

红外遥感油气资源勘探技术 及其有效性评估*

朱振海

(中国科学院遥感应用研究所)

1992年8月15日收稿

摘 要

油气资源的遥感勘探,可分为“直接”和“间接”两大类。红外遥感油气资源勘探技术属于“直接”勘探范畴。本研究基于工业油气藏烃类微渗漏理论,利用烃类特有的 $2.27-2.46\mu\text{m}$ 波谱双峰吸收带,以土壤烃组分异常为标志实施探测,并从理论上排除了各种地物目标的干扰,建立了一套航空遥感计算机图像处理及油气遥感信息异常提取方法。三次大面积试验表明,与已知油流区块的符合率达70%,在未知区的油气遥感异常中,一些已被钻证实含有油气性,业已正式列入油气勘探生产计划。

关键词 红外遥感 油气资源勘探 波谱特征吸收带

一、前 言

油气资源的勘探与开发已有近150年的历史,并发展出一套以反射地震为主要探测手段的行之有效的勘探程序。随着地震技术的日臻完善,迄今为止大凡地表有油气苗显露的油气藏均被搜寻殆尽,一些明显的背斜构造油气藏亦大部被探明。到90年代初期,世界已探明的石油储量 $13.65 \times 10^{10}\text{t}$,天然气储量 $11.9 \times 10^{13}\text{m}^3$,按目前的开发速度仅够维持30—40年^[1]。根据资源预测,尚有 $17.34 \times 10^{10}\text{t}$ 石油和 $30.91 \times 10^{14}\text{m}^3$ 天然气有待勘探,除一些由于地表自然环境十分恶劣的地区人类尚未问津以外,大量的油气资源为非构造油气藏。较成熟的油气勘探技术面临严峻的挑战,对地震信息要求越来越高,勘探成本成倍增长,形势迫使人们寻求廉价、有效的高新技术。令人欣慰的是,自80年代以来,油气遥感勘探技术作为非地震油气勘探方法中的最新技术,取得了令人瞩目的进展。

二、遥感技术在油气资源勘探中的应用

遥感技术应用于油气资源勘探,从油气地质普查、前期勘探、靶区圈定、油气开发、挖潜扩边到油气田环境监测与整治的各个阶段,都有很多成功的应用实例。就勘探方法而言,可分为间接勘探和直接勘探两类。

* 本文为作者在“七五”期间研究成果的总结。

1. 油气遥感间接勘探

在油气地质普查和前期勘探中应用比较广泛,主要是利用卫星遥感和航空摄影图像,采用宏观分析方法,进行地质构造判读及地层识别,编制中小比例尺地质构造图和地质图。尤其是在构造复杂地区,从空中角度追索地层走向及突变,可以达到地面调查无可比拟的程度。在堆积区,可利用图像的影纹结构和色调差异推测隐伏线性构造,还可应用线性体的分析方法,推断油气有利聚集区。大量应用实例表明,在油源岩调查、资源量估算、沉积盆地构造分析及油气有利聚集区带的推测方面,都可提供有价值的信息及依据。

此外,侧视雷达遥感图像,具有全时段、全天候、高分辨率的特点,对地质构造的判读最为有利。在 70 年代已应用于油气勘探,主要是编绘沉积盆地的地质构造图,评估烃类的生产潜力。

2. 油气遥感直接勘探

此系 80 年代以来发展起来的高新技术。与各种非地震勘探方法属同源,主要基于具有工业价值的油气藏普遍存在着烃类微渗漏的理论。

具有工业价值的油气藏,除具有生、运、储、保的必备条件外,还需有一定量的烃类物质不断补给,使其处于相对动态平衡状态。这样的油气藏其内部具有很大的压力,与地表间存在着巨大的压力差。油气藏中的烃类物质及其伴生化合物,势必沿着压力梯度的指向,以油气藏上方岩层普遍存在的微细裂隙、节理为通道,以多种机制沿多种途径产生垂直于地表的烃类微渗漏现象。烃类的微渗漏相对于地质发展史而言,速度是较快的。1968 年美国原子能委员会进行的研究证明,小分子的烃类,在 14 天可穿透 300m 的上覆盖层,28 天能穿透 600m 的上覆盖层。凡体积相当于胶粒的烃类分子,在地下水的参与下,不管遇到什么地层,均能以每秒若干毫米的运动速度上升运移^[1]。但微渗漏的烃类在上升运移过程中,肯定会与上覆地层发生各种作用。大体可分为两类,其一是岩石的吸附和组构的滞留作用,只能影响渗漏量,大小则取决于岩石的成分、粒度、结构及含水量;其二是上覆岩层的色层分异作用,包括色层吸附效应(不同烃类组分吸附容量差异造成的分离)、分布色层效应(不同烃类组分溶解度差异造成的分离)和渗漏分异效应(各类烃类渗漏系数差异造成的分离),表现为枝状异构烃在向上运移过程中的比例增高。对新疆地区近千个地表地球化学测点的分析表明,准噶尔盆地土壤吸附烃的背景值(总烃)在 $250\mu\text{l}/\text{kg}$, 异常最高值(总烃)可达 $800\mu\text{l}/\text{kg}$ 以上;塔里木盆地土壤吸附烃的背景值(总烃)在 $740-780\mu\text{l}/\text{kg}$, 异常最高值(总烃)可达 $2500\mu\text{l}/\text{kg}$ 以上,说明在含油气盆地,地表土壤吸附烃含量较高,且异常突出,可保证遥感探测获得较强的响应度。地表土壤吸附烃含有大量重烃,在准噶尔盆地分析的结果发现基本以 C_{11-24} 为主体,获得最高碳数为 C_{29} 。就含量比例而言, $> \text{C}_{11}$ 的总烃量约为 C_{1-5} 总烃量的 10 倍。这就揭示了一个非常重要的现象,因为 $> \text{C}_8$ 的烃类物质在常温、常压下呈液态,存在较稳定,受环境温压变化的影响小,从而为众多非地震油气勘探新方法的开拓奠定了理论依据。

