

# 热红外遥感探测油气藏

文百红 郭建军

(中国石油勘探开发研究院,北京,100083)

**摘要** 利用热红外遥感探测油气藏是近年来发展起来的一项新技术。对各类地质体引起的温度变化规律的研究和对其异常特征的检测和提取是目前研究的重点。利用异步迭代差分法对油气藏上下方非稳态数学物理方程求解,得出油气藏上方因隔热效应而产生温度负异常和在油气藏正下方形成明显的温度正异常的认识。井温测井和地面测温资料初步证实了理论模型的合理性。对辽河油田大民屯凹陷 TM6 的遥感影像的处理和解释,说明油气藏上方存在温度负异常,据此预测了一个含油气聚集区。

**关键词** 热红外异常 遥感探测 油气藏 大民屯凹陷

## Thermal Infrared Remote Sensing for Hydrocarbon Deposits

WEN Baihong GUO Jianjun

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing, 100083)

**Abstract** Thermal infrared remote sensing for hydrocarbon deposits is a newly developed exploration technique. The key problems are focused on the spatial relationship of temperature with geological bodies in the subsurface and the detection and extraction of the temperature anomalies at the surface. Through numerical solution of the physico-mathematical equations for geophysical model of hydrocarbon deposit, it is concluded that there occur negative temperature anomalies over hydrocarbon deposits at the surface and that there also exist positive temperature anomalies beneath the deposits. The theoretical results are preliminarily confirmed by thermal logging data and surface temperature survey. By processing and interpreting Landsat TM6 image of Damintun depression in Liaohe Oilfield, some negative temperature anomalies are verified over known hydrocarbon deposits, and a negative anomaly area is predicted which shows potential of hydrocarbon deposits.

**Key words** thermal infrared anomaly remote sensing hydrocarbon deposit Damintun depression

最近二十多年来,随着空间技术、信息技术、计算机技术和电子技术等高新技术的发展和引入,遥感探测技术在工农业生产、国防建设和环境保护等多方面发挥着越来越大的作用。航空遥感和航天遥感能获得大范围的、实时动态的、地物景观的电磁波辐射信息,是区域地质调查和灾情监测的一种有效的研究手段(郭德方等,1995;裴伟等,1997)。特别是新型的航天热红外传感器(CBERS、TM6、ASTER、MODIS等)可以获得研究区地下热源体的温度分布信息,为深部地质构造研究和油气勘探提供了一种新的、有效的探测手段。热红外遥感地下探测技术目前处于试验研究阶段,研究工作主要集

中在对各类地质体产生的温度变化规律的认识及其异常特征的检测和提取两个方面。

根据地下油气藏上下方温度分布建立的数学物理模型,得出了油气藏上方因隔热效应而产生温度负异常和在油气藏的上下方形成明显的正负温度异常对的认识,通过3口温度测井资料与理论模型的对比分析,初步确认了地下油气藏上下方温度异常特征。在此基础上,对辽河油田大民屯凹陷的热红外遥感异常进行了分析和油气预测。

### 1 油气藏上方温度分布模型

根据地下热源分布及岩石和油气藏不同的热传

导参数,建立油气藏周边的热传递和热对流的地质物理模型(图1),相应的二维非稳态数学物理方程是

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \lambda(x, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(x, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c_w \rho_w v_x(x, z) \frac{\partial T}{\partial x} - c_w \rho_w v_z(x, z) \frac{\partial T}{\partial z} + B(x, z, t) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

其中,  $T$  为温度;  $\lambda$ 、 $c$ 、 $\rho$  分别为岩石和油气介质的导热系数、比热和密度;  $c_w$ 、 $\rho_w$ 、 $v_x$ 、 $v_z$  为孔隙水的比热、密度及沿  $x$  和  $z$  方向的渗流速度;  $B(x, z, t)$  为热源分布;  $t$  为热传导时间。

设坐标原点为油气藏中心,研究区的横坐标为  $(-a, a)$ ,纵坐标为  $(-c, h)$ 。假设研究区内不存在热源,即  $B(x, z, t) = 0$ ,油气藏的宽度为  $2b$ (厚度可以忽略)和埋深为  $h$ ,热导率  $\lambda_0$  很小,几乎可认为是绝热体,周围岩石的热导率  $\lambda$  各处均匀(只在油气藏的区域  $\lambda = \lambda_0 = 0$ )。油气藏周边流体渗流速度很小,可以忽略不计,即  $v_x = 0, v_z = 0$ ,并假设地下温度已达到稳态分布。在这种情况下,上述二维非稳态数学物理方程可简化为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(x, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0$$

