, 如卫星图像和摄影照片, 是按一定的格网进行观测和记录, 每一正方形格网即是一个像元, 其大小与仪器的分辨能力有关, 其位置是指格网的中心点坐标。一般的非图像形式记录的观测数据, 如地球化学元素浓度、地球物理场、岩性分布等, 一般都不是也不可能按地理格网进行观测。因此, 观测值并不一定对应于规则的格网, 形成图像时需不规则的离散观测值去估计各像元的值, 即要将非图像形式记录的数据图像化。

2. 地质勘查图像的特点

地质勘查图像与一般图像相比, 具有以下几个特点, 即图像的空间性、随机性、结构性和模糊性。

(1) 空间性

地质图像是空间地理位置的函数, 带有位置坐标的特征组成了数据平面, 其属性值表现为图像的灰度或色调。属性值可以是观测场值、统计参量或特性编码。地质体各种特征场观测值具有空间变化性而构成区域化变量, 同一地质体不同标志场又具有不同程度的相关联系而构成协区域变化, 某些观测值还可具有特异变化而构成奇异值。因此, 在图像分析和综合中, 不仅要研究图像间的成因联系, 还要研究各种场的空间联系和空间变化特性

以及地质体的空间关系。即要根据各种图像的空间变化特征研究图像的综合方法。

(2) 随机性

由于地质体的空间变化、观测场的随机特征和观测的局限性,决定了像元灰度值的随机分布特征。这种随机分布特征包含有两个方面的意思:其一是由于观测的局限性和观测误差的影响,在同一观测点上,不同时间获得的观测值具有一定的随机性而构成一个时间序列。其二是随着地理位置的变化,观测场值除具有一定的空间连续性外,还具有不同程度的随机变化特征,即具有空间上的随机特征,可用各种统计方法揭示其空间上的统计规律性,即研究各种图像的空间统计特征。

(3) 结构性

地质图像的灰度值是以地理坐标(x, y)为自变量的区域化变量,图像灰度除了具有随机分布的特点外,由于特征场的空间连续性,使属性值具有一定的空间自相关性,即具有空间结构特征。

结构性和随机性是区域化变量的两个不同的方面,两种性质的强弱和主次随图像和物体而异,在图像处理中应充分考虑地质图像这两方面的性质。

(4) 模糊性

地质特征和地质数据一般都具有某种不确定性,从而决定了地质勘查图像都具有不同程度的模糊特征。如异常和背景的区分是一个相对的概念,随着应用目标、分析方法甚至解译人员认识的不同而发生变化;矿体和矿化地质体的界线经常是逐渐过渡而并不是截然分开的。断层、线性体和接触带等表现为线状特征的地质体或现象实际上也并不象图像上都表现的那样是一条线,而应是一条宽度不等的带,并且带的边界也经常是逐渐过渡而表现为某种不确定性。因而,在处理分析这类问题时,应引入一些模糊表达和模糊算法来表征这些特征。

不同的图像描述了不同场的特征,由于场的性质、观测方式和传感器特性的差异,不同的图像具有各自的空间特征和数学特征。

3. 像元大小与像元值的关系

图像都是以规则的格网记录的,像元的值即代表像元所在网格内场的特性。但像元作用区范围与像元的大小并不一定相同,可以有下列几种情况。

(1) 作用区范围小于格网网格,即小于像元分辨率。像元值仅与观测点场的性质有关,如地球化学采样分析数据、地质观测数据等。这类图像一般随机性强,而空间连续性差,且具有较大的模糊特征。

(2) 作用区与像元大小基本对应。像元值是像元范围内各地物反应的综合。如陆地卫星数据,像元亮度值是像元视场内各地物反射亮度的加权和。

(3) 作用区范围远大于像元的大小。像元值不仅受到像元内地物特征的影响,还受到像元范围以外以及远处场分布特征的影响,如各种地球物理数据。这类图像一般空间连续性好。

4. 图像的数字类型

根据图像的数字特征,地质图像可分为以下几种类型:

(1) 标称图像。像元值仅具有标称意义,表示事物可能的状态,而没有任何数值上的意义。如岩性图像、分类图像等,其不同的编码值仅表示不同的岩性分布或地物类别,

而并不代表各岩性和类别之间的大小或顺序关系。当标称图像的编码值仅取数字 0、1 两个值,以表示状态的“存在”或“不存在”时,这类图像称为“二值图像”或“二态图像”。它是标称图像的一个特例。