80 年代以来,以油气藏烃类微渗漏理论为依据,发展了一系列遥感直接探测地下油气有利聚集的方法:红层褪色、粘土矿物丰度异常等。笔者从基本原理出发,研究了油气

藏微渗漏的烃类在地表有可能形成的标志,结合遥感技术探测的可能,提出了一套油气遥感勘探评价模式(图 1)。经在新疆准噶尔盆地东部系统试验研究,证明该模式是可行的。尤其在干旱半干旱地区,土壤吸附烃异常的遥感探测最为直接、最为有效。本文将较详细地论述这种方法的机理及应用效果。

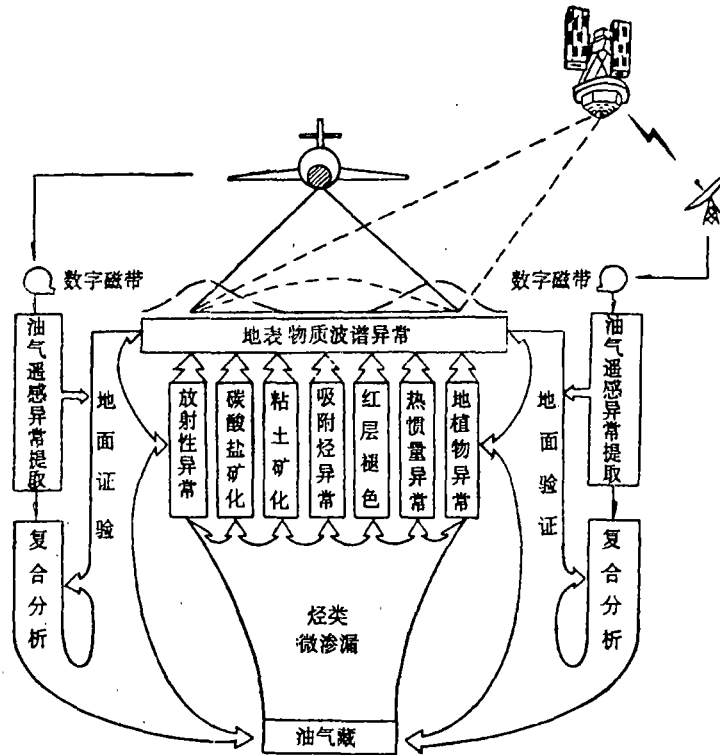


图 1 油气遥感勘探评价模式

Fig. 1 Estimation model of remote sensing to oil-gas resources exploration

三、红外遥感油气勘探的应用基础

从理论上讲,土壤烃组分异常作为油气藏烃类微渗漏的标志,是最直接、最有效的,关键是如何进行遥感探测。而遥感探测的实质是进行地物的波谱测量,利用各种物质的固有的特征吸收谱带,实现识别和寻找目标物的存在。对油气遥感勘探而言,其应用基础就是确定烃类物质的特征吸收谱带。

油气藏的烃类物质组成十分复杂,以原油为代表便可测得各种烃类物质波谱的共性特征。通过对不同时代、不同层位、不同类型原油的实验室波谱测量,发现均在 1.725, 2.310, 2.348, 3.430, 3.500, 6.211, 6.794, 7.231 和 13.699 μm 处表现为明显而稳定的吸收峰(图 2)。进而可归并为 4 个特征吸收带: 1.69—1.79, 2.27—2.46, 3.33—3.53 和 6.80—7.48 μm (表 1), 其中只有短波红外谱段的 2.27—2.46 μm 特征吸收带,带宽近 0.2 μm , 吸