边界条件为

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\pm a, z=0} = 0$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-c} = q_0$$

$$T(x, z) \Big|_{z=-c} = T_0$$

上述边值问题没有解析解。利用异步迭代差分法(Wen等,1999;文百红,2001),可以求得相应的数值解。图1中2条温度异常曲线是在  $z = h = 1500 \text{ m}$ ,  $\lambda_0 = 0 \text{ W/mK}$ ,  $\lambda = 0.25 \text{ W/mK}$ ,  $T_0 = 323 \text{ K}$ ,  $q_0 = 0.01 \text{ W/m}^2$  及  $z = 0 \text{ m}$ ,  $\lambda_0 = 0 \text{ W/mK}$ ,  $\lambda = 0.25 \text{ W/mK}$ ,  $T_0 = 323 \text{ K}$ ;  $q_0 = 0.01 \text{ W/m}^2$  的情况下获得的。

从图1可以看出,由于油气藏的隔热效应,油气藏在地面( $z = 1500 \text{ m}$ )的投影范围内产生了一定的温度负异常,最大可达  $-1.8 \text{ K}$ 。这样大小的温度异常在分辨率为  $0.3 \text{ K}$  的热红外遥感数据中可以检测出来。

数值计算还表明,越靠近油气藏的顶部,温度负异常越明显。在油气藏的直接盖层上,温度负异常可达  $-3 \text{ K}$ 。

更有意义的是,由于油气藏的隔热效应,在油气藏的正下方( $z \rightarrow 0 \text{ m}$ )出现了热量的积聚,形成了明显的温度正异常,最大可达  $4 \text{ K}$ 。结果在油气藏上下方形成了正负温度异常对。利用这一异常特征可以判别油气储层的存在。

因此,数值计算结果表明,利用热红外遥感探测地表温度负异常可以揭示油气藏的分布范围,而利用温度测井得到的正负温度异常对可以预测油气储层的位置。

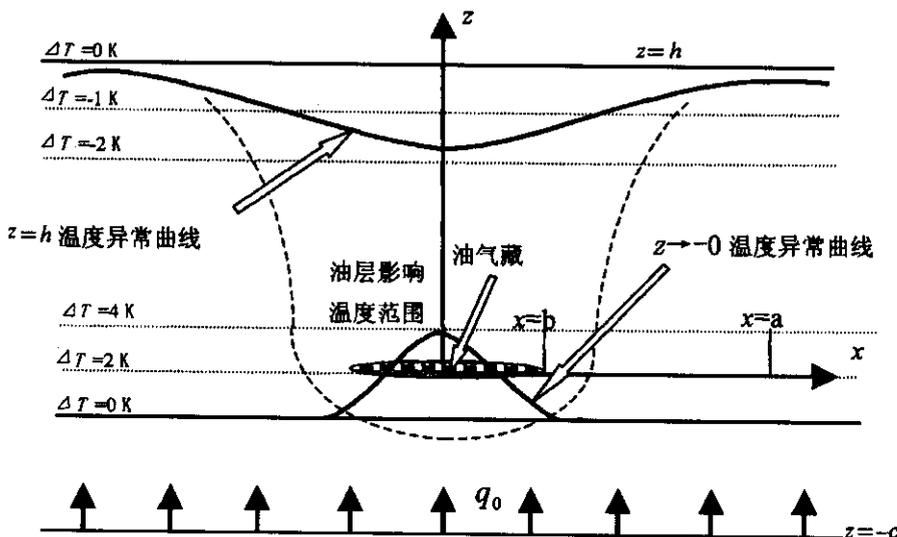


图1 油气藏温度分布地质物理模型及数学物理模拟的数值计算结果

## 2 温度测井资料与理论模型对比分析

研究中收集了国内已知油田中 3 口实际温度测井资料,以研究油气藏上下方温度分布特征。图 2 为安塞油田 DP4 井测井资料在油层组(长 6)段附近(1 520~1 696 m)的一段曲线。温度测井曲线 1 是在完钻至少 24 h 后所观测的结果,而温度测井曲线 2 是在第一次测温 2 d 以后所观测的结果。

