

多（高）光谱遥感蚀变信息多层次分离技术的探讨与实践

张远飞
(有色地调中心)

一、遥感矿化蚀变信息提取的基本研究思路

基于遥感信息的物理机制和岩石矿物的光谱特征,以信息论的观点分析遥感图像中的地质信息特征,可以得到这样的认识:一切地表物体都是信息载体,地表信息直接或间接地反映了一定深度以下地质(矿化)作用过程的相关信息;各种信息载体之间(同类或不同类)都可能存在信息差异。遥感矿化蚀变信息的提取是基于这样的假设,首先,研究区客观上应该存在着矿化蚀变的成矿地质背景;其次,矿化蚀变信息在遥感图像上至少应有“微弱反应”。

在实际工作中发现,尽管理论上蚀变岩石矿物的光谱特征非常明显,但是由于它们所含蚀变矿物光谱特征的谱带与现有多波段光谱遥感数据的光谱分辨率相比太窄,同时蚀变矿物在所研究的地物对象中也总是“小类”,加上其它地物光谱的干扰与混合,因此,矿化蚀变信息在遥感图像中的表现总是“微弱”的。由此表明遥感矿化蚀变信息的提取具有相当难度。基于遥感图像提取矿化蚀变信息的技术方法研究,主要是求解两个方面的问题,其一,研究矿化蚀变信息在光谱空间的“聚类结构和可识别性”,揭示矿化蚀变信息与非蚀变岩石、土壤及植被等“背景”及干扰信号是以什么结构与关系共存于遥感图像的光谱空间中,即它们在光谱空间的各自“聚类体”的结构形态特征、空间展布关系以及它们边界的交叠程度等;其二,研究如何对客观存在的矿化蚀变信息进行增强与提取的物理模型与数学方法模型。具体是要解决如下几个技术关键问题:

(1) 根据遥感图像数据的总体统计特征,分析并检测工作区是否客观存在“矿化蚀变异常”?

(2) 分析工作区的矿化蚀变类型,以及各种矿化蚀变信息在遥感图像上的光谱特征。

(3) 研究工作区非蚀变岩、植被和土壤等各种背景及干扰地物在遥感图像上的光谱特征。

(4) 揭示矿化蚀变信息与背景及干扰地物信息在光谱空间的“聚类结构和可识别性”,以及不同矿化蚀变信息的可分性。

(5) 根据成矿地质分析、光谱特征分析和多元数据分析选择提取矿化蚀变信息的最优波段或变量组合,建立不同蚀变类型的遥感信息提取模型;

(6) 总结和设计出用于增强与提取矿化蚀变信息的方法技术;

(7) 矿化蚀变信息异常图像的可视化表达方法。

上述一些难点与技术关键问题可以做如下两个方面的转化:

(1) 把遥蚀变信息的检测与提取转换成对背景与干扰信息的多层次分离过程,即通过多次分离背景或干扰,最后使“蚀变异常”能够“水落石出”。

(2) 在遥蚀变信息的检测与提取中,关键是把遥感图像中的背景、干扰与蚀变异常三个主要对象以及它们之间的关系研究分析清楚。

二、“遥感蚀变信息多层次分离技术”的基本构架

自上世纪九十年代中期以来,我们在充分地总结了国内外有关遥感蚀变信息提取方法技术的基础上,通过在实践中不断探索研究与完善,逐步发展并形成了一套较为系统、规范和有效的方法技术体系,即“遥感蚀变信息多层次分离技术”。

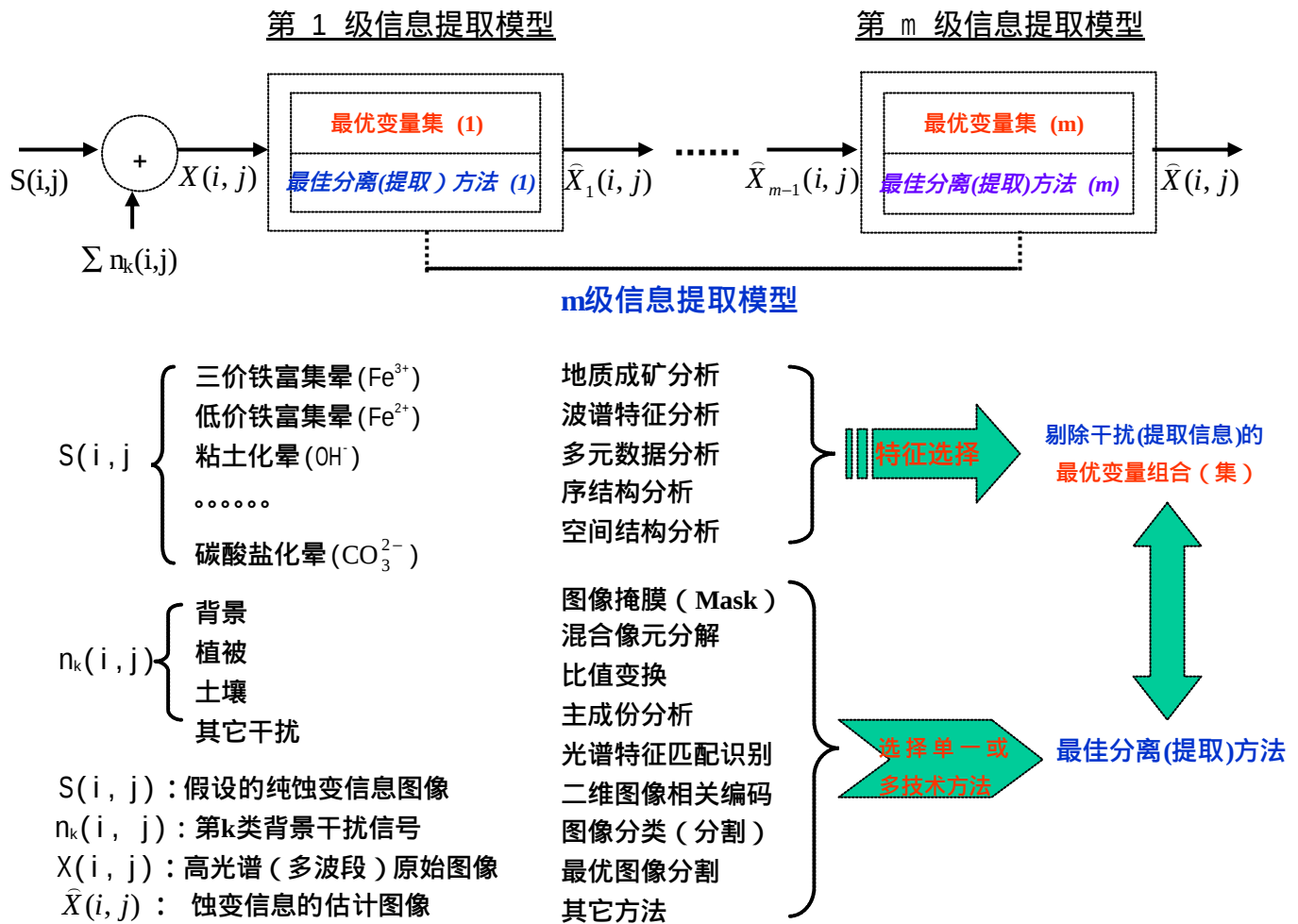


图 2.1 遥感蚀变信息多层次分离提取技术模型

图 2.1 是我们总结出的遥感蚀变信息多层次分离提取技术模型。这里把遥感原始图像 ($X(i, j)$) 看成是由假设的纯蚀变信息图像 ($S(i, j)$) 与各种累积的干扰信息 ($\sum n_k(i, j)$) 叠加而成, 我们的最终目标是通过剔除或压抑一切背景与干扰信号而求取包含蚀变信息的估计图像 ($\hat{X}(i, j)$)。 “遥感蚀变信息多层次分离技术” 的主要思路是: 当遥感蚀变信息属 “强信号” 时, 可直接予以提取或增强; 而当遥感蚀变信息属于 “弱信息” 不易直接提取时, 基于 “背景” 和 “干扰信号” 通常属于 “强信息” 易于识别这样一个客观前提, 可把遥感蚀变信息 (“弱信息”) 的提取 (或增强) 转换成对遥感图像的 “背景” 和 “干扰信号”

的一次次剔除，即通过对“背景”和“干扰信号”的多层次分离，达到“蚀变信息”能“水落石出”的目的，最终实现蚀变信息（即“弱信息”）的增强与提取。

图 2.1 的技术模型还表明，每一次遥感蚀变信息的直接提取，或者“背景”和“干扰信号”的剔除，其关键的问题就是“最优波段（变量）组合”和“最佳分离（提取）方法”的选择。所以，整个遥感蚀变信息提取的过程就是不断寻取“最优波段（变量）组合”和“最佳分离（提取）方法”的过程。

这个技术框架整体上主要由 1) 特征变量选择与组合技术体系；2) 蚀变信息检测技术体系；3) 干扰因素剔除技术体系；4) 蚀变信息提取核心方法技术体系等几大技术体系作为支柱构成。

地物波谱理论、遥感图像处理方法、GIS、多元数据统计分析和非线性、复杂性理论等理论方法技术是这几大技术体系的重要理论基础。

三、基于光谱数据空间结构分析的背景、干扰与蚀变异常研究

在不同自然景观区的遥感蚀变信息检测中，蚀变异常、背景与干扰是三必须研究的主要对象，其中，背景与干扰是两个复杂而又容易混淆的研究对象。本文结合光谱混合模型理论与随机变量概率分布相关理论，深入地分析了遥感图像光谱数据的空间几何结构特征（重点剖析二维散点图），比较系统地研究了背景与干扰的关系、复杂度，以及干扰地物类型的划分等问题。这些问题的探讨为遥感蚀变信息检测的最佳方案设计、蚀变信息潜在性评价以及蚀变信息的准确提取提供了比较重要的技术思路。

3.1 光谱数据空间的几何结构特征分析

遥感的多（高）光谱数据是一种多元数据集合，每一个像元代表的是一个波谱矢量。所以，图像多元数据集合在高维空间中形成一个点阵，这个空间点阵具有一定的几何结构。

多（高）光谱数据集合属高维空间中的点阵，高维空间的点阵几何体形态是无法直接观测的。但是，从低维空间入手，通过分析二维（两个波段）、三维（三个波段）数据的散点图，可以来探讨高维情况下的数据点阵的结构及在空间中的聚类分布特征。

这里以图 3.1 为例来说明光谱数据的二维散点图所包含的丰富信息：

（1）二维散点图又称二维直

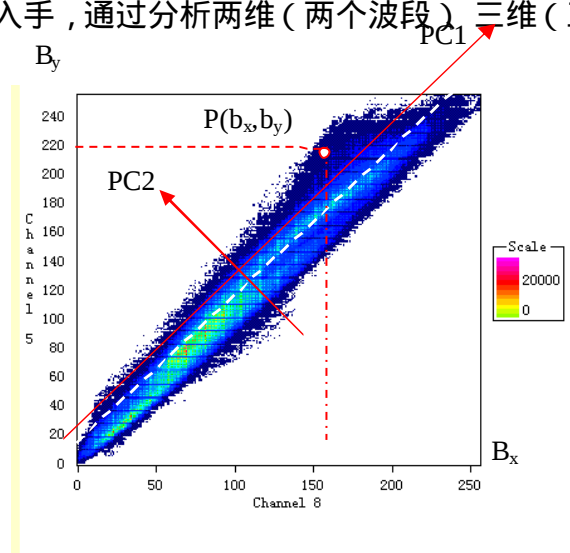


图 3.1 光谱数据的二维散点图

方图，它是两维变量（波段）联合概率密度分布的几何表达，反映了二维变量数据空间的聚类结构；

（2）二维散点图也是两个变量主成分分析的几何解释，其中 PC1 为第一主成分轴，PC2 为第二主成分轴。对于多波段（三波段以上）主成分分析，比如 Crosta 定向主成分分析法，可以通过多个二维散点图的观测去重构脑海中的高维光谱数据点阵几何结构；

（3）若约定图形坐标系统的 B_x （横坐标）表示具有吸收峰的波段，比如 TM1 或 TM7，而 B_y （纵坐标）表示具有反射峰的波段，如 TM3 或 TM5。则根据几何意义，坐标平面内的点 $P(b_x, b_y)$ ，位于对角线（见图形中的白色虚线）上方的数据点，必定有 $b_y > b_x$ ，即 $\frac{b_y}{b_x} > 1.0$ ，反之，对角线下方的点，必定有 $b_y < b_x$ ，即 $\frac{b_y}{b_x} < 1.0$ 。所以，根据光谱特征的物理机制和上述约定，只有位于对角线上方的点才有可能满足“蚀变异常”的基本条件；

（4）对于比值运算，例如，TM3/TM1，则等同于 TM3 为 b_y ，TM1 为 b_x ，且有 $\frac{TM3}{TM1} = \frac{b_y}{b_x} = \tan \theta$ ，这里 $\tan \theta$ 为坐标平面点 $P(b_x, b_y)$ 与原点 $P(0, 0)$ 联线的斜率。