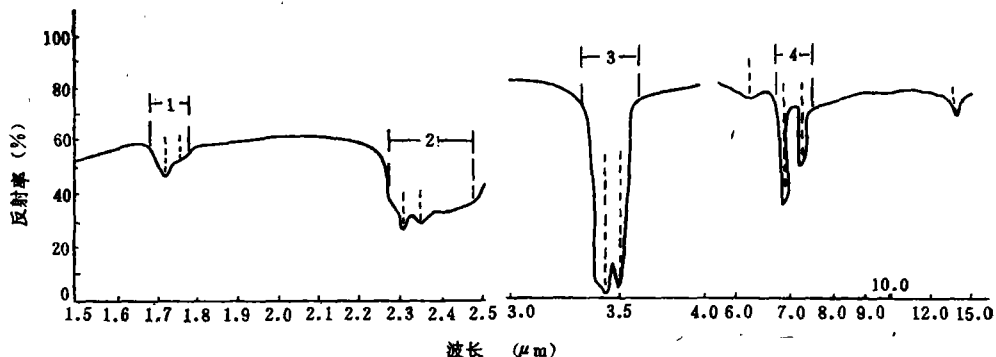


图2 原油波谱特征曲线

Fig. 2 Curve of spectral feature of crude oil

表1 烃类波谱特征吸收带遥感探测可用性对比表

Table 1 Contrast of usability of hydrocarbon absorption spectrum bands

吸收带范围 (μm)	吸收强度	遥感大气窗口	可用性
1.69—1.79	11%	之内	吸收强度弱,带宽窄
2.27—2.46	16%	之内	吸收强度尚可,带宽大
3.33—3.53	70%	之内	受植被、腐殖物及大气干扰
6.80—7.48	30%	之外	遥感不宜使用

收强度 $> 15\%$, 稳定性好, 可选定为红外油气遥感探测的工作谱带。

2.27—2.46 μm 烃类波谱特征吸收带, 从理论上讲为烃分子振动过程的反应。任何一个振动系统所表现的无规则运动, 均是由数目有限的简单运动 (亦称简正模式或基本模式) 构成的。每一个简正振动都有一个与其相关的量子数和简正频率。当一个简正模式被两个或两个以上的能量子所激发时, 就会产生倍频; 当两个或两个以上不同基频或倍频发生时, 在所有基频与倍频之和处 (或附近) 会出现合频谱带。由计算可知, 2.27—2.46 μm 烃类吸收谱带为烃类分子振动的合频所致, 主要为甲基 ($-\text{CH}_3$)、亚甲基 ($=\text{CH}_2$) 和芳烃的 ($-\text{CH}$) 基团振动的合频组合, 其中亚甲基的贡献最大, 无其它烃类组分的干扰^[2]。

自然界的物质是复杂的, 在遥感探测中会遇到各种物质的干扰。自然界的物质可分为 4 大类: 大气、水体、植物和岩矿 (含土壤)。下面分别讨论这 4 类物质对烃类 2.27—2.46 μm 波谱特征吸收带的影响。由前人的研究成果可知, 大气、水体及植物体在 2.0—2.5 μm 短波红外波段均未形成特征吸收带^[2], 不可能造成干扰。石油有机成因说认为, 石油为有机化合物的衍生物, 与第四纪以来植物腐化的腐殖质、腐殖酸及腐殖土属同源, 是否会形成干扰是众多石油工作者最关心的问题。大量波谱测量证明, 腐殖酸的吸收峰为 1.90 和 2.28 μm , 腐殖叶的吸收带仅在 1.90 μm 附近, 腐殖土则无明显吸收带 (图 3), 均不会干扰烃类特征吸收带。其内涵是腐殖物与烃类的演化过程不同, 所以分子结构也不同, 故而产生的合频特征的位置也有所不同。土壤的波谱特征为典型的混合波谱, 戴昌达先生对我国 23 种土壤类型的 0.36—2.50 μm 波谱测量的结果表明, 均以斜率及反射强度差异为特征, 在 2.25—2.5 μm 波段无明显吸收带。我们在已知油气藏上方所测的土壤波谱

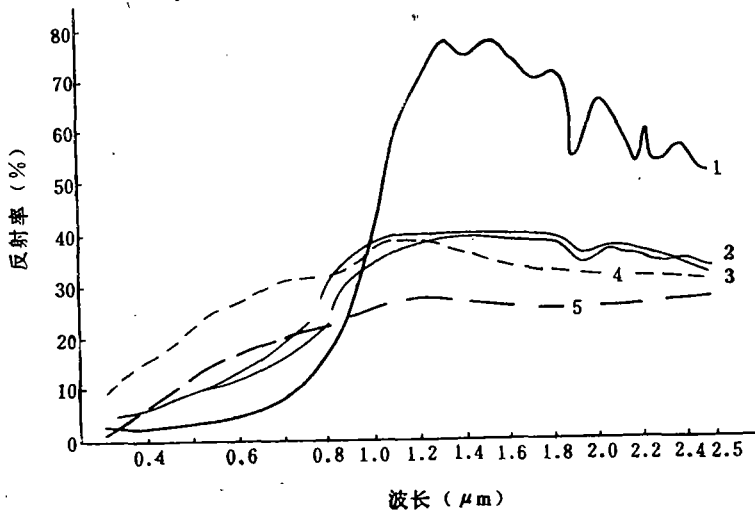


图 3 腐殖物的波谱特征曲线

1. 腐殖酸; 2、3. 腐殖叶; 4、5. 腐殖土

Fig. 3 Curve of spectrum feature of humus

曲线明显有烃类吸收带^[3]。矿物的情况较复杂,在 2.0—2.5 μm 谱段,主要是羟基基团(OH)化合物的反映。羟基仅有一个基本伸缩振动模式,为红外活性振动,在 2.75 μm 附近产生吸收带,倍频在 1.40 μm 附近。合频取决于与之结合的金属离子特性:与铝离子结合,合频谱带在 2.20 μm 附近(如高岭石);与镁离子结合,合频谱带在 2.30 μm 附近(蛇纹石——2.325 μm , 绿泥石——2.35 μm , 蛭石——2.30 μm , 滑石——2.36 μm , 金云母——2.30 μm , 阳起石——2.3075 μm)。此外,碳酸根基团的内振动倍频与合频在短波红外谱段有 5 个特征吸收带: 1.90, 2.00, 2.16, 2.37 和 2.55 μm , 其中 2.37 μm 吸收带也位于烃类吸收带中。矿物波谱的干扰是肯定的,首先查明可能造成干扰的矿物种类及含量,然后利用矿物吸收带较窄的特点,采用窄带多波段遥感探测,用计算机图像处理的方法予以排除。