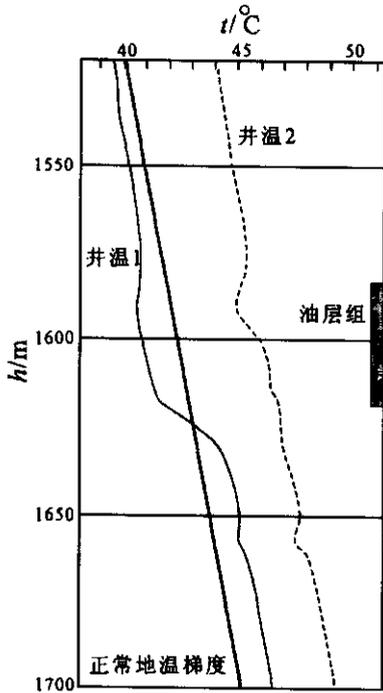


图 2 安塞油田 DP4 井长 6 段温度测井曲线

Fig. 2 Temperature logging of DP4 in Ansai oilfield

从井温曲线 1 可以看出,在油层组段内及上方 40 m 的范围内,井温曲线低于正常地温曲线,出现负异常,约为  $-2^{\circ}\text{C}$ ,而在油层组的下面也是 40 m 的范围内出现了井温快速增长,超过了  $3^{\circ}\text{C}$ 。在油层组上下出现  $5^{\circ}\text{C}$  以上的温度异常。若考虑到测温时已完钻多时而且温度递减呈指数衰减规律,则可以预测油层组上下方的实际温度异常会比  $5^{\circ}\text{C}$  大得多。对加拿大阿尔伯塔省钻井资料获得的温度-深度曲线可以作为旁证(Fons, 2001)。该温度-深度曲线表明,油气藏下方的地温比相邻无油气区同等深度的平均地温增高  $15\sim 34^{\circ}\text{F}$  ( $8.3\sim 18.9^{\circ}\text{C}$ )。

从井温曲线 2 可以看出,经过 2 d 油水的混合,井温回升,上升幅度达  $4.5^{\circ}\text{C}$ ,而油层组上下温度异常已明显减小,基本恢复到正常地温曲线位置。只

在油层组内仍还保存有局部负异常。因此,为了取得比较好的解释和评价效果,应尽早开始井温测量,并应进行井温补偿校正。

其他 2 口井的测井结果与 DP4 井的情况类似,在此不再赘述。总之,与正常地温曲线相比,在油层组段内和上方表现为温度负异常,而在油层组下方表现为温度正异常,这与前面理论模型所得到的油气藏上下方的温度异常特征是一致的。但由于井温测井通常只在感兴趣的井段进行,目前未能获得近地表温度垂向分布的直接证据。Fons 在美国东得克萨斯油田上进行的地面热红外地温测量表明,油田上方确实出现了  $5^{\circ}\text{F}$  ( $2.8^{\circ}\text{C}$ ) 左右的温度异常。这从地面温度测量方面证实了理论模型得到的因油气藏的隔热作用油气藏的上方形成温度负异常的认识。

## 3 辽河油田大民屯凹陷遥感热红外异常分析

图 3 为 1988 年 10 月 18 日美国陆地资源卫星 Landsat 获得的经过多项校正后的辽河油田大民屯凹陷热红外波段 TM6 的遥感影像(原图为彩图)。

TM6 的波段范围是  $10.4\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 。TM6 接收到的电磁波主要是由不同性质和不同深度的地下热源(地质体)通过热传导到达地表的热辐射能,是由地面的真实温度和其波谱发射率来决定的(郭德方等, 1995)。因此,真实温度高或反射率大的强辐射体为浅色调,反之则为深色调。在其他条件相同的情况下,白天被太阳加热时,比热大的地物表面真实温度上升较慢,比热小的地物表面真实温度上升较快。在夜间降温时,比热大的地物表面真实温度下降较慢,比热小的地物表面真实温度下降较快。例如,水的比热大,水体在白天热图像上为“冷色调”,在夜间热图像上为“暖色调”。

研究表明,影响植物反射波谱的主要因素是叶片的形状、表面构造、叶片的色素含量等,影响土壤反射波谱的主要因素是腐殖质、氧化铁含量、机械组合、矿物和盐分含量、表土结构(砂质土、壤土、粘土)、湿度等,影响水体反射波谱的因素有水的杂质含量、水中悬浮物、水生植物的叶绿素含量等(庄家礼等 2000)。为了消除植被、水分和地形等因素造成的干扰,首先对热辐射波段影像进行大气校正处理,同时利用缨帽变换消除和压制湿度、植被和混合