基于二维散点图的上述重要性，所以，它将作为对图像光谱数据空间几何结构特征分析的重要技术手段。

3.2 光谱数据空间的低维结构与几点重要的推断性结论

综合应用光谱混合模型理论、多元数据统计分析、图像统计模式识别和信号检测与估计理论思路，比较深入地研究分析了不同自然景观区遥感多波段光谱数据空间的几何结构特征。并由此得出几点重要的推断性结论：

（1）遥感多（高）光谱数据集具有低维的空间几何结构，而且是一个超椭球体（实际上为近似的超平面）。

（2）通过对真实数据的分析得知，由于异常点的数量总是所占比例很少，所以，光谱变化主要是由背景端元的组合产生的，即超平面的主体是由背景端元形成的空间。

（3）由于蚀变异常点的光谱与背景端元的光谱是相互独立的，因此蚀变异常点不会落在超平面内，而会游离在超平面之外。

（4）超平面的维数近似于本征维数。端元的数目等于本征维数加一，且端元数目等于主要背景地物的种类数。本征维数可由主成分分析近似估计得到。

这些结论（推断），对于蚀变异常检测算法的设计、异常的解释、混合像元分解的端元提取、背景地物种类的估计等具有非常重要的指导意义，为蚀变信息的检测与提取提供了比较重要的理论依据。

这些结论最重要之处是揭示了异常信息点群游离在超平面（背景）之外。在二维的情况下则异常信息表现为游离在椭圆（背景）边界的外部，参见图 3.2。

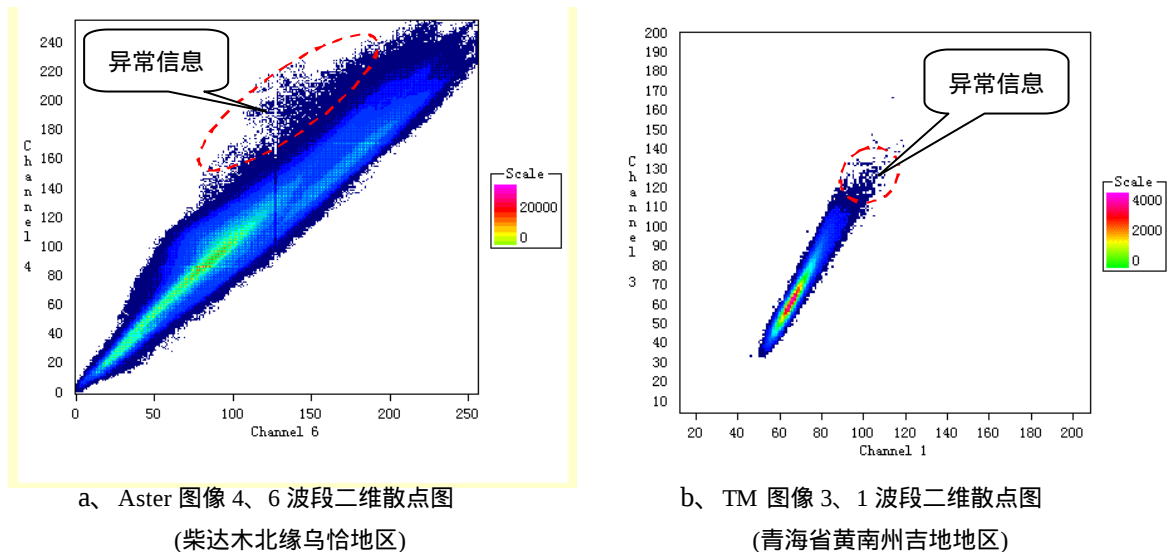


图 3.2 异常信息游离在背景空间之外
(异常信息在背景椭圆的边界外部)

3.3 遥感图像中蚀变异常、背景及干扰之间的关系及复杂度研究

基于光谱数据的空间分布与聚类结构，研究了遥感图像的蚀变异常、背景与干扰三种主要对象的界定及它们之间的复杂关系。一些重要研究结果归纳如下。

1) 光谱变化是由少数几大类主要地物的光谱混合所描述。就全局而言，遥感图像的主要光谱变化能够被土壤、岩石地层、绿色植被和暗色地物等四大主要地物的光谱线性混合所描述，同时发现，遥感图像 98% 以上的光谱变化能够在三维光谱混合空间中予以表述，甚至于 90% 以上的光谱变化可以在混合光谱空间的二维投影中给予描述。

2) 背景、干扰与蚀变异常的基本定义。背景是指图像中的一种或是多种主体地物的光谱特征所反映的综合信息。在一维直方图中的高频数的像元集合属背景；在多个波段（二个波段以上）数据之间呈现高相关特征的像元集合为背景。干扰和蚀变异常都属于异常信息，所不同的是蚀变异常为需要提取的目标异常信

息，而干扰则是要排除的非目标异常信息。

3) 遥感图像的光谱数据空间的基本分布特征。在研究中发现，一个地区的遥感高(多)光谱图像若没有“大类”干扰地物的影响，则任意两个波段或三个波段生成的散点图基本上都是呈线性分布式(又称单椭圆式)的，如图 3.3 的二维散点图，图 3.4 的三维散点图。而一旦存在某一主要干扰地物，例如积雪、云团、植被等，就会出现如图 3.5 的非线性分布式的奇变二维散点图，又称双椭圆式散点图，其中主椭圆为“背景”椭圆，次椭圆为“干扰”椭圆。有趣的是，除上述这两种形式的散点图之外，更复杂形式的散点图几乎很少见。这些现象表明，看似变化多端的遥感图像形式其光谱数据空间的基本分布特征并不复杂。

Channel 1 versus Channel 2

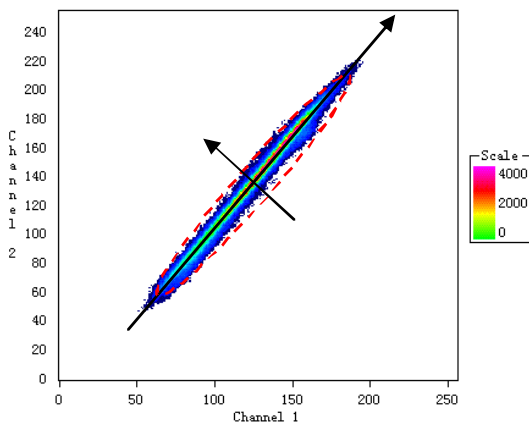


图 3.3 TM2、TM1 二维散点图 ($r=0.98$)
(青海省巴音山地区)

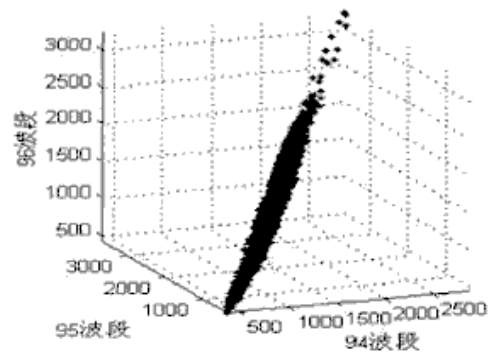
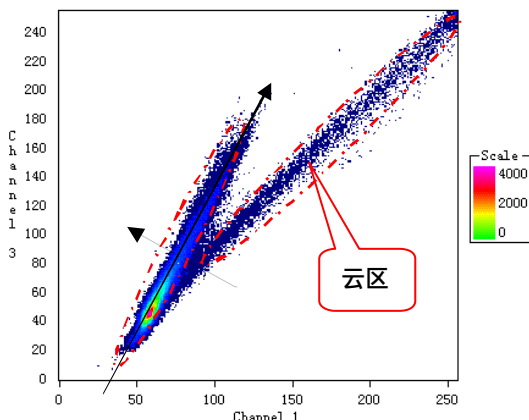


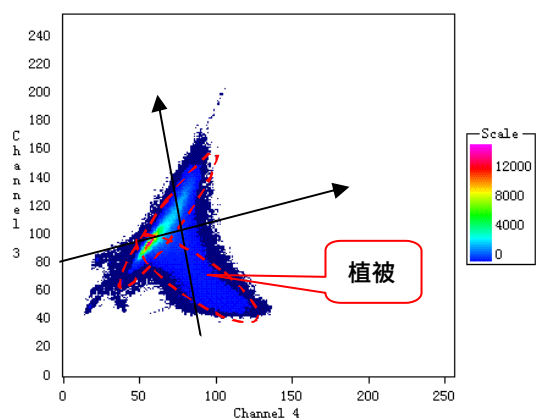
图 3.4 高光谱数据的三维散点图
(引自李智勇)

Channel 1 versus Channel 3



a、TM3、TM1 二维散点图 ($r=0.95$)
(青海黄南州加吾乡地区)

Channel 4 versus Channel 3



b、TM3、TM4 二维散点图 ($r=0.06$)
(内蒙古前他克吐地区)

图 3.5 图像受到干扰影响的二维散点图

4) 干扰因素类型的划分问题。除了按地物名称分类干扰因素(如植被覆盖、地表土壤、水体、阴影区、戈壁荒漠区、云团(含阴影)、积雪区、雾等)之外。我们提出了另外四种干扰因素类型的划分方法:

第一种分类,是按干扰地物的特征谱带(即反射峰或吸收谷)的强弱程度来划分,分成强、中、弱三种。例如植被、积雪属强特征谱带,水系属中等特征谱带,而由水系或阴影与背景地物光谱混合的像素集合属弱特征谱带。

第二种分类,是按干扰地物在遥感图像上的分布形式来划分的。一种是分散型的,如低山地区的阴影、树枝状水系等就属于此种类型;另一种是聚集型的,例如,积雪、云团等。

第三种分类,可分为阻挡型和混淆型。其中“阻挡型”同第二种的聚集式相近,指下覆的岩石信息完全或大部分被屏蔽,处理时只有将其剔除。“混淆型”的干扰如土壤、冲积层等,需要认真对待,从中分离出异常信息。

第四种分类,是按干扰地物来源划分的,可把干扰分为外源性干扰与本源性干扰。外源性干扰指干扰地物是来自或属于地球外圈层(指大气圈、水圈与生物圈三个圈层)的地物,主要有积雪、云团(含附带的阴影)、雾、水体等。本源性干扰,指干扰地物属于岩石圈(属地球内圈层)或产自于岩石圈的地物,主要包括戈壁荒漠区、土壤、阴影等。

这里需要特别强调以下,植被是一类光谱特征显著而又比较特殊的地物。从植被的生长来说,它产自于地表土壤,吸收土壤的养分,同时又与太阳光发生光合作用,从中获取能量。所以,属于生物圈的植被,主要表现为外源性干扰地物特征,但有时又会秉承土壤呈现出本源性干扰地物的某些特征来。

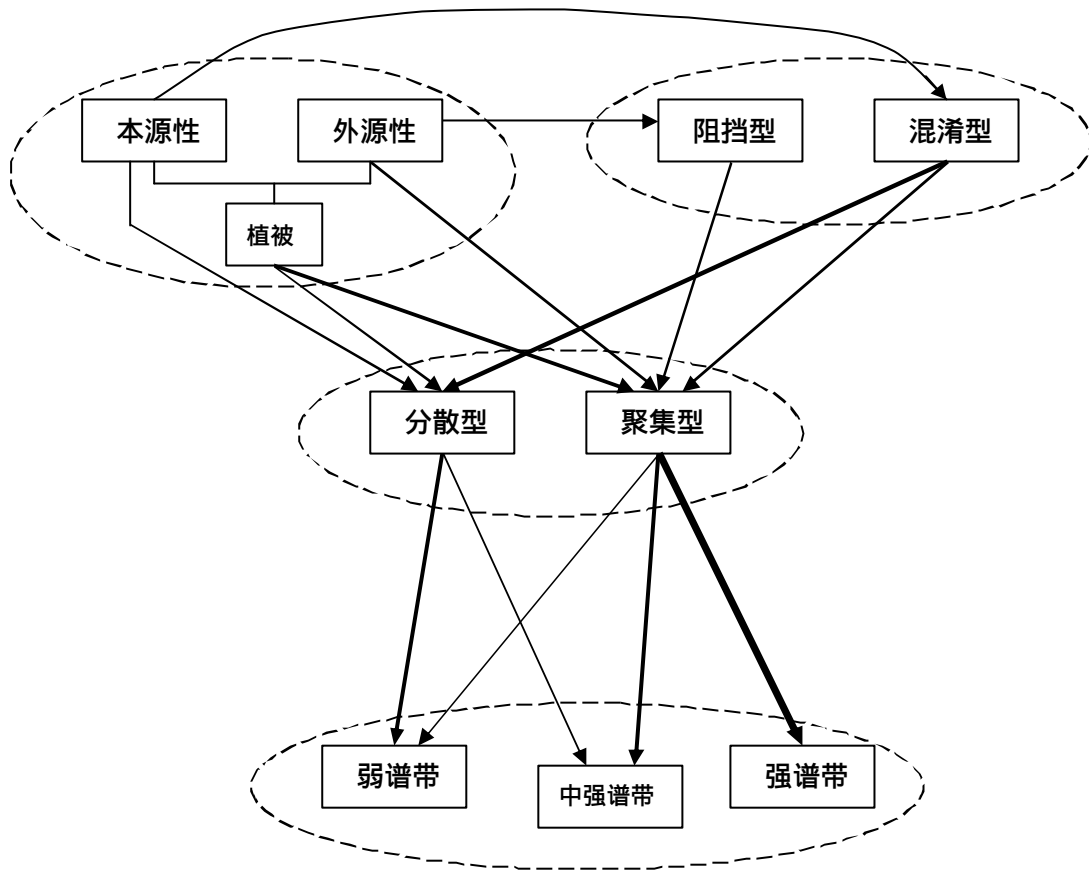


图 3.6 干扰因素四种分类体系之间的网状关系
(图中一对多时箭头线的粗细代表了可能性的大小)