2.27—2.46 μm 烃类吸收带具有较高的响应度,采用中国科学院上海技术物理研究所研制的航空短波红外分光光谱扫描仪(ASIS),在新疆干旱区试验中获得约 300 的高信噪比,计算机图像处理中油气遥感异常达 5bit。

总而言之,利用烃类微渗漏 2.27—2.46 μm 特征吸收带进行油气资源直接勘探,是可能的、可行的、有充分理论依据的。

四、红外遥感油气勘探的技术方法

红外遥感是 80 年代以来才应用到地质探矿领域的新技术,有广泛实用价值的主要为短波红外谱段(1.3—2.5 μm)。短波红外谱段的地物波谱特征仅含羟基化合物、碳酸盐及有机烃类,前者多为热液矿床的指示标志(如有色金属及黄金矿床等),后者被笔者定为油气藏的指示。但短波红外谱段太阳辐射能量较低,必须选用灵敏度较高的探测器;其次各

种标志地物波谱吸收带之间间隔较小,必须采用适当的窄波段才能甄别;另外窄波段遥感探测捕获的信息相关性很高,计算机图像处理难度较大。由于上述诸原因,在油气遥感勘探的研究中,必须发展一套相应的技术方法。

遥感探测器的选择是研究的基础,要求具有噪声低、适当的波谱响应范围和理想的视场响应、线性响应及偏振响应等特性。我们选用的 ASIS 以四方稜镜为扫描部件,主镜通光面积 64.35cm^2 , 焦距 23cm , 光学瞬时视场角 6mrad 。红外探测器采用 12 元线阵 PbS, 比探测率 $D^* = 5 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, 时间常数 $200\mu\text{s}$, 截止波长 $3\mu\text{m}$, 峰值波长 $2.3-2.7\mu\text{m}$, 光敏面积 $1.4 \times 1.4\text{mm}^2$ 。12 个探测波段的设置见表 2。一般带宽为 $0.1\mu\text{m}$, 在烃类吸收峰处,为了适应识别干扰矿物的需要,把带宽细分为 $0.05\mu\text{m}$ 。扫描数据为实时 CCT 数字记录,扫描率为 8 线/s,12 个通道的串行输出数据率为 403kbps。

表 2 航空短波红外分光光谱扫描仪的工作谱段表

Table 2 The work bands of airborne shortwave infrared split spectral scanner

通道	中心波长 (μm)	带宽 (μm)	波谱吸收特征
1	1.600	0.1	各种地物普遍呈高反射
2	2.035	0.1	
3	2.087	0.1	
4	2.143	0.1	碳酸盐的次级吸收峰
5	2.200	0.1	
6	2.205	0.05	粘土矿物吸收峰
7	2.250	0.05	绢云母吸收峰
8	2.275	0.1	黄钾铁矾吸收峰
9	2.300	0.05	腐殖酸吸收峰
10	2.330	0.05	烃类、金云母、蛭石吸收峰
11	2.370	0.1	烃类、蛇纹石吸收峰
12	2.450	0.1	烃类、碳酸盐、滑石吸收峰
			碳酸盐吸收峰

对扫描遥感数据的获取而言,工作平台的稳定性是很关键的,特别是在进行航空遥感探测时,更应选用稳定的飞机平台,适中的飞行高度及碧空天气条件,进行面积覆盖作业。

油气遥感直接勘探的技术关键是采用适当的计算机图像处理方法,将混杂于各种地物信息中的土壤烃组分异常的信息提取出来。这项复杂的过程大体可分为两部分。

1. 航空短波红外分光光谱扫描数据的预处理

由于航空遥感平台的稳定性能较差、航空遥感扫描仪的扫描视场角较大,使得所采集的初始数据图像产生严重的辐射畸变和几何畸变,是长期以来影响应用于生产实践的难题。而油气藏本身的特点又是面积大,3 次试验均在万平方公里左右,所以解决航空遥感数据图像的预处理技术,就成了油气遥感直接勘探技术的重要支柱课题。

(1) 航空短波红外扫描数据的原始格式

短波红外分光光谱扫描仪的扫描视场角为 90° , 瞬时视场角为 6mrad , 故每个波段的每条扫描线可获得 256 个像素,采用 BIP 格式数字磁带记录(图 4)。图像数据为串行码,写