像元的影响,得到地面辐射温度场,以此为背景提取相对的温度异常信息。通过以上的处理后,获得了辽河油田大民屯凹陷的 TM6 的遥感影像图(图 3)。根据遥感影像的色调、纹理和形态特征对遥感影像图中的低温异常(暗色调异常)进行分区和分类,得到 6 个低温异常区块。结合油气地质和地理地貌特点初步分析,1~4 号异常属深部热源引起,其中,1、2、3 号异常覆盖了主要的已知油田范围,预测 4 号异常为三台子斜坡带油气聚集区。而 5、6 号异常主要是辽河两岸含水量大的河滩阶地的反映。

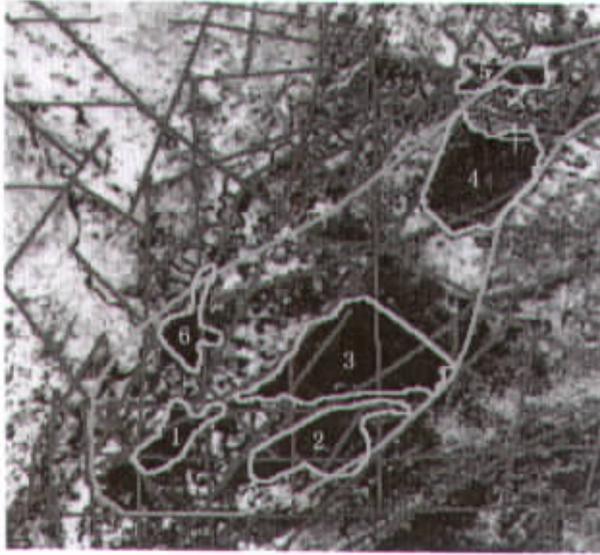


图 3 辽河油田大民屯凹陷 TM6 遥感影像及解译图

Fig. 3 Interpretation of TM6 thermal infrared imaging of Damintun depression in Liaohe oilfield

利用热红外遥感影像还可以揭示许多出露的和隐伏的断裂构造分布特征。断裂构造往往位于渗透率较大的薄弱地带或不同地块的交接地带,地质体的温度变化容易通过断裂中的流体运动传递到地面。因此,在热红外遥感图上通过追踪影像上线性体,可获得断裂构造的分布信息(图 3)。

在热红外遥感图像解译中,最难识别的是水体和浅表水远距离的渗出区与深部地质体(如油气藏)温度效应的作用区。通过采用多波段处理、彩色合成的方法,消除地表环境因素影响,识别及提取油气温度异常区是今后热红外遥感探测油气藏研究工作的重点之一。

## 4 结论

(1)所建立的油气藏上方温度分布的数学物理模型是复杂油气圈闭中温度分布模型的一种简化,它没有考虑油气藏边水向上渗流对温度分布的影响。这种模型在油气藏埋藏较深、密封性很好的情况下是比较适用的。

(2)从井温测井资料和地面温度测量资料的对比来看,理论模型所得到的在油气藏的上方油气藏的地面投影范围以内出现温度负异常,而在油气藏正下方出现温度正异常的认识是符合实际的。利用温度测井得到的正负温度异常对可以预测油气储层的位置。

(3)通过对辽河油田大民屯凹陷的 TM6 的热红外遥感影像的处理和解释,预测了 6 个低温异常,其中 5、6 号异常是由于辽河两岸高含水的河滩阶地所引起,1、2、3 号异常主要是已知油气藏的隔热效应所造成,4 号异常预测为未开发的三台子含油气聚集区的低温异常反映。

(4)热红外遥感探测油气藏的方法技术目前还处于实验研究阶段,由于油气圈闭类型的复杂性,有关油气藏周边的温度分布规律还没有形成统一的认识,需要对更多的温度测井资料和地面温度测量资料进行综合分析评价,以便建立更加完善的数学物理模型,对热红外遥感图像进行合理的解释和推断。

## 参考文献

- 郭德方等. 1995. 油气资源遥感. 杭州: 浙江大学出版社, 55~90.
- A B 裴伟等. 1997. 航天遥感信息在地质中的应用. 北京: 石油工业出版社, 69~75.
- 文百红. 2001. 油气浮渗流模型与遥感地球化学油气勘探. 见 2000 年中国博士后学术大会论文集(材料与能源分册). 北京: 科学出版社, 255~260.
- 庄家礼等. 2000. 地表组分温度反演. 北京大学学报(自然科学版), 36(6): 850~857.
- B Wen, O F Putikov. 1999. Gas bubble-facilitated transport of metals in lithosphere. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 9(1): 152~157.
- L Fons. 2001. Finding, mapping temperature anomalies can aid oil, gas exploration. Oil & Gas Journal, 99(23): 38~48.