5) 干扰或蚀变异常在光谱数据空间分布中的定位问题。上述四种分类体系提供了从不同的角度去观察与分析各种干扰因素。但它们并不是相互独立,而是彼此有叠合的,总结梳理这四种分类体系会得到如图 3.6 的网状关系图。该图反映了按干扰地物的分布形式的划分方法(第二种分类)能把其它分类方法同第一种分类方法,即按特征谱带的强弱程度分类联系起来。换言之,只需应用第一、第二种分类体系就能很好地刻画干扰因素的基本特征。有趣的是,第一、第二种分类体系也可推广到对“蚀变异常”目标的分类。而且,通过第一、第二种分类体系,能把干扰因素或蚀变异常同光谱数据空间分布图建立起关系,有利于在二维散点图上定位这些干扰信息。表 3-1 给出了不同干扰或蚀变异常在光谱数据空

间分布（二维散点图）中的形态与定位。

表 3-1 不同干扰或蚀变异常在二维散点图中的形态与定位

分布方式 干扰特征		分散型分布		聚集型分布		
		弱谱带	中强谱带	弱谱带	中强谱带	强谱带
“干扰” 椭圆	是否出现		植被类会出现“干扰”椭圆		会出现“干扰”椭圆	会出现“干扰”椭圆
	所处位置		枝生于“背景”椭圆一侧			枝生于“背景”椭圆一侧
“干扰” 或 “异常” 聚类	是否出现		出现“干扰”或“异常”聚类		出现干扰或异常聚类	
	所处位置		位于“背景”椭圆短轴两侧边界附近		枝生于“背景”椭圆一侧	
“干扰” 或 “异常” 点群	是否出现		出现“干扰”或“异常”点群	出现“干扰”或“异常”聚类		
	所处位置		位于“背景”椭圆长轴方向两端附近	位于“背景”椭圆短轴两侧边界附近		
“混入”背景		大多“混入”背景				
说明：“干扰”椭圆、“干扰”聚类、“干扰”点群都是指干扰产生的聚类形态，它们的差别主要是大小与结构不同。这里“干扰”椭圆最大，与“背景”椭圆大小相近或稍小，形态近似椭圆；“干扰”聚类的大小应较“干扰”椭圆小很多，形态成形，但不一定是椭圆；“干扰”点群除了大小比“干扰”椭圆小之外，主要是形态上不太规则且点群较离散。 分散式分布的干扰或异常，由于受背景光谱混合的影响，除植被之外，大多数情况下是出现在“背景”椭圆长轴方向两端上的“干扰”点群；只有少数会在“背景”椭圆短轴一侧出现“干扰”聚类。 表格中的“异常”是指“蚀变异常”。蚀变异常特征同干扰特征类似，唯一不同的是几乎不会出现类似于“干扰”椭圆的“蚀变异常”椭圆，最多出现“蚀变异常”聚类。这是因为蚀变异常很少具有那么强的特征谱带。						

为了理解表 3-1 的内容，可以看一些实例。图 3.5 的两幅二维散点图分别是由云区与植被引起的“干扰”椭圆；图 3.7 中的积雪区属于“干扰”聚类；图 3.2 两幅图中的异常信息区属“异常”点群（这里面还含有干扰地物）。

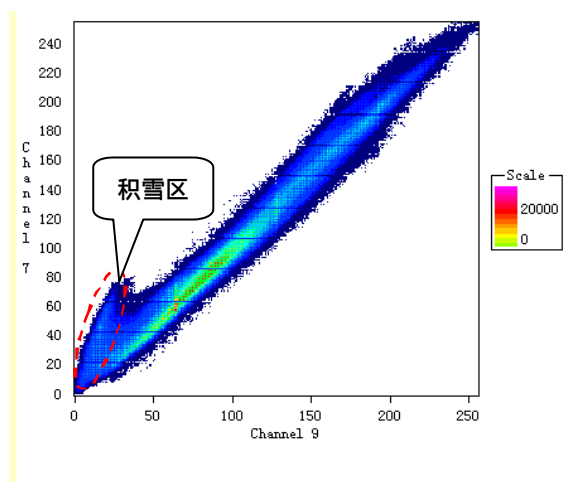


图 3.7 Aster 图像 7、9 波段二维散点图中的“干扰”聚类（见积雪区）
(柴达木北缘乌恰地区)

基于上述干扰因素的分类体系与定位规则,我们分析了不同自然景观区图像中各种背景与干扰地物对遥感蚀变信息提取的影响问题。初步认定,对遥感蚀变信息提取影响最大的干扰地物首推植被覆盖,其次是水系(包括干沟),其它依次为云区(含阴影)、积雪区、阴影区、戈壁荒漠区等。

3.4 基于遥感图像蚀变信息提取的二维散点图的分类体系

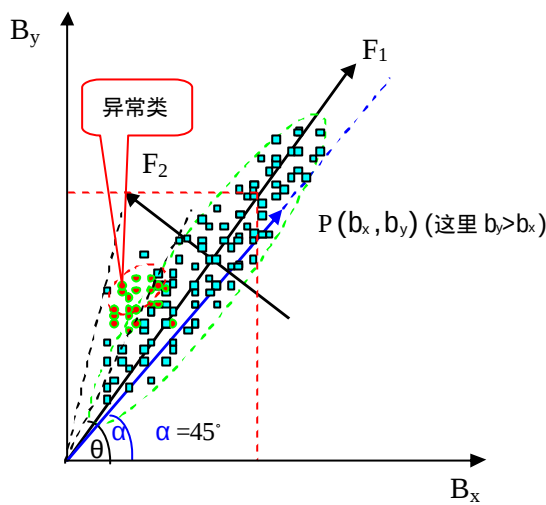
基于上述讨论的光谱数据空间的几何结构特征分析方法与 3.2 节给出的几点推断性结论,通过系统分析研究不同自然景观区遥感图像的二维散点图的几何特征,基于物理意义与统计意义,对自然景观区遥感图像提出了二维散点图的分类体系,并在分类体系基础上,初步给出了不同自然景观区图像蚀变信息提取的解决方案。

1)、类型 1: 散点椭圆大部分在对角线上方且异常落在椭圆左半区的边界上

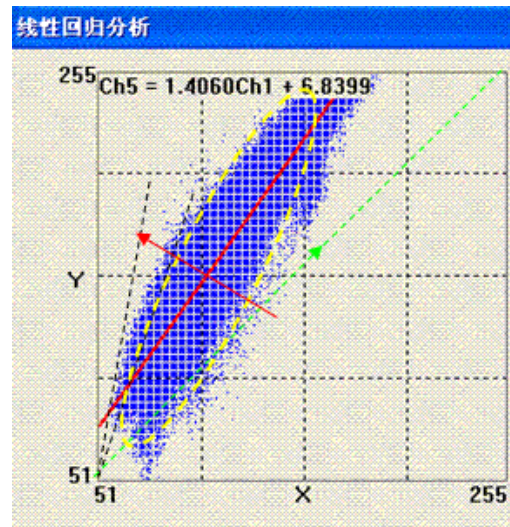
参见图 3.8,无论自然景观区的地物多么复杂,类型 1 是某蚀变谱带波段对(如 TM3、TM1 组合或 TM5、TM7 组合)的二维散点图的重要类型之一。

当图像出现该类型的二维散点图时,基于物理意义,蚀变异常只能出现在椭

圆 F1 轴左半区的边界上。



a、抽象模型的二维散点图



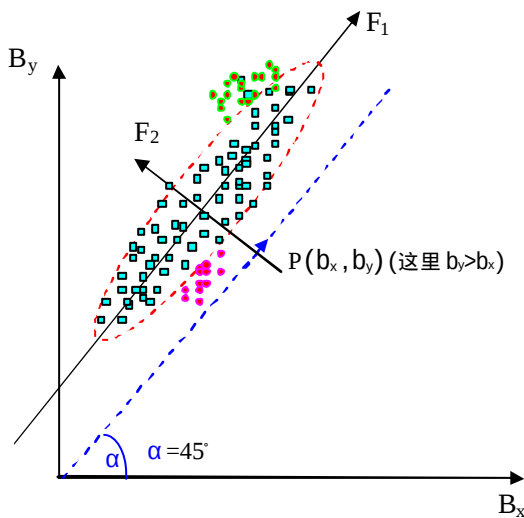
b、类型 1 的二维散点图实例

图 3.8 类型 1: 散点椭圆大部分落在对角线上方
且异常落在椭圆的第二象限区

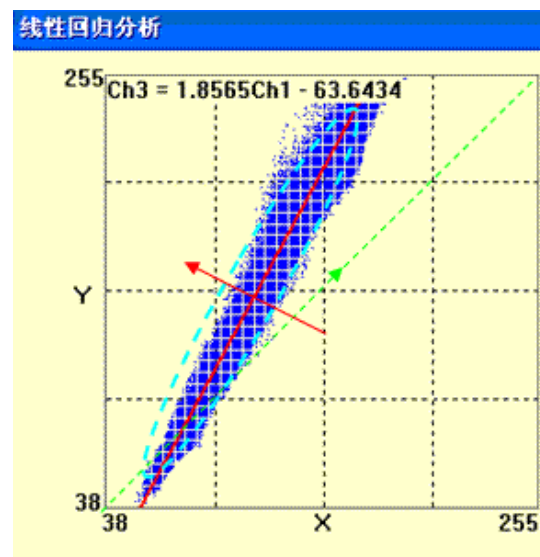
2)、类型 2: 散点椭圆全部落在对角线上方且椭圆的两侧均可能出现异常

参见图 3.9, 同类型 1 一样, 无论自然景观区的地物多么复杂, 类型 2 是某蚀变谱带波段对 (如 TM3、TM1 组合或 TM5、TM7 组合) 的二维散点图的重要类型之一。

在这种情况下, 我们基于物理意义, 提出了第二主成分 (PCA2) 的两个端点都认为可能存在蚀变异常信息的思想。



a、抽象模型的二维散点图



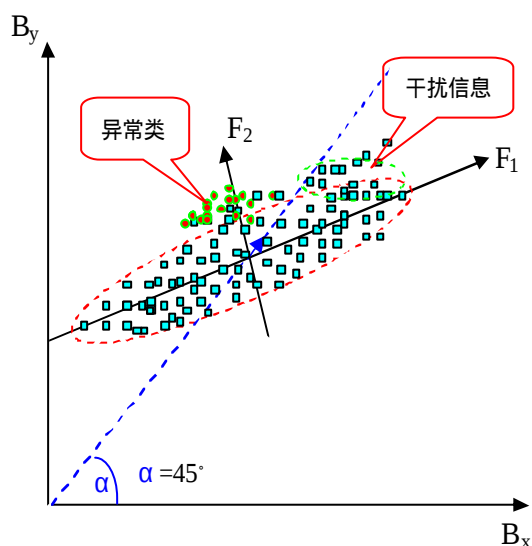
b、类型 2 的二维散点图实例

图 3.9 类型 2: 散点椭圆全部落在对角线上方
且椭圆的两侧均可能存在异常

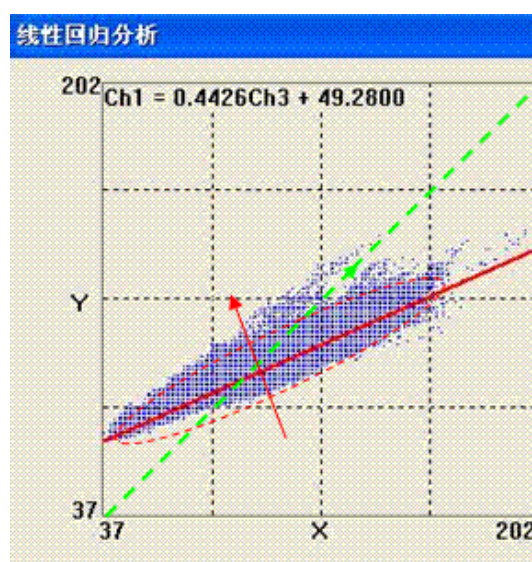
3)、类型 3: 散点椭圆与对角线交叉且椭圆一侧异常与干扰并存

参见图 3.10，同类型 1、2 一样，无论自然景观区的地物多么复杂，类型 3 也是某蚀变谱带波段对（如 TM3、TM1 组合或 TM5、TM7 组合）的二维散点图的重要类型之一。