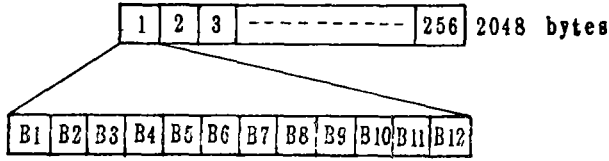


图 4 原始数据块结构图

Fig. 4 Diagram showing the block structure of the original data

成集合形式为:

$$P = \{[P_{ij}P_{ij} \dots P_{ij}], j = N, i = 1 \dots M\}$$

(2) 数据格式的转换

为了便于计算机运算,将数据由 BIP 行交叉,变换成计算机兼容的 SLB 或 BSQ 波段交叉的格式。

(3) 原始数据的质量检查

回放原始图像,检查扫描数据质量。如有漏点、丢行情况,予以插值处理,填平补齐。检查原始数据的分布状态及辐射量度,如不符合正态分布,则予以拉伸调整。

(4) 原始数据中零值数列的剔除

短波红外分光扫描仪的工作起始点是随机的,所以每条航带的扫描图像的起始点也是随机的,不一定在图像边缘。为此,在图像中往往加有 9 行零点数值(图 5),j + 9 处才是真正的航带图像的边缘,必须将零点剔除,并将 1 → j 的数据贴到 n 之后,才恢复成真正的“原始图像”。

(5) 正切纠正

对任何一种光学-机械式扫描仪,都存在着扫描视场角造成的图像畸变、辐射误差及横向比例尺压缩,随着扫描视场角的加大,这些畸变也随之增大。航空扫描仪为了保证一定的扫描效率,一般扫描视场角在 90° 左右,机下点与最大扫描角点的像元覆盖面积几乎相差一倍,而且每个像元点均不相同,这将导致行向像元之间的不可比性。以航空短波红外分光扫描仪为例,其扫描视场角为 90°,瞬时视场角 6mrad,在相对航高为 5 000m 时,机下像元点的空间分辨率为 30 × 30m²;在最大扫描角时,像元的空间分辨率为 58 × 41.6m²。就面积而言,几乎增大了一倍,而程辐射距离则增长了 40%,但其变化符合正切函数(图 6),称之为正切畸变。