(2) 有序图像。像元值表示事物所取状态按一定意义排列的顺序或等级,但并不表示各等级之间的数量关系。如用数字 0—4 分别表示无矿、矿点、小矿、中矿和大矿。

标称图像和有序图像又统称为编码图像。一幅编码图像是标称的还是有序的,主要看它所代表的地质含意,如一幅岩性图,若赋予不同的编码值以地层的含义,则它是一幅有序图像。

(3) 灰度图像。像元值之间不仅具有顺序意义,并具有明确的数量关系。这种关系可以是间隔型,也可以是比例型的,它取决于属性值的观测方法。相对测量所得的数据一般是间隔型,由这种数据形成的图像是间隔图像,如热红外图像,未经大气散射校正的陆地卫星图像等。绝对测量数据是比例型形成比例图像,如地球化学图像。

三类图像可以进行转换,但转换往往是不可逆的。灰度图像通过密度分割或阈值分析等方法即可转换为有序图像或标称图像,但要损失不少信息。但是,转换后的图像往往已被赋予专门的地质含意而成为各种专题图像,如某一地质体的分布范围、异常区以及成矿有利地段等。

不同图像所表达的特征场的性质不同,数据的空间特性和数字特性也各异,处理方法也各有其特殊性。例如,对于编码图像,数值运算方法都将变得几乎没有意义,而应该用逻辑运算和空间分析方法处理;陆地卫星图像由于是间隔图像,在进行比值运算时,一般应进行大气散射校正,先将它转换为比例图像,消除大气散射等加性因子的影响,从而保证进行比值处理后能有效地突出不同地物间波谱特征差异。因此,对于不同的图像,必须密切结合各专业的特点、各类图像的空间特征和数字特征,采取合适的处理、分析和信息提取方法。在多种数据的图像综合和地质分析中,更要考虑各类图像的不同特点,才能保证图像分析和综合的科学性和实用性。

三、地质勘查图像分析的发展和现状

图像处理在地学中的应用始于遥感领域,70 年代初期得到迅速的发展。70 年代中期,美加等国开始把图像处理技术应用于地球物理、地球化学以及地质图形的处理中,其中最先应用图像处理的领域可能是地震资料的处理,特别是三维地震的处理,发展了多种地震数据图像显示处理系统。70 年代中期,加拿大地调所和渥太华大学合作,开展了地质图像处理分析的研究^[30],用空间分析和逻辑运算方法处理地质图形和岩石薄片图像^[31],用五年时间在 CDC CYBER 74 计算机上,开发了“地质图像分析程序包 (GIAPP)^[32]”。1977 年,美国地调所用彩色合成方法显示航空放射性数据^[33],加拿大地质调查所开展的 1:100 万全国航磁图的编制中,用图像处理方法制作了彩色磁异常图、磁立体阴影图和人工阴影立体像对,于 1983 年正式出版^[34]。1978 年,加拿大地质调查所在 Quiet 湖区开展水系沉积物调查,用 DIPIX 图像处理系统,将元素浓度以不同的符号和色调进行编码,叠加于地质图像、陆地卫星图像或数字地形图像上进行综合分析,用交互式阈值分析方法评价区域化探异常^[35]。同一时期,斯坦福大学在怀俄明州 Bearlodge 地区的铀矿勘查中,用

图像处理方法综合显示陆地卫星、航磁和航空放射性数据,进行综合分析^[36]。美国在“国家铀矿资源评价”项目中,用灰度图像显示和分析分散流和土壤化探数据^[37]。其后,加、美、澳、西德、芬兰等国陆续将图像处理技术用于地质、重、磁、航放、水系沉积物、土壤和岩石地球化学数据等的表达和处理领域以及地学数据的综合处理和分析中,广泛利用灰度图、彩色分割、彩色合成、人工阴影、方向滤波等技术表达和处理物化探数据,用彩色合成、图像图形叠加、二维彩色相关、逻辑运算等方法综合显示多种地学参数图像。随着遥感和图像处理技术的进一步发展和普及,图像处理技术日益成为多源数据分析和综合的有力工具。

70年代后期至80年代初,各种多元统计分析方法开始应用于多源数据的图像综合中。加拿大著名数学地质学家 Agterberg^[38]、Chung^[39]、Kasvand 和 Fabbri^[31] 等将各种地质图件图像化,用于多元统计分析,进行找矿预测,并开展了“交互式地学数据多元统计分析系统”(SIMSAG)^[39]和“地质图像分析程序包”(GIAPP)。SIMSAG是一个具有图形输入输出的地质多元统计分析程序系统,可对地质图形按逐个像元进行主成分分析、判别分析和回归分析。GIAPP是用以处理地质图和岩石薄片图像的软件,具有二值图像的逻辑运算、空间运算功能^[31]。这些发展标志着图像综合由目视综合向解析综合阶段的飞跃。