这里必须注意分析可能存在的干扰信息，并采用增加波段的办法，设法把干扰信息剔除掉。另外，在这种情况下需注意，在对角线上方的椭圆第三象限的边界区也可能存在蚀变信息。



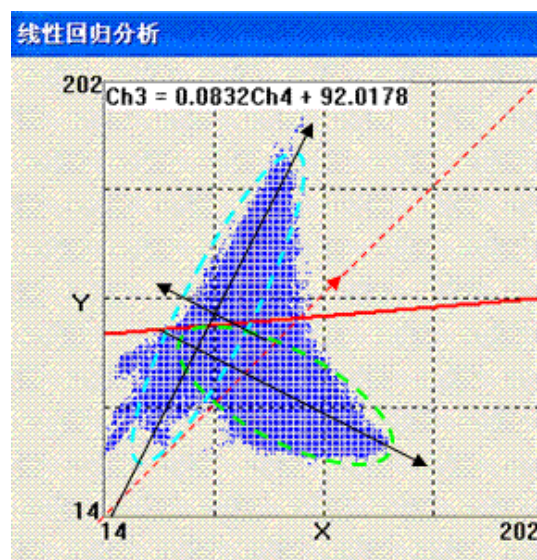
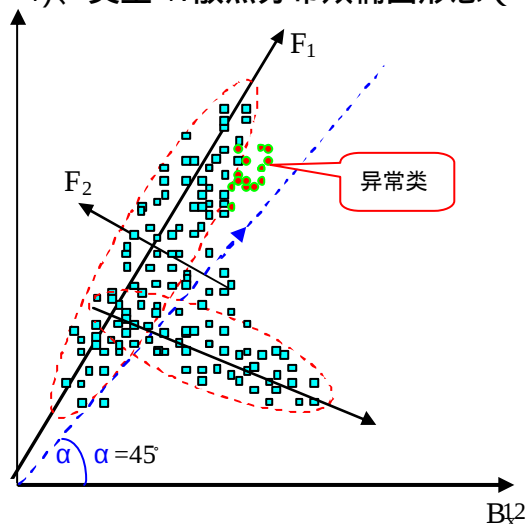
a、抽象模型的二维散点图



b、类型 3 的二维散点图实例

图 3.10 类型 3: 散点椭圆与对角线交叉且
椭圆一侧异常与干扰并存

4)、类型 4: 散点分布双椭圆形态 (“背景”椭圆与“干扰”椭圆)



a、抽象模型的二维散点图 b、类型 4 的二维散点图实例

一旦自然景观区含有占一定面积比例的植被覆盖区，且图像在 TM3、TM4 波段组合就一定会出现这种类型的“背景”椭圆与“干扰”椭圆相邻的一侧。其它波段同 TM4 组合的二维散点图也可能出现这种类似的类型，但形态一般没有这样典型。参见图 3.11。

这种类型是最复杂的，其提取蚀变信息也是较难的

5) 类型 5: 散点椭圆全部落在对角线下方

当图像出现如图 3.12 这种类型 5 的二维散点图时，可让我们得到如下判断：

(1) 对于多波段的 TM 图像，一旦图像的 TM3、TM1 组合的二维散点图出现类型 5 的情况，同时 TM3、TM1 组合，TM3、TM4 组合的二维散点图均出现类型 5 的情况，则可以从图像数据统计意义上判别该工作区无铁化信息存在；

(2) 上述三组组合有二组的二维散点图出现类型 5 的情况，则可以从图像数据统计意义上判别该工作区提取的铁化异常信息可信度下降；

(3) 一旦图像的 TM5、TM7 组合的二维散点图出现类型 5 的情况，则可以从图像数据统计意义上判别该工作区无泥化或碳酸岩化信息存在。

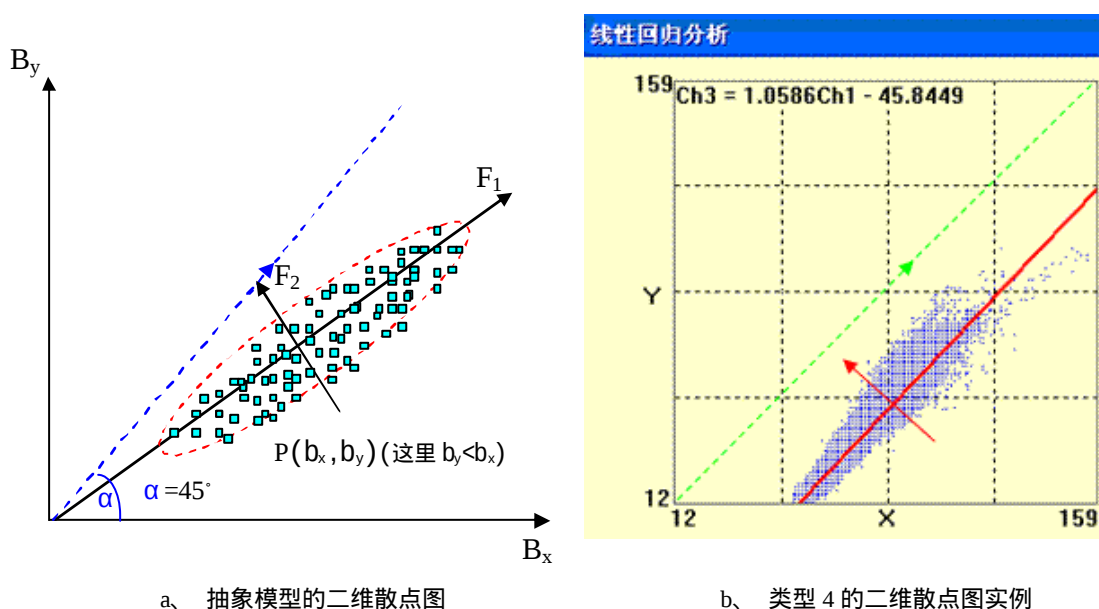


图 3.12 类型 5: 散点椭圆全部落在对角线下方

上述五种类型已经基本包括不同自然景观区图像可能出现的二维散点图的大多数情形，五种类型的每一种都有一些近似的变型，需要在实践中认真体会。

上面的分析都是以 TM 图像遥感数据为例的，对于其它高（多）光谱数据可

以照此类推。

对不同自然景观区图像二维散点图的这些分析研究，使我们感到纷繁复杂、多样的自然景观区，其图像光谱数据点阵的空间结构却比预想的要简洁的多，奇妙的多，一下子使蚀变异常信息的提取变得不是那样扑朔迷离，而是那般真实可见了。

研究分析中发现，一旦某些波段组合的二维散点图出现不规则的奇变，就可以肯定有较大的干扰因素在发生作用。遇到这种情况，首先，必须从光谱分析入手弄清干扰的地物是什么，而后寻求剔除干扰的方案。

四、高光谱数据的波段序结构分析

4.1 问题的提出

目前，遥感图像矿物蚀变信息提取的研究，已由单一的 TM/ETM 这样的多光谱数据逐步过渡到多数据源的综合运用，尤其是近年来，高光谱数据已经在其中扮演着十分重要的角色。

我们知道，高光谱数据属于细分光谱数据，其最大的特点是波段数很多，少则几十个，多则几百个，最大的优势是能够重建光谱与矿物标准光谱或实测光谱进行定量比对分析（故又称成像光谱数据）。所以，高光谱技术的兴起与发展，极大地提高了遥感对地的观测能力和对地物的识别能力，使遥感工作由图像分析转变为以谱分析为主的图谱结合模式。目前，对于高光谱数据有两种处理方式，其一是以重建光谱与标准光谱数据（或实测光谱数据）相似性度量为基础的光谱匹配方法；其二是把高光谱数据通过选择一些特征波段的办法，把它转化成多波段数据方式进行处理。在实践中我们发现，在没有干扰因素的情况下，由于重建的光谱同标准光谱比较相近或相似，因此，基于光谱匹配方法的应用效果还是不错的。但是，有些情况下对高光谱数据不能实现大气校正，其数据就无法重建光谱；另一种情况是受到背景或干扰地物较为严重影响的高光谱数据，其重建的光谱出现严重的“变形”。这两种情况都会导致或者无法应用光谱匹配方法，或者应用光谱匹配方法远不如转化为多波段数据方式进行处理的效果好。

那么，面对高光谱数据如此众多的波段数，如何才能根据识别不同地物的需求，筛选出最佳的波段组合呢？尤其在矿物蚀变信息检测与提取上，怎样寻找那些反映蚀变矿物波谱特征的重要波段或谱带呢？若在已知蚀变矿物或具备已知

区信息的情况下,通常的方法主要包括:1)基于光谱可分性准则的特征选择,如离散度、光谱距离等;2)基于光谱物理机制的特征选择,如分为可见光、近红外、短红外等波段子集;3)基于已知地物光谱特征选择特征波段。但在未知的工作区,方法1)与3)很难行得通,方法2)无法取得好效果。另外,矿物光谱特征谱带在一些因素干扰下会产生一定的位移与变异,这样也使基于光谱物理机制的方法选择特征波段带来一定的不确定性。

笔者把高光谱数据近似于连续的细分波段看作波段序列数据,在这里提出序结构分析的技术思想,结合光谱数据空间结构分析技术的一些重要思想,设计或改造其他方法得到了包括波段序列直方图、左(右)偏度参量分析、相关(似)矩阵分析和回归偏度分析等一些具体的方法模型。笔者在本文主要讨论应用波段序结构分析技术进行高光谱数据的统计特征分析与数据质量评价;对未知工作区是否存在蚀变异常信息的潜在性作出评价;重点讨论对于在没有已知信息的条件下如何进行高光谱数据的特征波段选择与矿物蚀变信息提取问题。通过对波段序结构分析技术在高光谱数据处理中的应用研究与实践,阐述这一技术思想的科学性与实用价值。

4.2 方法原理与数学模型

时间序列分析原属数理统计学的一个分支,它是研究随机过程的重要数学工具。该方法源于预测,特别是市场经济的预测。从广义上说,对于有序的随机数据的处理方法都可以说是时序分析。传统预测注重的是周期图分析与相关分析,即直接从时序计算其自协方差函数(或自相关函数),计算其功率谱(即自协方差函数或自相关函数的 Fourier 变换)等。而笔者强调的是序结构分析,即序列数据的结构形态特征与变化规律的研究。

序主要反映事物的组成规律和出现的顺序,单个事物或因素不存在序的概念。通常,序又有秩序之意,它表示自然界中客观事物总是以某种序列和结构出现。当系统序结构存在共同性时,系统之间出现相似特征。相似性大小随序结构共同性程度增大而上升,序结构共同性程度减小而下降。当系统的序结构相对稳定,则系统间相似性相对不变。系统间相似程度大小随系统序结构的变化而变化

^[13]。

我们知道,高光谱数据高达几十乃至几百个光谱渐变的细分波段可以构成波段序列数据,既然是序列,就必定存在结构信息。基于地物光谱的物理机制不难知道,波段之间的相似性大小主要取决于两个波段波长的相近程度与对地物的光谱响应差异程度。一方面,波段之间波长越是相近则越相似,波长越是相远则相似性越小;另一方面,两个波段对地物的光谱响应差异程度越小则相似性越大,对地物的光谱响应差异程度越大则相似性越小。由此不难设想,波段序列的相似性变化在地物光谱响应相对稳定的谱带区段应该是变化较少或渐变的,而一旦在地物光谱强响应的谱带区则会出现起伏较大的变化或突变,这时表明存在“异常”地物。因此,波段之间的相似程度大小决定了高光谱波段序列结构的变化规律。

基于上述原理,结合对高光谱数据研究分析得到的认识,我们提出下面一些方法模型来度量波段序列的序结构特征。

1) 波段序列直方图

一幅图像的灰度直方图是图像灰度级的函数,描述的是图像中具有该灰度级的像素的个数:其横坐标是灰度级,纵坐标是该灰度出现的频数(像素的个数)。通常称这样的直方图为一维直方图。一幅图像直方图包括了图像的很多统计特征信息,例如均值、众数、中值、方差、偏度、峰度等。它在多波段图像分析中可以把所有波段图像的直方图都显示或打印出来,加以对比分析。

但是,对于高光谱数据图像,由于波段太多,不可能这样做。所以,为了总体把握与分析高光谱数据图像的统计特征,我们提出了波段序列直方图的描述与表达:其横坐标(X轴)是波段序列(即波段序号由小排到大排列),纵坐标(Y轴)是辐射值(相当于灰度值),第三维(即Z轴)为辐射值出现的频数(像素的个数)。在可视化的表达上Z轴的频数采用彩色分级的方式予以表示(参见图2-1)。这样的波段序列直方图能够很好地总览与分析高光谱数据整幅图像所有波段光谱值的分布形态、背景区域、异常分布特征,以及各个波段的统计特征信息等。

2) 左偏度、右偏度参量分析

通过多年研究发现,高斯分布是最不值得关注的一种“无趣”的分布。而多峰特征的分布,或者说能展示一些聚类结构的分布,是远离高斯分布的。灰图直方图的峰度和偏度是衡量图像概率密度函数是否服从高斯分布的两个重要的统

计参量^[11]。尤其是偏度用途更明显，但是，偏度参量对于非高斯分布的图像概率密度函数形态的细微差别反应并不显著。为此，我们又提出了左偏度与右偏度两个重要统计参量。它们的表达式如下。