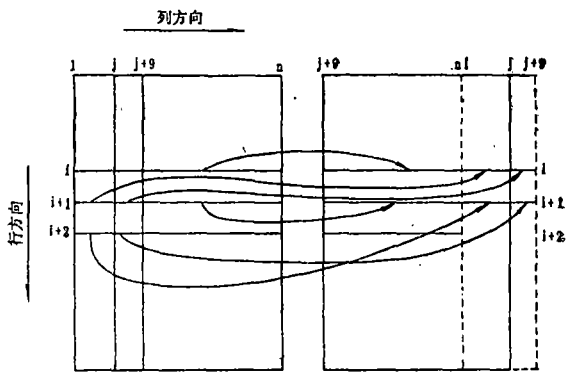


图 5 图像零值剔除示意图

Fig. 5 Diagram showing nought rejection in images

为了从实际上清除正切畸变,现假设位于垂直航线方向同一扫描线上各像元点的记录是同时记取的(实际为 1/20.s),并认定这条扫描线的外方位参数为常数。设: 扫描数

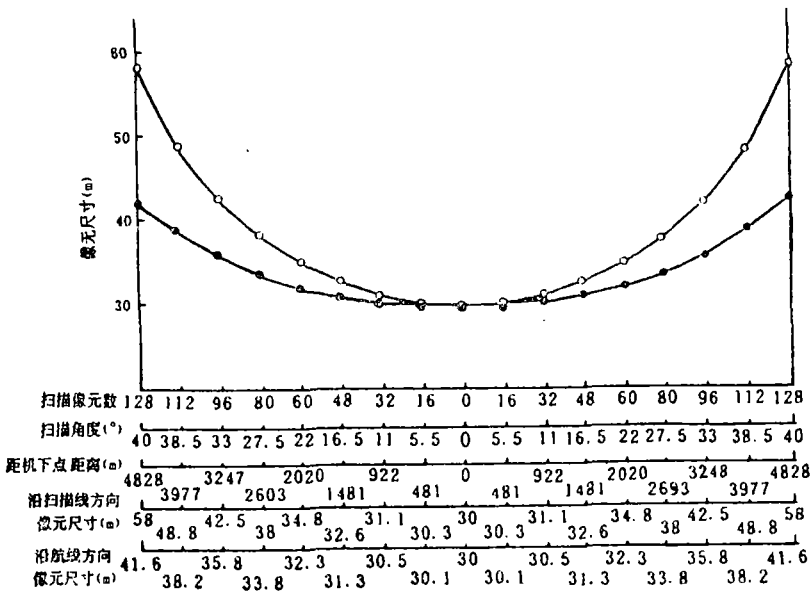


图6 短波红外分光光谱扫描仪像元尺寸变化关系图

Fig. 6 The pixel size map of shortwave infrared split spectral scanner

据采集的航高为 H ，扫描视场角为 θ ，瞬时视场角为 ϕ ，像元宽度为 L ，扫描线长为 $NL(N = 128)$ ，那么：

$$L = H \tan \theta$$

机下点像元

$$L_1 = L = H \tan \phi$$

最大扫描角像元

$$L_N = H \tan(\theta - (N - 1)\phi)$$

按此算法，将 L_1, \dots, L_N 诸像元以 L_1 为单位重新采样(图7)，得出 S_1, \dots, S_M 个

新像元，按比例赋予相应的辐射值。这一处理过程称为正切纠正，可将由于行扫描造成的像元大小、辐射差异及比例压缩等数值扭曲复元。

(6) 辐射纠正

对航空遥感而言，由于辐射因子的影响造成的遥感数据的误差，主要来自扫描仪辐射、太阳高度角及大气状况的变化。

由于扫描仪的大视场角造成探测器到每个采样点的距离不等。大气近似一中性滤光片，由于大气辐射程的不同，同一目标体处于不同的扫描部位，所记

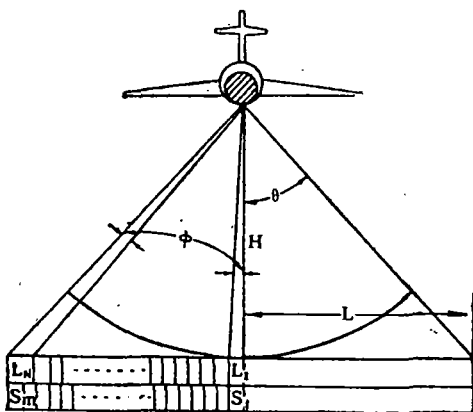


图7 正切纠正示意图

Fig. 7 Diagram showing the tangent rectification

录的亮度值亦不同,形成严重畸变。另外,除非在太阳位于天顶时,太阳辐射总有一个入射角,而扫描仪为中心行扫描式,这就造成了扫描带一半“顺光”、一半“逆光”,反应为图像半边偏黑半边发白,形成了同一目标体因所处的顺逆入射光的不同,导致记录的亮度值亦不同。

太阳高度角的变化和大气光状的不均一性,是无时无刻都在变动的,关系相当复杂。图 8 表明,地物目标被太阳辐射 $N_s(\lambda)$ 和大气散射太阳辐射分量 $N_i(\lambda)$ 照射,目标体反射太阳辐射量 $N_r(\lambda)$ 和大气散射太阳辐射量 $N_o(\lambda)$ 之和为遥感器所记录的总辐射量 $M(\lambda)$:

$$M(\lambda) = N_r(\lambda)\tau + N_o(\lambda) \quad (1)$$

式中: τ ——大气百分比透过率。

上式中的各参量都与波长有关,其中:

$$N_i(\lambda) = \frac{E_o \tau}{\pi} \quad (2)$$

式中: E ——目标上方整个半球 (180°) 的太阳辐射总量, ρ ——目标反射

$$\tau = e^{-\tau' \sec \theta} \quad (3)$$

式中: τ' ——大气光学厚度。

$$\tau' = \tau'm + \tau'p + \tau'a$$

式中: $\tau'm$ ——分子散射分量,与波长的 $1/\lambda^4$ 相关; $\tau'p$ ——气溶胶散射分量,与波长的 $1/\lambda^{1.3}$ 相关; $\tau'a$ ——选择性吸收分量,与波长的高次方有依赖关系。

联立方程 (1),(2),(3) 便可得出大气对遥感探测影响的描述:

$$M = \frac{E \rho \tau e^{-\tau' \sec \theta}}{\pi} + N_o \quad (4)$$

其中,太阳总辐射量为

$$E = N_0 \cos \theta_0 e^{-\tau' \sec \theta_0} + N_i$$

将 E 代入 (4) 式得

$$M = \frac{\rho \tau (N_0 \cos \theta_0 e^{-\tau'(\sec \theta_0 + \sec \theta)} + N_i e^{-\tau' \sec \theta}) + N_o}{\pi}$$

从上式可见,航空遥感探测获得的地物目标辐射量取决于: (1) 目标体的反射率 ρ ; (2) 太阳的总辐射 N_0 ; (3) 目标体相对的太阳入射光束方向的取向 $\cos \theta_0$; (4) 大气光学厚度 τ' ; (5) 太阳辐射光程 $\sec \theta_0$; (6) 探测器接收目标体反射的光程 $\sec \theta$; (7) 天空光散射光程辐射度 N_o 。

不难看出,对同一地物目标而言,处于不同的扫描位置,所获得的亮度值不同;相反,不同的地物目标,在特定的扫描位置,有可能获得相同的亮度值。这就给遥感应应用识别带来许多假象,因此不经过辐射纠正的遥感图像是不可能得出正确结果的。

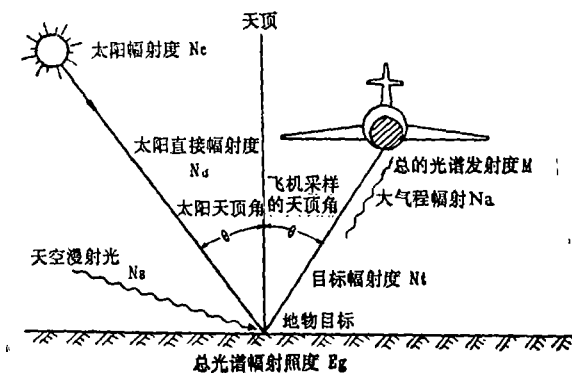


图 8 航空遥感探测大气辐射干扰原理图

Fig. 8 Theoretical diagram showing atmosphere radiation effectiveness on airborne remote sensing