80年代,特别是1983年以来,地质勘查数据图像处理与综合在世界范围内得以迅速的发展。加、美、澳、芬兰、丹麦、西德、法、英、荷、挪威、印度等国陆续开展了研究工作。广泛将特征分析、因子分析、聚类分析、相关分析、判别分析、相似分析等多元统计方法以及叠置分析、空间分析、邻域分析、结构分析等空间数据分析方法应用于多源地学图像的分析与综合中。发展了“人工视差立体像对”、“色度空间变换”和“空间共现指数”等物理意义更明确的综合图像显示方法。在地质分析和找矿勘探中,取得了明显的成效。美国 EROS 数据中心在犹他州-科罗拉多州的油气勘查中,建立了 1:250000 Vernal 图幅的,包括 MSS、航磁、航放、重力、水系沉积物地球化学和地质等数据的空间数据图像集,用聚类分析、主成分分析、邻域分析、布尔运算等方法对综合数据进行快速评价,建立了区域油气评价的数字模型^[40]。芬兰 Outokumpu 勘探公司在冰蚀前寒武地质区,应用陆地卫星、航磁、电磁、重力、 γ 能谱和地形数据的综合图像处理和统计分析,增强有 Ni-Cu 矿床远景的铁镁质岩石异常,效果明显^[41]。丹麦技术大学 1984 年用彩色坐标变换方法综合显示陆地卫星、地球物理和地球化学数据^[42]。加拿大 DIPIX 公司采用膨胀数据点的办法有效地分析了地球化学等不连续数据之间的空间关系^[43],用位运算形成空间共现指数的方法描述多种元素空间的共生组合特征^[44]。

随着数字图像处理和综合技术的飞速发展,空间图像分析与空间数据库和空间信息系统相结合,发展了多种基于栅格数据的地理信息系统和空间数据库系统。典型的用于地质勘查的信息系统如加拿大地调所矿产资料部所发展的微机“空间数据分析系统”(SPANS)^[45]。系统采用四分树结构,可对空间数据进行叠置分析和空间分析,用基于多边形的证据模式(evidence model)确定各变量的权系数,计算具有均一条件(unique conditions)的各多边形的找矿概率,建立找矿模型^[46]。在 Nova Scotia 的金矿勘查中,取得了很好的效果^[47]。

在数据的智能综合方面,斯坦福研究所(SRI)在1970年发展的“勘探者”专家系统

(PROSPECTOR) 用推理网络表达矿床勘查的专家知识。该系统主要为勘探工作设计的, 其最终的输出是单个的概率或有利度值。在其后的发展中, 在钻孔位置选择方面采用图形输入和图像输出, 对输入图形的各个像元, 应用推理规则, 输出有利度图像。近年来, 国际数学地质学会主席 Mc Cammon 博士对 PROSPECTOR 作了进一步发展, 运用图形图像信息指导系统的应用^[48], 但仍没有把图像数据作为一种区域化变量对待, 从而没有能用图像的方法表达成矿有利度在区域上的变化。在此基础上, 加拿大地质调查所 Bonham Carter 将 PROSPECTOR 模式应用于地理信息系统^[49], 在加拿大雪湖绿岩带火山型块状硫化物矿床勘查中, 运用四叉树结构的空间信息系统管理数字化区域地质图件, 将地层、蚀变带等证据表示成二值图像, 对断层、褶皱轴、化探异常等线状或点状数据用空间分析方法形成不同距离的空间走廊, 并用线性变换方法将距离转换成成矿有利度图像 (0—1)。根据发表的 PROSPECTOR 推理模型, 用前向推理网络计算全区的成矿有利度, 输出成矿有利度图像。从而将人工智能方法与图像分析更紧密地结合起来。

国内将图像处理技术用于非遥感图像的地质数据处理亦始于地震勘探, 1981—1983 年, 地矿部石油物探研究所和西北大学物探教研室协作, 用图像处理技术显示和处理三维地震切片。石油勘探开发科学研究院遥感所 1983—1985 年在 I²S 101 系统上开展油气资源评价研究, 发展了图形数字化、曲面生成和地质多元统计分析等程序, 建立了“油气资源评价系统”^①。同一时期, 中国有色金属总公司北京矿产地质研究所与桂林冶金地质学院等单位合作, 开展了“图像数据库在大厂、平桂地区锡矿预测中的应用研究”, 将图像处理技术用于航磁和重力数据的处理以及多源数据的综合上^②。1984 年, 桂林冶金地质学院物探系学生完成了以物探图像处理为内容的毕业论文。1985 年初, 地矿部遥感中心以铜陵地区为试验区, 开展了 MSS 图像、地质矿产图、航磁、航放和化探异常图等图像综合方法研究, 对铜陵地区的地质构造格局、岩体分布和成矿规律都取得了很多认识。在中国地质学会遥感地质专业委员会 1985 年学术讨论会和 1986 年北京国际遥感学术讨论会这两次会议上, 地矿部遥感中心和有色北京矿产地质研究所都分别宣读了题为《遥感信息和其它地学数据的综合图像处理及其在地质找矿中的应用》和《综合地学数据图像分析技术在锡-多金属找矿预测中的应用》的论文。