假设先求得某个波段图像的统计参数： $x_{\min}$ （最小值）、 $x_{\max}$ （最大值）、 c （众数）、 $\bar{x}$ （均值）、 s （方差），则左偏度 S_L 与右偏度为

$$S_L = \frac{x_{\max} - c}{s} \quad (4-1)$$

$$S_R = \frac{c - x_{\min}}{s} \quad (4-2)$$

这里的方差 σ 可基于均值（ $\bar{x}$ ）求，也可以基于众数（ c ）求。

3) 相关（似）矩阵分析

相关（似）系数能够反映两个波段之间的相关或相似程度。可以设想，所有相邻波段之间的相关性是比较高的，序列波段中两两波段之间的相关性通常情况下是按序列方式渐变的，一旦出现突变就表明有“异常”光谱地物存在。

设高光谱数据的波段数为 L ，每个像素点的光谱矢量为： $x=(x_1, x_2, \dots, x_L)$ ，均值矢量为： $m=(m_1, m_2, \dots, m_L)$ ，众数矢量为： $c=(c_1, c_2, \dots, c_L)$ 。则第 i 、 j 两个波段的相关系数 r_{ij} 定义为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^L (x_{ik} - m_i)(x_{jk} - m_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^L (x_{ik} - m_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^L (x_{jk} - m_j)^2}} \quad (i, j=1, 2, \dots, L) \quad (4-3)$$

这里的均值 m 可以用众数 c 代替， r_{ij} 取值为

-1 ~ 1。由 r_{ij} 构成相关矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1L} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{L1} & r_{L2} & \dots & r_{LL} \end{bmatrix}$$

类似于相关系数，还可以给出相似矩阵的定义（略）。

4) 回归偏度分析

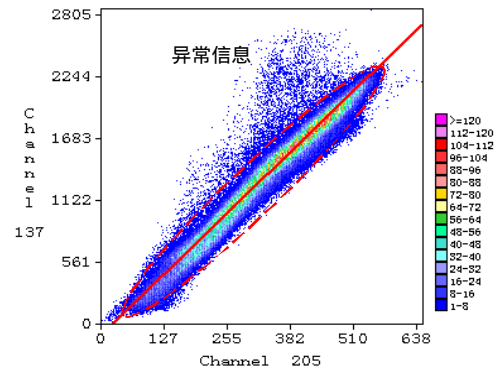


图 4.1 两个波段线性回归散点图
($y=4.36x-100.46, r=0.9729$)

图 4.1 是两个波段线性回归的散点图。尽管这里的回归相关值很高 ($r=0.9729$), 但很明显, 由于异常信息存在, 回归轴两侧的图形是不对称的。那么, 如何描述这种回归不对称性呢? 我们提出了回归偏度参量分析。

设有线性回归方程:

$$\hat{y} = \hat{a}x + \hat{b} \quad (4-4)$$

则实测数据中 y_i 与回归值 $\hat{y}_i$ 之间的偏差 ($y_i - \hat{y}_i$) 的平方和为

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i))^2 \quad (4-5)$$

这里 n 为观测点数。(4-5) 式 Q 值可改写成如下的形式

$$Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i))^2} \quad (4-6)$$

(4-6) 式的 Q 称之为回归偏度。

很显然, 一旦回归偏度较大, 则预示着有不同于背景的异常或干扰信息存在。

上述统计参量, 最后都是通过图形来反映波段之间的相似程度渐变的过程, 其起伏与大小决定了高光谱波段序列结构的变化规律。

这里需要强调的是, 波段序列直方图、左偏度与右偏度等每个统计量是由单个波段计算得到的, 而相关(似)系数与回归偏度都是由两个波段计算得到的。因此, 它们的统计意义与解释是有很大差别的。

五、应用实例分析

通过多年的应用研究与实践总结, 对多波段遥感图像的蚀变信息提取初步总结并提出了铁化、泥化、硅化、碳酸盐化等四种遥感多光谱找矿标志参数, 尤其铁化、泥化遥感信息找矿标志参数可在实际工作中做为重要的找矿标志来应用。自 1997 年以来, 我们先后在全国南方与北方不同地质地貌地区的几十个成矿带(段)开展过遥感蚀变信息提取找矿应用工作, 均取得良好的应用效果, 特别是在我国的西北地区其应用效果更为显著。

5.1 多光谱数据的应用实例

5.1.1 新疆青河县布尔根地区

新疆青河县布尔根地区是一个包括有金、铜、铁、镍等多金属的成矿区域。

其中有科克萨依、阿拉塔斯、贝勒库都格等 5 个金矿床（点）。几个大的金矿床产于克孜勒套推覆韧剪切带上。金矿化蚀变带表现为强硅化、强绢云母化、绿泥石化和绿帘石化，同时伴有稀疏浸染状黄铁矿化、黄铜矿化等。因此，该地区既有含铁矿物蚀变又有含羟基矿物蚀变。

根据 TM 多波段图像的“多元数据分析”结果和本地区蚀变组合矿物相关的波谱特征，选取 TM1、TM3、TM4、TM5 四个波段，利用“掩膜”技术针对科克萨依金矿区做主成份分析（主成份统计分析结果见表 1），根据表 1 主成份统计分析的结果和各主成份黑白图像的分析，选用 PCA2、PCA1、PCA3 三个主成份得到 RGB 彩色合成图像，在这幅图上矿化蚀变信息得到了一定增强，但是由于有非蚀变的其它地物信息的干扰，蚀变信息依然无法一目了然。

表 1 布尔根地区蚀变信息主成份统计分析

PCA 图像	特 征 矩 阵				特征值	贡献率（%）
	TM1	TM3	TM4	TM5		
PCA1	-0.31171	-0.44158	-0.36856	-0.75631	628.7816	89.77
PCA2	0.56527	0.47346	0.24582	-0.62919	46.4382	6.81
PCA3	0.47299	-0.10089	0.85957	-0.16504	20.2022	2.88
PCA4	0.59966	-0.75543	0.25470	0.06980	4.9890	0.71

图 5.1 是一幅由 PCA2/PCA1、TM4/TM3、TM2/TM3 三个比值合成的彩色图像，很明显，在这幅图像上压抑了其它地物信息，蚀变信息（图像上的红色）被很好地增强提取出来。

在此基础上，采用“分类”技术对蚀变信息作进一步的分离，并用“彩色分割”技术最终得到蚀变异常图（见图 5.2）。这幅图像类似于化探异常图，不仅反映了蚀变异常的空间位置，同时也刻画了蚀变的强弱程度（由绿→兰→黄→红表示从弱到强）；同地质图对比我们发现，所有金矿床（点）都在蚀变异常图上得到了很好的反映，其它蚀变异常也大多发生在克孜勒套推覆韧剪切带上、岩体的边部。其中青河煤矿位置上的蚀变异常，野外工作证实已经有地方部门正在该点开采金矿。还有一些未知的蚀变异常需要进一步查明和工作。

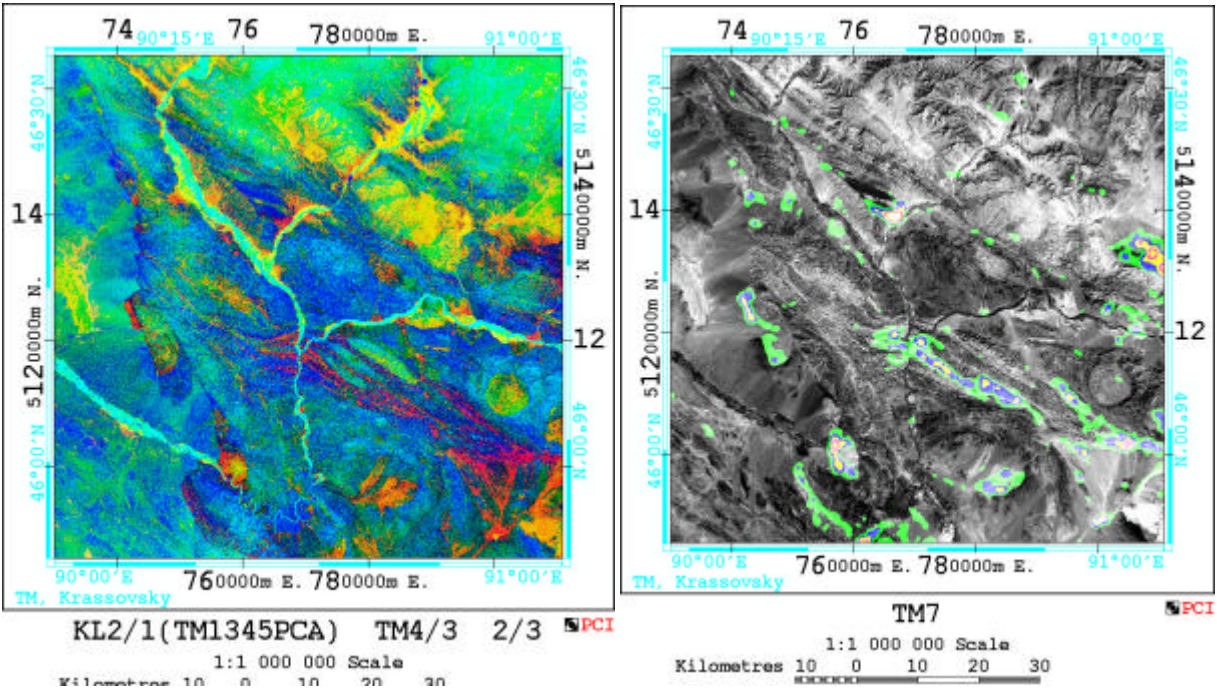


图 5.1 PCA2/PCA1、TM4/TM3、TM2/TM3 三个比值合成的彩色图像（图像上红色为矿化蚀变信息）（新疆青河县布尔根地区）

图 5.2 在图 5.1 的基础上，采用“分类”技术对蚀变信息作进一步的分离，并用“彩色分割”技术最终得到蚀变信息异常图（新疆青河县布尔根地区）

5.1.2 青海都兰塔妥—沟里地区

在青海省都兰塔妥—沟里地区，采用 TM 图像多波段及其派生变量，直接提取了反映与金属矿化有关的三价铁遥感蚀变信息。参见图 5.3，根据三价铁蚀变强弱，圈定出不同级别的铁化蚀变遥感异常，共分高—中—低—最低等四级异常。总体来讲，工作区内铁化遥感异常强度不很高，分布也不是很广，主要集中在区域北部。把该地区的矿化蚀变遥感信息异常图（图 5.3）与地质矿产图（图 5.4）对比可以发现，遥感蚀变信息异常，主要反映了区域各类岩石地层的氧化铁富集程度，其分布与铜钴矿化、断裂构造、以及 Cu、Co、Au 化探异常关系比较密切。根据它们的分布关系大体可分为四类：

- 1) 与铜钴矿（化）点相对应的异常；
- 2) 与 Cu、Co、Au 化探异常对应的异常；
- 3) 与断裂构造有关的遥感异常；
- 4) 分布于岩层上的铁染。

可见所提取的遥感矿化蚀变信息较好地反映了该地区的成矿地质作用。

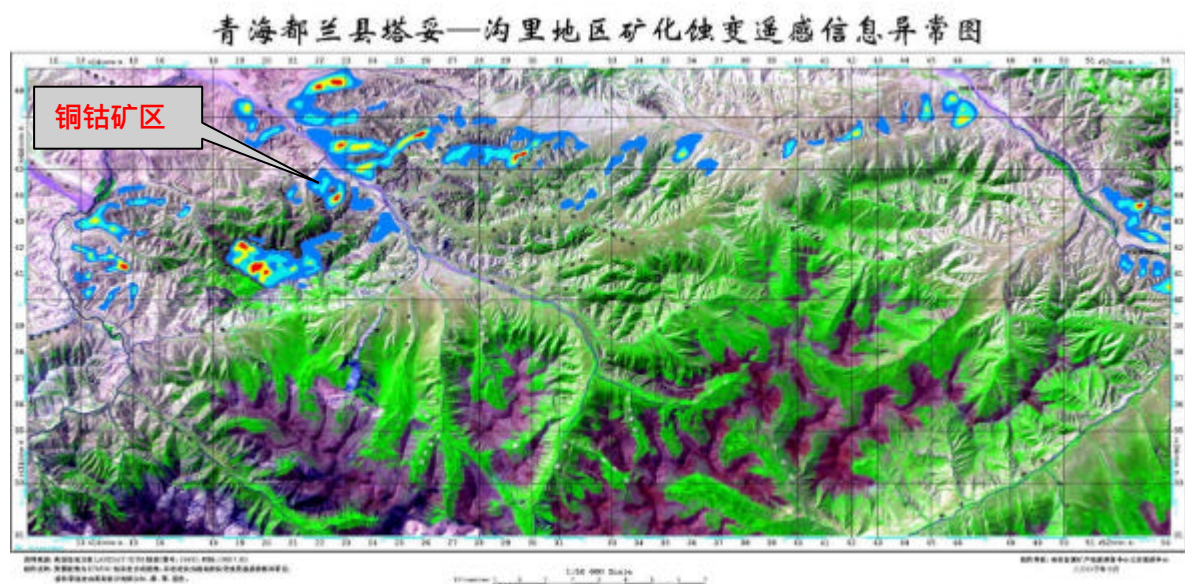


图 5.3 青海都兰塔妥—沟里地区矿化蚀变遥感信息异常图

采用“遥感蚀变信息多层次分离技术”直接提取与金属矿化有关的三价铁蚀变信息异常（遥感数据源于美国第 5 号陆地卫星（Landst-5）TM 数据，时相为 1999 年 7 月 30 日，景号为 134/35（都兰幅））