辐射纠正的方法很多,在试验研究中均进行了对比分析,其中以数理统计法较理想,实际上这是一种无参量的辐射纠正方法。设 $M(x, y)$ 为辐射纠正后的理想图像, $G(x, y)$ 为实际获得的遥感图像,二者之间为一函数关系:

$$F(\mu, \nu) = \frac{M(x, y)}{G(x, y)}$$

式中, μ, ν 为频率域坐标。实际上,

$$G(\mu, \nu) = M(\mu, \nu)H(\mu, \nu) + N(\mu, \nu)$$

式中, $N(\mu, \nu)$ 为遥感图像的随机噪音。那么,

$$M(\mu, \nu) = G(\mu, \nu)/H(\mu, \nu) + N(\mu, \nu)/H(\mu, \nu)$$

只要测出图像的辐射传递特性函数,此方程便有解。辐射传递特性函数的测定是很困难的,可以利用标准灰体的实测反演,或根据经验予以给定。

具体的作法用计算机实现是比较简单的,只要参数选择适当,便可得到理想的结果。

(7) 几何校正

航空遥感图像中的几何畸变同样十分严重,大体上可分为两类:一类为系统几何畸变,主要为遥感探测器所固有;一类为非系统几何畸变,主要为飞机的瞬时姿态(滚动、俯仰、航偏、航高)变化所造成。这些因素对扫描图像成图影响较大,多采用大比例尺航空正射影像图为蓝本进行校正,方法是早已成熟的。

扫描图像经过几何精校正和数字镶嵌之后,形成一幅区域图像,提供专题处理使用。

短波红外分光扫描图像油气信息专题处理,其实质为专题模式识别和定量分析过程。

2. 航空短波红外分光扫描数据的非相关处理

为了减少噪音的影响,首先对经过系统预处理的图像进行 5×5 的空间滤波。根据经验,窗口尺寸影响颇大,窗口太小,噪音清除不完全;窗口过大,则易造成图像模糊。对图像进行统计分析,有助于了解图像数据的组合特征,便于确定图像增强方案及选定处理参数。统计分析内容包括:每个波段图像的最小值、最大值、均值、方差、中值、四分点、十分点、波段相关矩阵、协方差矩阵、特征值及特征向量等。

经统计分析发现,短波红外分光扫描图像数据的波段相关性很高(表 3),最大相关系数达 96.2%,最小相关系数也为 68.3%。这样的图像数据必需进行非相关处理,拉开信息分布,突出有价值信息。

非相关变化既要保持原数据的特性,又要加大数据间的差异。设 P 为一幅 $M \times N$ 图像,为消除其高相关性,选取一个正交矩阵 O (O 的尺寸亦为 $M \times N$),即:

$$P' = PO$$

从矩阵理论可知,如果使 P' 图像的相关矩阵对角线化,就可以清除图像数据间的高相关性。正交矩阵 O 的选取有多种方法,最简便的是利用 P 图像的相关系数矩阵和协方差矩阵所得到的特征向量所组成的正交矩阵,亦可以使用因子相关矩阵,将各波段间的相关系数减小到 30% 以下(表 4)。

图像数据经非相关变换后,分析出油气信息相对集中的 3 个分量,再经增强处理及色

表 3 短波红外分光扫描图像数据的波段相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of data bands obtained from shortwave infrared split scanner

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.000 00	0.857 41	0.813 01	0.730 58	0.763 30	0.712 89	0.681 32	0.835 21
2	0.857 41	1.000 00	0.961 95	0.914 08	0.919 75	0.876 85	0.853 82	0.850 52
3	0.813 01	0.961 59	1.000 00	0.945 66	0.956 39	0.889 27	0.866 52	0.838 60
4	0.730 58	0.914 08	0.945 66	1.000 00	0.953 03	0.946 28	0.922 21	0.739 79
5	0.763 38	0.919 75	0.956 39	0.953 03	1.000 00	0.924 11	0.883 81	0.785 44
6	0.712 89	0.876 85	0.889 27	0.946 28	0.924 11	1.000 00	0.934 04	0.697 26
7	0.681 32	0.853 82	0.866 52	0.922 21	0.883 81	0.934 04	1.000 00	0.682 25
8	0.835 21	0.850 52	0.838 60	0.739 79	0.785 44	0.697 26	0.682 25	1.000 00

表 4 短波红外分光扫描图像各波段间的因子相关矩阵

Table 4 Factor correlation matrix of each band of shortwave infrared split scanner

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.356 45	0.347 73	0.344 81	0.362 66	0.361 75	0.353 35	0.335 00	0.365 61
2	-0.399 96	0.325 44	-0.205 85	0.012 01	0.140 86	0.461 55	0.620 25	-0.272 08
3	-0.107 73	-0.530 41	0.705 27	0.286 01	-0.298 25	-0.170 70	0.091 64	0.036 76
4	-0.033 59	-0.336 06	-0.098 95	0.464 70	0.593 70	0.152 81	-0.557 67	-1.859 6
5	0.423 34	-0.373 43	-0.555 19	0.366 10	-0.285 45	-0.118 44	0.183 96	0.331 23
6	-0.461 43	0.462 81	-0.119 76	0.616 25	-0.408 16	0.049 23	-0.077 32	0.061 53
7	-0.123 14	-0.148 36	0.021 60	-0.234 67	-0.308 34	0.674 43	-0.372 16	0.467 82
8	-0.541 25	-0.056 97	-0.092 11	-0.041 44	0.354 87	-0.371 91	0.073 13	0.651 16