从 1986 年起, 地矿部、核工业总公司、中科院以及各有关地质院校、研究所等陆续开展了系统的研究工作, 取得了很大的进步, 发展了一批处理软件, 使我国的地质勘查数字图像处理从早期的试验阶段进入实用化阶段, 并在许多地区的实际找矿应用中, 取得了明显的成效。在技术方法和应用上, 赶上和接近世界先进水平。

但是, 图像处理技术在地质学领域内, 无论是遥感图像处理, 还是其它非图像资料的处理, 大量应用的仍以图像增强方法为主, 即通过处理提高图像的视觉效果, 为目视解译提供更直观更形象的图像。在非图像处理领域中, 特别是航空物探数据的处理, 虽然大量采用了数字图像处理方法, 但基本仍仅把图像作为结果数据的一种表达方法和图示方法, 如彩色异常图和阴影图等, 或应用一些简单的处理方法, 如灰度扩展和方向滤波方法, 增强场值的区间变化特征、梯度特征和边界特征。图像表达和图像叠合虽然改善了数据的表

① 石油勘探开发科学研究院遥感所, I²S 101 图像处理系统软件开发成果汇编, 1986 年 8 月。

② 中国有色总公司北京矿产地质研究所等, “图像数据库在大厂、平桂地区锡矿预测中的应用研究”科研报告, 1985。

示,增强了微弱信息和背景信息,提高了信息表达的视觉效果和图像叠合的效率、灵活性,但都未能充分发挥图像处理技术在特征信息提取和识别方面的作用,即未能充分注意应用图像处理和分析方法,从原始数据中提取目标地质体的关联信息。如何紧密结合地质分析和矿产勘查的需要,在地质成矿理论的指导下,根据地质学各专业的特点,探求用图像处理方法实现观测场—特征标志—场源特征的两大转换或关联,应是地质勘查图像分析和综合方法深入发展中必须解决的关键问题。

四、地质勘查数字图像分析与综合原理

地质勘查数字图像分析与综合是应用数字图像处理技术,对地质勘查领域中有关数据和资料进行处理、分析、综合和表达,从这些数据和资料中最大限度地提取目标地质体或地质现象的有关信息。它既不同于一般的数据处理,也不同于一般的图像处理。它是要在地质成矿理论指导下,以数字图像处理技术为手段,密切结合地质各专业学科的特点,对观测资料进行分析、综合和演绎,揭示场源地质体的空间特性和物理特性。

目标地质体往往是隐伏的,可观测的是地质活动在地表的形迹或地质标志场的特性。地质过程往往又很难用实验手段进行模拟。因此,解决地质问题的命题一般有两种方式,一是“正向命题法”即“正演法”,先提出假说或某种立论,然后以实际观测结果与之对照,再修改立论,直至取得能自圆其说的结果为止。第二种方式是根据地面观测结果进行相应的推断和解译,即所谓的“反向命题法”或“反演方法”。由于场的空间叠加性、等效性及地表干扰因素的影响,地表观察结果不仅与目标地质体的特性有关,还与地质体所处的环境及各地质体的空间组合有关,观测场中既包含有目标地质体的信息,还包括有背景场和干扰场的信息,从而使“反演”具有不同程度的不确定性。因此,必须对观察场进行分析、加工、比较、分解、综合和演绎,借助于数学分析和处理,实现场的分离,提取地质指示标志特征。这是地质数据处理的根本任务,也是地质数字图像分析和综合的关键性问题。即要通过处理,实现两种转换。一是原始观测数据—地质指示标志的转换,其二是地表场的特性—场源地质体特性的转换。

地质勘查数字图像处理和综合大致分为以下几个步骤。

1. 资料的预处理、图像化和综合地学图像集

对原始观测数据按其性质作必要的变换、筛分、可疑值剔除、缺省值补齐、误差和畸变的消除、背景值或环境因子校正等,然后将非图像形式的数据通过数字化、网格化和量化的方法转换成图像的形式,再经过镶嵌和配准,形成在统一地理坐标系下互相匹配的综合图像数据集。

2. 地质勘查各专业图像的处理、分析和特征信息提取

遥感图像处理中大多数行之有效的图像表达、增强和分析方法,如彩色显示技术、反差扩展、边缘增强、定向滤波、比值和 K-L 变换等,都适用于地球物理和地球化学等专业的图像。但是,不同的地质资料反映的是地质体某一方面的物质属性,这些资料的表现方法各异,数据的空间分布和数学分布特征亦不相同,因此,数据的处理方法也有各自的特殊性。地质学各学科在其自身的发展中,都形成了一套比较成熟的数据处理和表达方