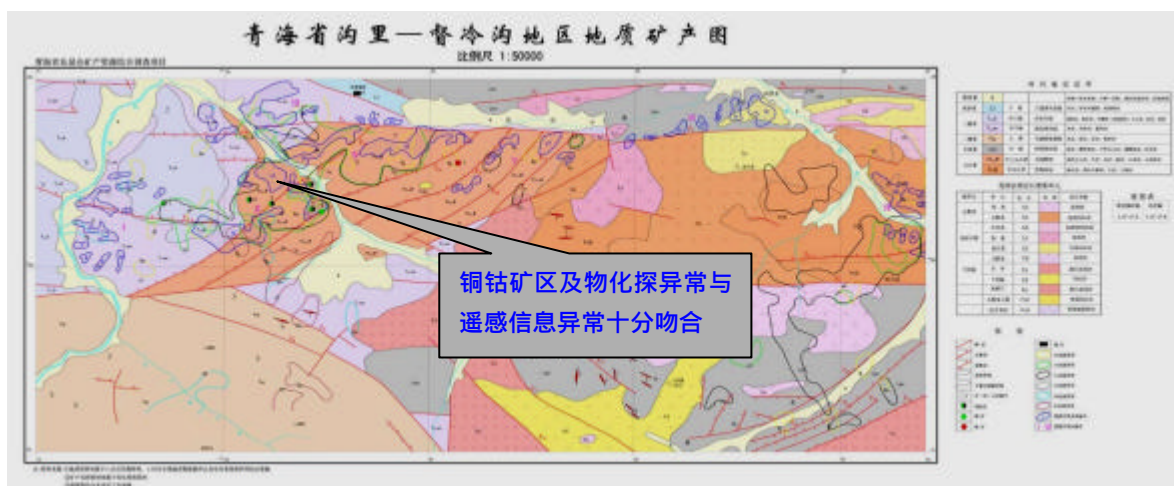


图 5.4 青海都兰塔妥—沟里地区地质矿产图

5.1.3 云南北衙地区

参见图 5.5、5.6，在我国南方的云南北衙金矿区，根据该地区既含有羟基矿物又有铁的氧化物和氢氧化物的特点，选择 TM 图像的 1、3、4、5、7 共五个波段做主成份分析，而后用非监督分类把 PCA2 分成 16 类。通过分析去掉不感兴趣的地物类，保留 3 类，这三类恰好反映了本地区矿化蚀变（粘土化和铁化）的三个级别的强烈程度（由绿→黄→红表示从弱到强），异常形态分布与矿区实际情况非常吻合。

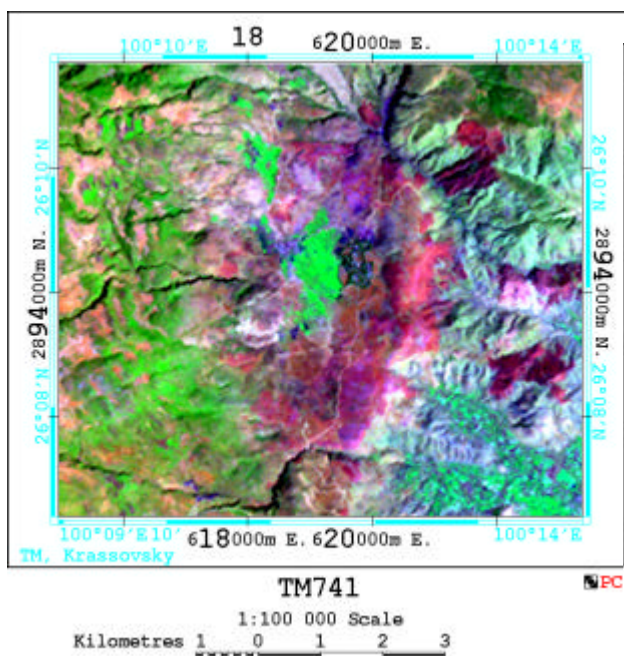


图 5.5 云南北衙金矿区 TM741 彩色合成图像

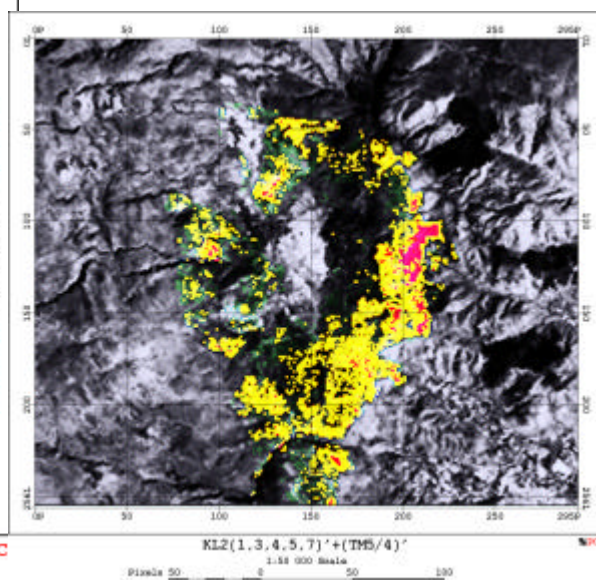


图 5.6 云南北衙金矿遥感蚀变信息异常图

5.1.5 青海茫崖柴水沟—采石沟地区

图 5.7 给出了青海茫崖柴水沟—采石沟重点区金多金属矿化区遥感蚀变信息图像与地质图对比分析,发现遥感蚀变信息大多反映的是该地区岩体接触带的围岩蚀变,经野外实地验证,发现了一处规模较大的黄钾铁矾蚀变岩,含金品位在 $1.5—6.0 \times 10^{-6}$ 的金矿化体。

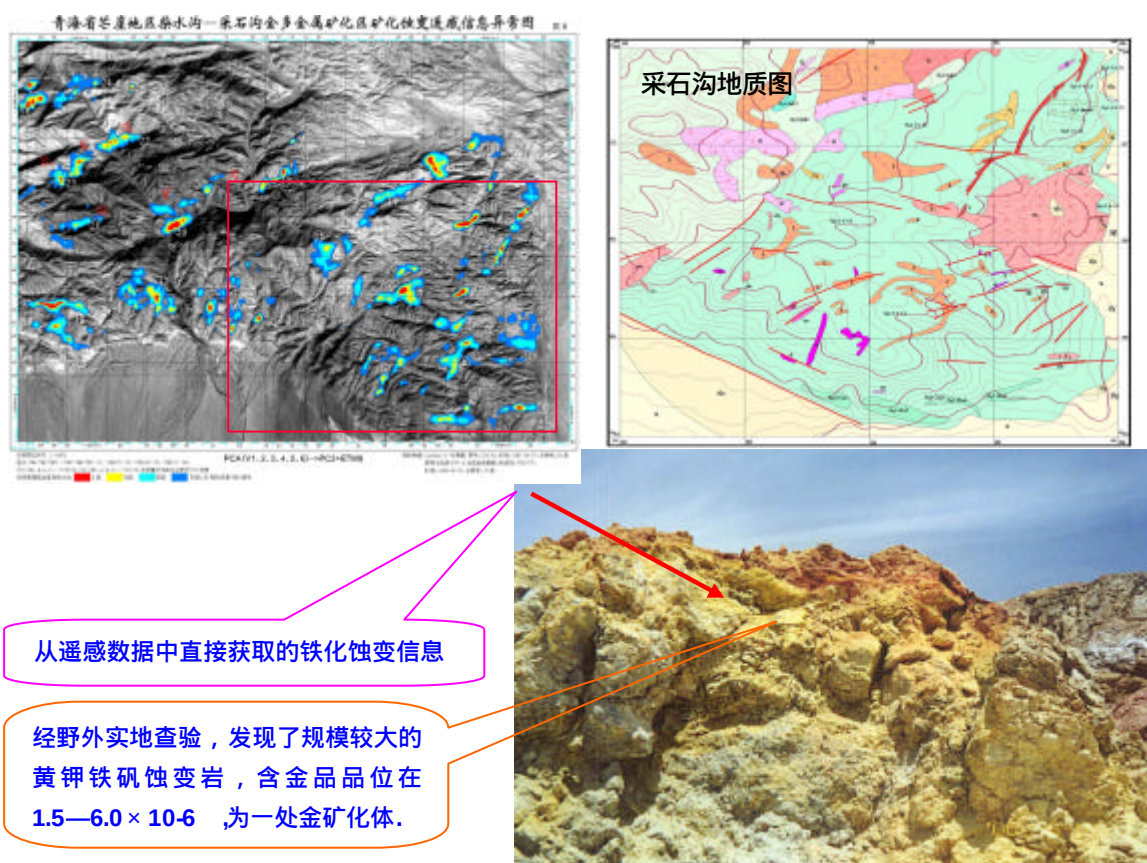


图 5.7 青海茫崖柴水沟—采石沟重点区金多金属矿化区
遥感蚀变信息图与地质图对比分析
(右上的地质图与左上图像的红框范围对应)

5.2 高光谱数据的应用实例

5.2.1 高光谱数据的统计特征分析与数据质量评价

对高光谱数据进行波段序结构分析的一个重要目的是基于全局与总体上把握和观察图像数据的光谱变化特征及数据的统计特征。图 5.8 是驱龙地区的波段序列直方图。为了对比,图 5.9 给出了驱龙地区 Hyperion 数据波段序列偏度、左偏度曲线图,在图 2-3 给出了左偏很重(偏度 2.056)的 B22 波段的单波段图像的直方图。

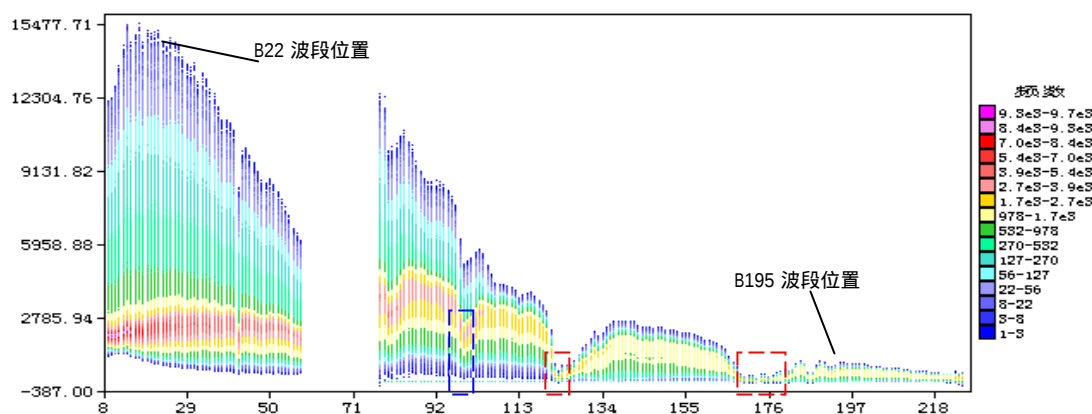


图 5.8 驱龙地区 Hyperion 数据波段序列直方图 (8-224 波段)

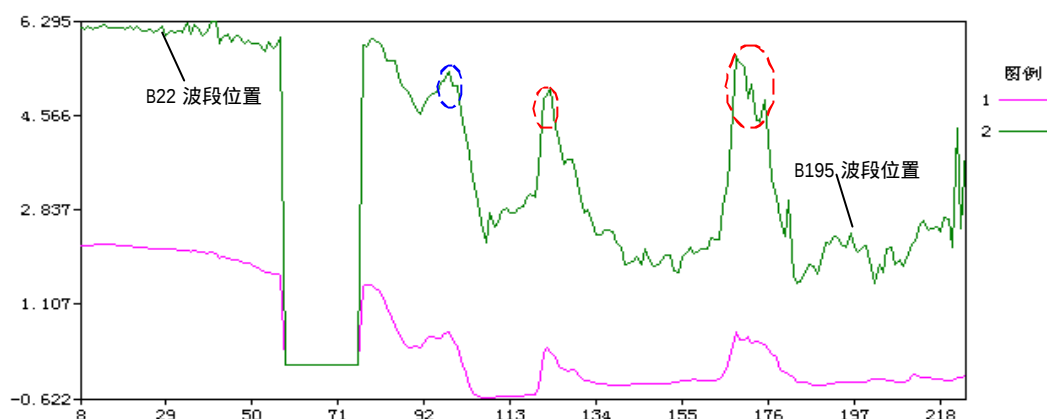
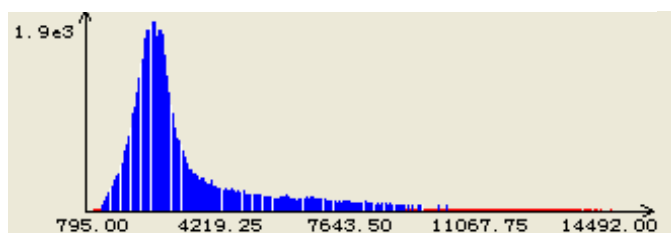
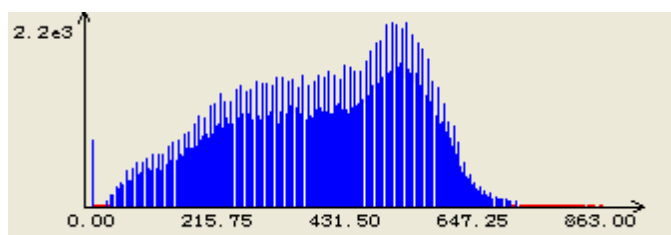