空变换,即可用模式识别技术提取出油气遥感异常。

作为一个训练有素的遥感应用工作者,依照上述一系列的技术路线及方法,可以做出一系列单信息油气遥感异常图:(1)土壤烃组分异常图;(2)粘土矿化异常图;(3)碳酸盐矿化异常图;(4)地植物烃异常图等。然后在此基础上,参照地震构造图、地表景观图、地表化探图等资料进行多元信息复合分析,对油气遥感异常分区和分类,再采用特尔菲评价法进行排队,最终做出综合评价图,划定油气远景区,并写出分区评价报告。

五、红外遥感油气勘探技术的有效性评估

红外遥感油气勘探技术与各种非地球物理油气勘探一样,都依据同一理论基础——油气藏烃类微渗漏理论,只是采用的探测手段不同而已。但遥感技术有其独特的技术优势:遥感技术是面积扫描探测,即采集地面的全部信息;而其它非地震油气勘探技术是采用大间隔采样(1—2km),分析若干毫克的样品代替几平方公里面积的信息,难免具有较大的随机性。从其实测资料可明显看出,数据大都为“跳跃”分布,看不出渐变的趋势,就是很典型的说明。笔者曾专门做过一次试验,采用相同点距、不同时相或不同点位及不同点距、相同时相的地表化探测量,结果面貌皆非,找不到任何相似异常^[4]。此后,中国科学院地球化学研究所广州分部的李本超也重复了这项试验,结论相同。这说明非地震油

气勘探采样点距是影响技术成败的关键。点距以 30—200m 为宜,点距加密成本将成倍增加,而且不可能大面积同步采样,只宜作小面积测量。相比之下,遥感技术大面积快速全覆盖的采样方法,具有无可比拟的优越性。

红外遥感油气勘探技术,经 3 次大面积重复试验,取得了稳定的结果。1988—1989 年在新疆准噶尔盆地东部进行了全面的油气遥感试验,证明 2.27—2.46 μm 烃类吸收带对油气直接勘探具有明显成效。以短波红外探测为主体的油气遥感勘探成果,共圈划 18 个异常区带,经地面核查均为深部热演化烃类的反映。其中与已知油流区块的符合率达 63.6%,未知区的一些异常区块有的已被后期勘探所肯定,但全工区最好的西泉异常尚未被认识。1989—1990 年在新疆塔北地区进行了第二次大面积试验,除在技术方法上进一步深化以外,圈出 6 个异常区。其中轮南异常区含部分已知区,异常范围与地震勘探含油区不完全一致。经钻探证实,在遥感异常区内均见油气,区外有三口井均为干井。另外在琼夏异常布有哈 1 井,位于遥感异常的边缘,见 280m 厚含砾清砂岩,而哈 2 井在遥感异常之外,见油情况不好。此次试验取得了更高的符合率。1991 年在新疆塔北南进行了第三次大面积试验,共圈定 10 个遥感异常区,由于全部都是未钻探区,目前只有吉拉克异常被部分证实为高产油气区,其它异常有待今后钻探验证。

经 3 次大面积试验,本方法被生产部门认为是一种经济、迅速、有实用前景的方法,加强了在遥感异常区内钻探的信心。1992 年已将此技术列入塔中沙漠区的 $3 \times 10^4 \text{km}^2$ 的生产计划。

红外油气遥感勘探确实是一项经济、快速、有效的高新技术,如以间接遥感勘探为基础,以短波红外遥感直接勘探技术为主体,配合地表化探、地表放射性及地植物学等技术作为地面核查手段,形成一整套油气遥感综合勘探评价技术,定能在油气勘探领域占领一席之地,为我国油气资源勘探开发作出应有的贡献。

然而,这项技术有待生产实践的进一步验证,一些应用基础及地面核查技术有待进一步深化。

本研究深得中国石油天然气总公司、塔里木石油勘探开发指挥部及新疆石油管理局的支持,在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] W. Duchscherer, Geochemical methods of prospecting for hydrocarbons, Oil and Gas Journal, Dec. 1, 1980.
- [2] 朱振海,遥感直接勘探油气藏烃类微渗漏原理,油气遥感勘探评价研究(1),中国科学技术出版社,1991 年。
- [3] 朱振海,遥感技术直接探测烃类微渗漏的方法研究,科学通报,(16),1990。
- [4] 朱振海,地表地球化学的采样方法,油气遥感勘探评价研究(1),中国科学技术出版社,1991 年。

Effectiveness Estimation of Infrared Remote Sensing to Oil-gas Resources Exploration*

Zhu Zhenhai

(*Institute of Remote Sensing Application, CAS*)

Abstract

Remote sensing can be divided into direct and indirect-detecting types at viewpoint of oil-gas resources exploration. Infrared remote sensing technique, which is of direct-detecting type, is based on the theory of microseepage of hydrocarbon reservoir. This approach takes advantage of two-peak absorption on 2.27—2.46 μm spectrum related to hydrocarbon elements anomalies of soil. We have established a series of procedures dealing with airborne remote sensing images and anomalous information extraction methods. The accuracy we derived from the contrast with the known oil-gas fields, is 70 percent, and some remote sensing anomalies in the unknown oil-gas fields have been confirmed by succeeded drillings.

Key words Infrared remote sensing Oil-gas resource exploration Absorption on spectrum