图 5.9 驱龙地区 Hyperion 数据波段序列偏度、左偏度曲线图 (8-224 波段)
(粉红色为偏度曲线, 绿色为左偏度曲线)

比较图 5.8 与图 5.10 可以发现, 波段序列直方图事实上是单波段直方图的叠制式的排列显示。由于像素高频区对应背景, 像素低频区对应异常或干扰。所以, 从图 5.8 可以读到如下信息, 第一, 波段序列的光谱曲线变化趋势与形态特征; 第二, 背景区 (黄色至粉红色) 的展布形态与宽



a、B22 波段的直方图 (由积雪引起的强左偏)
(均值:3261.21, 均方差:2058.55,
偏度:2.056, 峰度:3.941)



b、B195 波段的直方图 (由蚀变引起的弱左偏)
(均值:388.25, 均方差:159.83,
偏度:-0.353, 峰度:-0.890)

图 5.10²³ 驱龙地区 Hyperion 数据 B22、B195 波段的直方图

窄变化；第三，直方图的偏度变化（绿色、青色至蓝色的各个色级分布区域），反映了干扰或异常因素引起的直方图统计特征，大的偏度往往是干扰因素引起的，而小的偏度可以看作异常信息作用的结果。就驱龙地区而言，B8-B108 波段，即 427.55 ~ 1225.54nm 光谱范围的直方图左偏是由于积雪区的光谱特征引起的，在 B22 波段其左偏达到了最大值。蚀变异常引起的左偏通常是较弱的，在全体波段的波段序列直方图上还很难观察到，需要显示局部波段的波段序列直方图，或者直接显示单波段直方图，如图 5.10 的 b 给出了蚀变信息明显的 B195 波段，其左偏也是不显著的，可见蚀变引起的异常信息不容易捕捉。

对比图 5.9 的偏度、左偏度曲线，很明显，左偏度曲线比偏度曲线反映出更多的谱带特征，尤其是一些精细的光谱特征。

通过观察分析图 5.8 与图 5.9，完全能对驱龙地区的 Hyperion 数据质量作出比较准确的评价。第一，没有定标而被置为 0 值的波段，除了 B1-B7 与 B225-B242 波段未被绘入图中之外，其中 B57-B78 在图中明显是空区；第二，受水汽影响的波段区在图上非常清晰地反映出来了，即 B121-B127、B167-B178 为水汽影响波段区，见图 5.8 的红色虚线框，图 5.9 的红色虚线椭圆。所有这些信息都是由高光谱数据波段序列的序结构信息彰显出来的。事实上，从图中还可以观察到大致在 B100-B108 的几个波段也是有质量问题的（见图中的蓝色虚线框与椭圆）。这里需要补充一句，在上述波段区间的回归偏度曲线图能更清晰地反映出数据质量问题，限于篇幅不再赘述。

研究发现，不同地区的高光谱数据，或不同训练区的数据都有自己的波段序结构信息，即具有不同的序结构图谱。

5.2.2 基于回归偏度的“蚀变异常”信息潜在性评价

对于一个具有已知矿床或矿点的地区进行遥感图像蚀变信息提取时，我们可以把已知地段作为参考区进行对比分析来验证被提取的“蚀变异常”信息的准确性。但是，大多数情况下，所处理的地区往往是缺少矿床（点）的未知地区，这种没有先验知识支撑的蚀变信息提取，我们称之为盲提取。那么对于蚀变信息盲提取问题，我们应该如何基于遥感图像数据本身表现出的特征统计信息来评价工作区“蚀变异常”信息的潜在性呢？这里我们基于序结构分析技术中的回归偏度来讨论解决该问题的可行性。

图 5.11 与图 5.12 分别是西藏驱龙地区与蒙甘新交界地区的 Hyperion 数据 B130-B164 (1447.20 ~ 1790.24nm) 与 B8-B224 (427.55 ~ 2254.26nm) 波段组产生的回归偏度曲线图,从物理意义上说,这是两个重要的泥化矿物(岩石)蚀变特征谱带区。注意观察两幅图中 B130-B164 与 B180-B210 两个谱带区(见图中的红色虚线矩形框),从两个谱带区的曲线本身看,似乎图 5.12 比图 5.11 具有更好的离散性。但是,分析它们的回归偏度会发现,两者的回归偏度值相差悬殊,其中,图 5.11 的 B130-B164 的回归偏度值为 6 ~ 12 之间, B180-B210 的回归偏度值为 9 ~ 12 之间;而图 5.12 的 B130-B164 的回归偏度值为 0.1 ~ 1.6 之间, B180-B210 的回归偏度值为 0.2 ~ 1.8 之间。

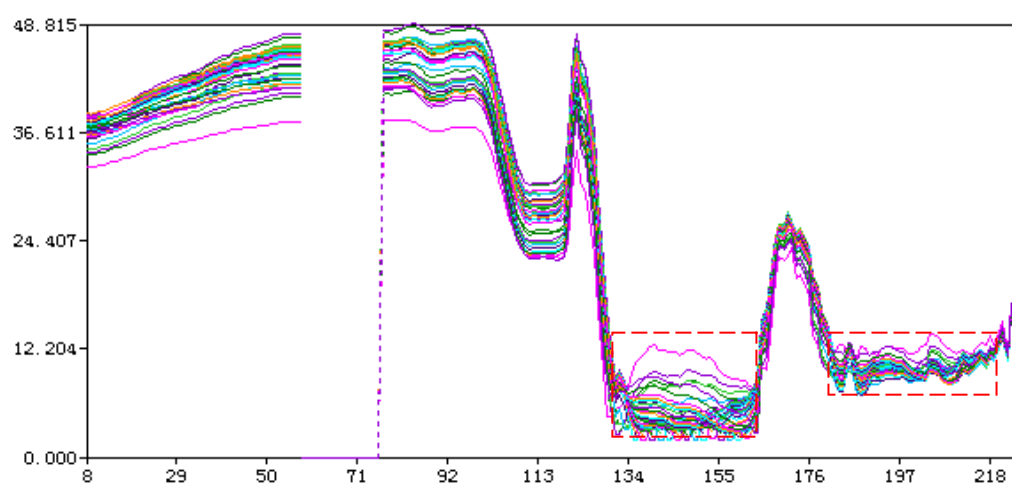


图 5.11 西藏驱龙地区 Hyperion 数据 B130-B164 与 B8-B224 波段的回归偏度曲线图

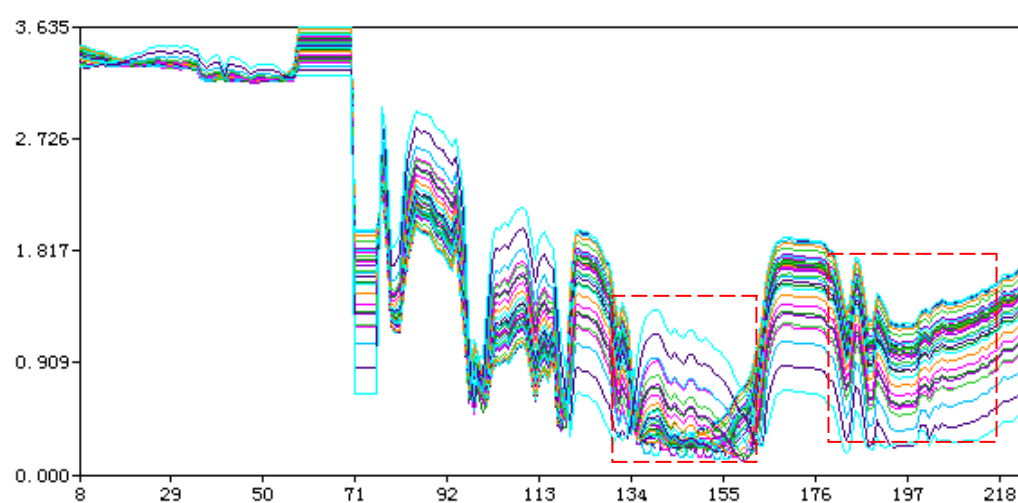


图 5.12 蒙甘新交界地区 B130-B164 与 B122-B224 波段的回归偏度曲线图

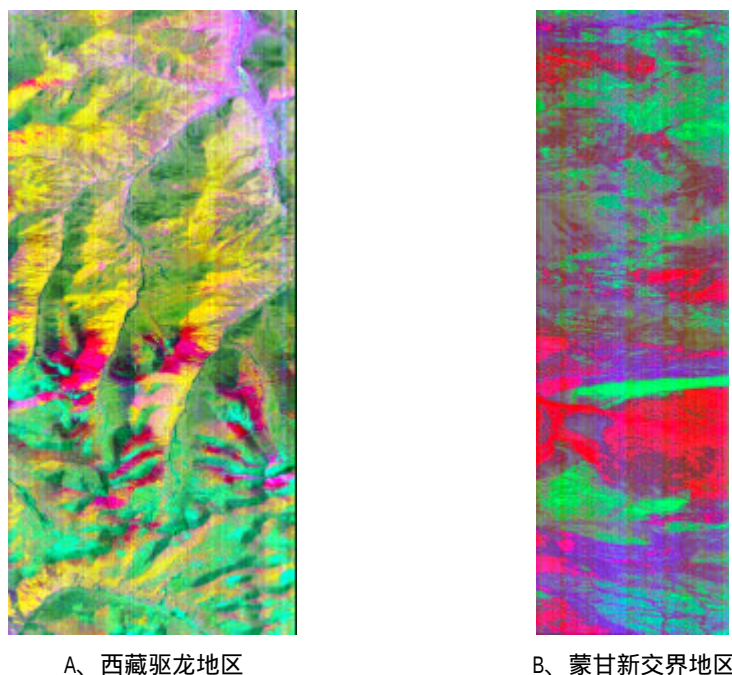


图 5.13 两个地区采用 B180-B210 波段组由主成分分析得到的前三个主成分的彩色合成图

我们对上面两个地区 Hyperion 数据的 B180-B210 波段组进行了主成分分析。尽管由 B180 ~ B210 共 31 个波段参加了主成分分析,但是信息主要集中在前几个主成分,其中,西藏驱龙地区主要集中在前四个主成分,占总信息量的 99.334%,而含背景信息的第一主成分占 98.35%,其他三个主成分占 1.0%,尤其第二、三主成分分别占 0.563%、0.306%,可见明显包含了异常信息。蒙甘新交界地区主要集中在前二个主成分,占总信息量的 99.899%,而含背景信息的第一主成分就占了 99.742,第二主成分仅占 0.157%,表明异常信息不显著。结合主成分分析与图 5.13 比较两个地区,很明显它们的结果验证了图 5.11 回归偏度曲线分析得到的结论,即西藏驱龙地区的泥化蚀变信息(见图 5.13A 中的玫瑰色的色异常)很显著也很强烈;而蒙甘新交界地区的三个主成分的彩色图像所反映的主要还是背景地质体信息,蚀变信息不明显。

这个例子分析表明,利用波段序结构分析技术对遥感图像数据本身的偏回归度所表现出来的特征统计信息来评价工作区“蚀变异常”信息潜在性是可行的,也是非常有意义的。因为这样不仅能够预先评价工作区“蚀变异常”是否客观存在,同时,对遥感图像所提取的“蚀变信息”准确与否及强烈程度也能做出合理正确的评价。

5.2.3 基于波段序结构分析的特征波段选择及矿物蚀变信息提取

对于无法完成大气校正或者受到背景或干扰地物较为严重影响而使其重建的光谱出现“变形”的高光谱数据，在这些情况下一般都很难应用光谱相似度匹配方法进行矿物识别，需要把其转化为多波段数据方式进行处理。

高光谱数据由于波段多，不可能一次性选择所有波段参与运算。所以，首先必须选择特征波段。特征波段选择是多波段数据处理的关键技术，不同的应用目的会选择不同的波段组合。高光谱数据特征波段的选择通常都采用根据波段的相关性大小将其分组，或者依据数据的信息熵或统计方差分析各波段的信息含量的

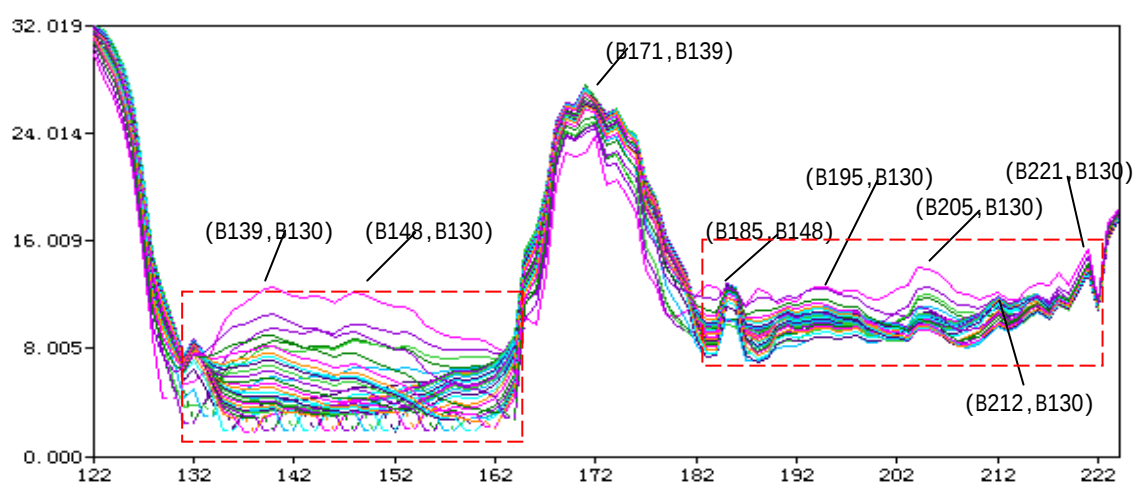


图 5.14 B130-B164 与 B122-B224 波段组的回归偏度曲线图

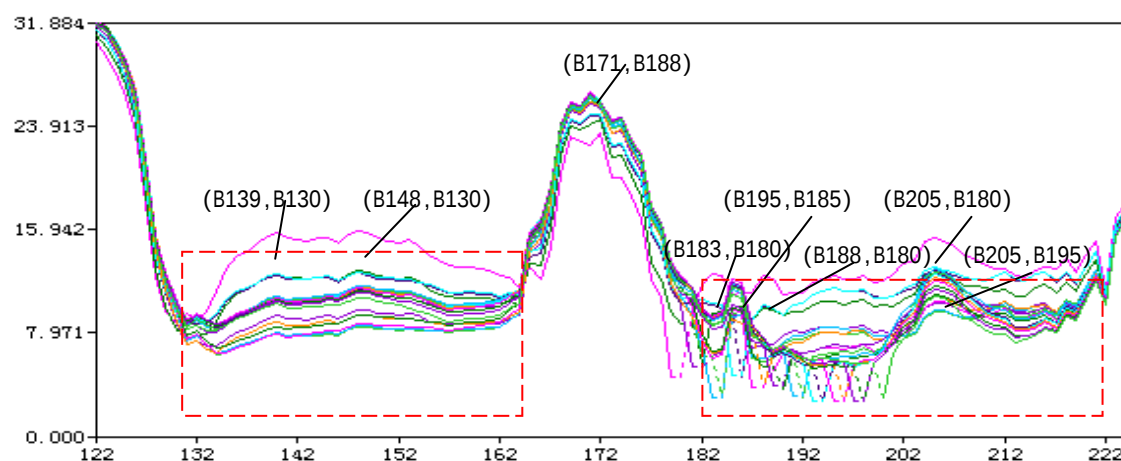


图 5.15 B180-B199 与 B122-B224 波段组的回归偏度曲线图

办法来进行。而我们这里介绍的是通过应用波段序结构分析技术对高光谱数据计

算相关（似）矩阵或回归偏度，而后通过相关（似）系数曲线或回归偏度曲线来分析选择特征谱带或特征波段。其中，相关（似）矩阵分析类似于文献[3]介绍的波段指数方法，应用效果不如回归偏度。因此，这里对相关（似）矩阵分析不作介绍，主要讨论回归偏度曲线的分析应用。

图 5.14 与图 5.15 相当于是对图 2-4 中两个特征波段组回归偏度曲线的局部放大，使得一些细节信息更加清晰。图 5.14 与图 5.15 是 B130-B164 (1447.20 ~ 1790.24nm) 与 B180-B199 (1951.61 ~ 2143.38nm) 分别同 B122-224 (1366.51 ~ 2395.53nm) 波段组产生的回归偏度曲线图，图上标记的每个波段对，例如(B195, B130)，我们把它称之为波段序偶。波段序偶是指具有全局或局部回归偏度极大值的两个关联性的波段。由研究分析得知，具有全局极大值的波段序偶一般反映的是大的干扰地物信息，而局部极大值则通常反映的是小干扰或者异常信息。由此可推断出，在具有物理意义的一些矿物特征谱带区范围的局部极大值的波段序偶则反映的一定是矿物蚀变信息。所以，我们把波段序偶作为特征波段加以选择，而把具有多个波段序偶构成的起伏平台区作为一个特征谱带区，例如图中的每个虚线矩形框就是一个特征谱带区。

采用特征谱带区内的所有波段组合进行蚀变信息提取，在 5.2.2 节的分析中我们已经描述过。图 5.13 就是应用 B180-B210 共 31 个波段通过主成分分析得到的前三个主成分彩色合成图像，其中，西藏驱龙地区的矿化蚀变信息得到了很好地提取。但是，值得探讨的是由 31 个波段只能得到一幅综合的泥化蚀变信息图像，无法在多个主成分中很好地找到不同矿物蚀变信息的增强图像。这个问题已经在几个试验区都碰到类似的问题，值得进一步加以研究与探讨。

有趣的是，我们由波段序结构分析技术得到的波段序偶，虽然一组只有两个波段，但其提取的矿物蚀变信息其物理意义明确，蚀变信息增强效果好。

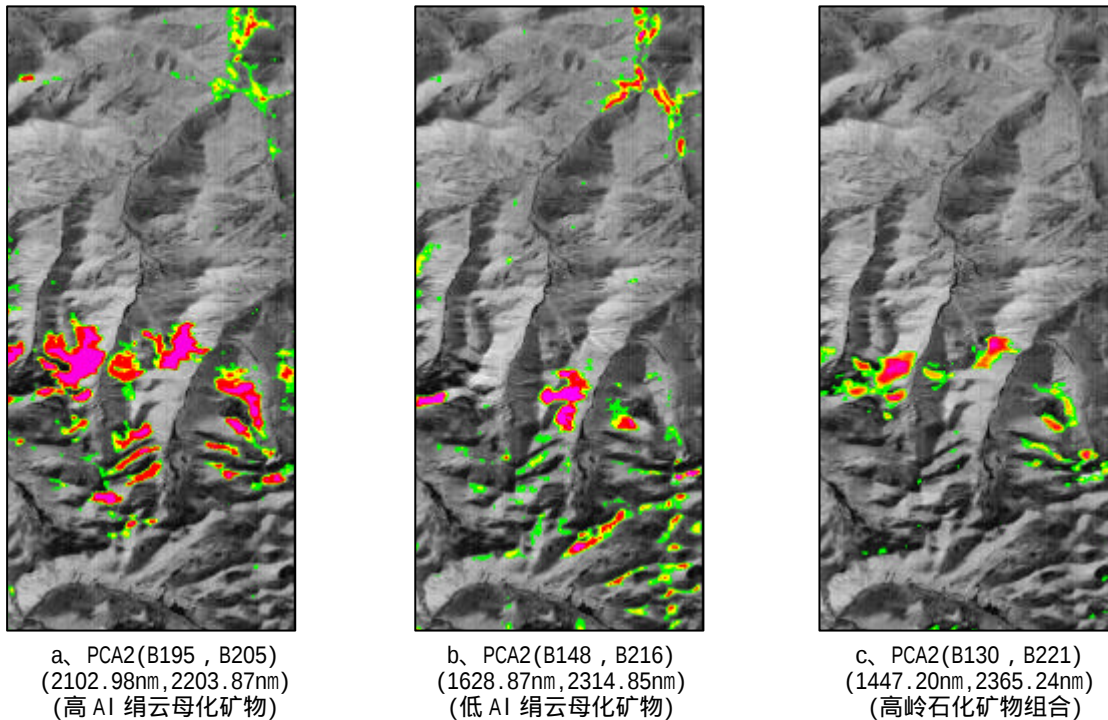


图 5.16 由几个典型的波段序偶提取的不同矿物蚀变信息图像

下面先让我们探讨一下波段序偶产生的原因。从统计意义上说，波段序偶是波段序列数据序结构特征信息的反映；从物理机制上说，应该是由地物光谱的一些诊断性光谱的吸收与反射谱带所造就的，事实上，波段序偶的两个波段中一个波段对应于反射峰，另一个波段对应于吸收峰，即波段序偶必定是两个不相关或负相关的波段。所以，波段序偶在提取矿物蚀变信息方面有特殊的功效。

通过选择几个有代表性的波段序偶,包括(B195 ,205)、(B148 ,216) (B130、B221)，分别对它们采用主成分分析进行矿物蚀变信息提取，得到三种不同矿物蚀变信息的图像，见图 5.16，分别是高 Al 绢云母化矿物蚀变、低 Al 绢云母化矿物蚀变和高岭石化矿物蚀变组合。采用波段序偶的两个波段做主成分分析，一般第一主成分是背景信息，第二主成分为矿物蚀变信息，图中的 PCA2(B195 ,B205)表示由 B195、B205 两个波段得到的第二主成分图像，其它类推。

图 5.16 表明，由波段序偶提取得到的矿物蚀变信息分布规律、形态规则、强弱成次分明。

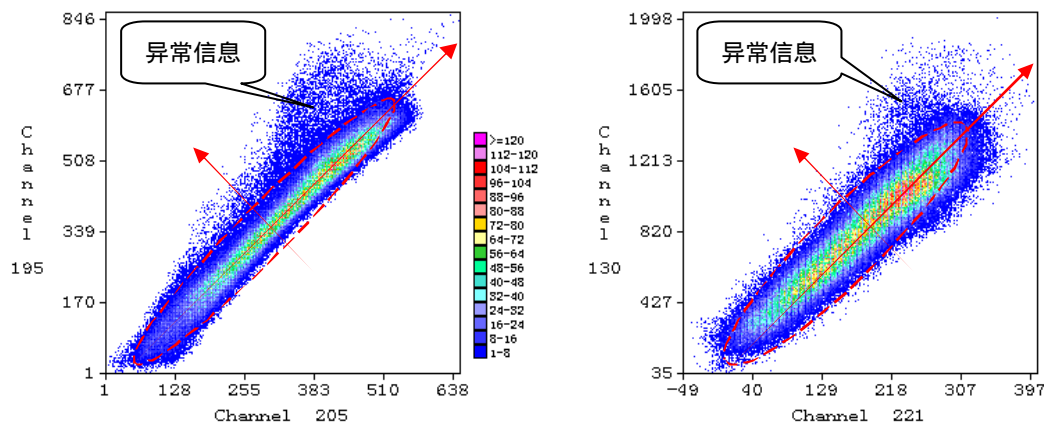


图 5.17 (B195,B205)与(B130,B221)两个波段序偶的二维散点图

图 5.17 给出了与图 5.16 中 a、b 两幅蚀变信息图像对应的两个波段序偶 (B195, B205) 和 (B130, B221) 的二维散点图。很明显, 在图中异常信息的点群位于背景椭圆的外部; 其中, (B195, B205) 异常信息点群偏向于 B195 波段, 表明 B195 波段 (2102.98nm) 对应反射峰, 而 B205 波段 (2203.87nm) 为吸收峰; 同理, B130 波段 (1447.20nm) 对应反射峰, 而 B221 波段 (2365.24nm) 为吸收峰。二维散点图的这些特征信息为我们推断属于什么矿物蚀变提供了依据。另外, 波段序偶 (B195, B205) 的异常信息点群明显比 (B130, B221) 显著, 这同图 5.16 所提取的蚀变信息强弱程度是完全一致的。

六、问题与讨论

自上世纪九十年代以来, 遥感矿化蚀变信息提取和热液蚀变填图技术在国内得到广泛的应用, 并取得了丰硕的成果, 也为遥感在地质找矿中的应用开辟了新的方法技术途径, 同早期的遥感地质构造解译相比, 已经跃上了一个新的台阶。但是, 无论同行的实践, 还是笔者自身多年来的工作经验总结, 都表明该项技术在实战中还存在不少问题和需要总结与完善的地方, 尚未达到完全成熟的要求。

因此, 尽管我们在多年的研究中已取得一些可喜的成果和重要认识, 但是, 还有比较多的问题需要与同仁们一起开展进一步的工作和进行深入研究。已经发现并引发思考的主要问题归纳如下:

(1) 由于我国在地物波谱的研究缺少系统性, 课题本身在这方面也很难有时

间进行深入的研究，所以，植被覆盖作为自然景观区中的一大干扰因素，从中提取蚀变信息依然成效不明显。因此，植被覆盖地区的遥感图像蚀变信息提取依然是一个需要十分重视与认真研究的工作难点。

(2) 对目前空间分辨率的遥感图像而言，光谱的混合响应引起的干扰问题依然是遥感蚀变信息提取最大的影响因素。其混合的机理，尤其非线性混合的机理研究还有很多工作需要做。

(3) 高光谱数据不容易获取，以及目前唯一的航天高光谱数据 Hyperion 幅宽太窄等都对高光谱数据的推广应用有较大的影响。

(4) 遥感蚀变信息的准确度与可信度定量评价问题；遥感蚀变信息的异常分级与成矿地质意义上的异常关系问题等。还有待深入研究与探讨。

(5) 光谱混合模型理论是理解与解释遥感图像变化复杂性的重要分析工具。这个方面还存在很多需要深入探讨的问题，应该开设专题专门研究。

(6) 需要开展专项加强与遥感地质本身有关的岩石矿物的地物波谱测试与研究。

(7) 要求开展专项加强遥感信息与地球物理、地球化学等其他地学信息之间的相关性研究与耦合性研究。

2009 年 9 月 15 日稿