

# 油气地球化学勘探 方法与应用

郝石生 林玉祥 王子文 等著



石油工业出版社

(北京)

2

5

## 前 言

油气地面地球化学勘探是应用地球化学的重要分支学科。它通过调查油气藏上方各种介质中地球化学场的分布与结构,圈定和评价异常,进而结合石油地质条件,直接指出油气聚集带和含油气圈闭。在油气勘探早期,利用显观油气苗寻找油气藏几乎是唯一的手段。随着现代分析技术的发展,使得通过检测地表介质中的微量烃类从而确定油气藏位置成为可能。从利用显观油气苗到寻找微观油气苗是地表油气化探技术的重大进步和质的飞跃。

我国油气化探工作始于50年代初期,伴随着石油勘探事业的步伐,很快兴起了第一个油气化探热潮,但由于分析测试水平较低、资料处理手段简单和实践经验不足等因素,所取得的成果与期望值有较大差距,导致油气地表化探事业在60年代后期逐渐衰弱。进入70年代末期,随着井下油气化探成果和经验的积累,地表化探基础理论和机理的深入研究,各种分析分离技术的发展和引入,以及对化探实践经验的总结和再认识,油气地表化探事业重新出现了生机和活力,进入了一个新的发展时期,并在我国东部、华北、西北、南方、大庆、二连等地取得了广泛的成功,所提供的预测性成果通过不同程度钻探验证,获得了工业油气流。

近年来,对油气化探理论和方法的研究逐渐系统化,各项指标参数、数据处理手段和综合解释水平都得到进一步的完善和提高,并不断在生产实践中取得较好的效果。但实际工作中同时也出现了这样那样的问题,直接影响了油气化探方法的推广和应用。从我国的油气化探工作现状来看,迫切需要一本有关化探理论最新研究成果、化探方法有效性、常用数据处理手段、综合解释方法以及化探工程决策等方面的指南。通过多年的化探实践和应用地球化学理论的研究,我们建立了油气垂向运移的地质模型和数学模型,对各种化探方法、数据处理和综合解释方法有了新的认识,并在井下化探和化探工程决策方面取得了较多成果。为了更好地与国内外同行进行交流 and 协作,共同推动油气化探事业的发展,我们编写了此书供有关人士参考。

本书由石油大学(北京)应用地球化学研究室和大庆石油学院地球化学研究室共同编写。石油大学郝石生、林玉祥编写了本书前言和前六章,大庆石油学院王子文、王振平编写了第七章和第八章。本书的成果是两研究室多名研究人员经过长期的辛勤劳动获得,其中李东平、于德聪、张振英、高耀斌、朱雷、李岩等同志参加了每项重要工作。研究室的柳广第、黄志龙、刚文哲等老师给予了许多帮助,华北石油研究院区域室刘和平主任、赵宝忠工程师、生油室史习慧高级工程师、沉积室何天裕工程师在地质资料收集、野外施工等方面给予了大力支持,还有其他一些同志在样品采集、室内分析、数据处理以及综合解释等方面做了很多工作,在此一并表示由衷的感谢!由于作者水平所限、时间仓促,文中不当之处,敬请各位专家、同仁批评指正。

# 目 录

第一章 油气地表化探的理论基础 .....	(1)
一、油气地表化探理论简介 .....	(1)
二、油气化探地表效应 .....	(9)
三、地表化探异常模式及其影响因素 .....	(12)
第二章 油气地表化探方法简介 .....	(18)
一、油气地表化探方法概论 .....	(18)
二、常规土壤气测量技术 .....	(20)
三、土壤气累积吸收法 .....	(22)
四、酸解烃法 .....	(25)
五、热释碳酸盐( $\Delta C$ )法 .....	(27)
六、土壤热释汞 .....	(30)
七、荧光分析技术 .....	(32)
八、地下水溶解烃分析技术 .....	(36)
九、海上油气化探技术简介 .....	(38)
第三章 野外施工与样品分析质量 .....	(40)
一、野外施工前的准备工作 .....	(40)
二、野外采样点位的确定 .....	(41)
三、采样深度的确定 .....	(42)
四、采样点位及样品的野外描述 .....	(43)
五、野外施工质量及应注意的问题 .....	(44)
六、样品的预处理 .....	(45)
七、样品分析质量 .....	(45)
第四章 油气地表化探的数据处理 .....	(48)
一、化探数据的正态分布检验 .....	(48)
二、化探指标的数值特征及其影响因素 .....	(51)
三、常用的化探数据处理方法 .....	(55)
四、指标的优选与分级 .....	(59)
五、背景值与异常下限的确定 .....	(62)
六、综合异常的确定方法 .....	(64)
第五章 化探异常特征及评价方法 .....	(66)
一、单指标原始值异常特征 .....	(66)
二、单指标趋势剩余异常特征 .....	(67)
三、原始值多指标综合异常特征 .....	(69)
四、趋势剩余综合异常特征 .....	(71)
五、综合异常区带特征 .....	(75)
六、化探剖面异常特征分析 .....	(76)
七、异常区烃类成因分析 .....	(76)
第六章 化探异常地质解释与评价 .....	(79)

一、我国某盆地 .....	(79)
二、我国东部某地区 .....	(83)
第七章 油气垂向化探概述 .....	(91)
一、油气垂向化探方法的依据及研究内容 .....	(91)
二、油气垂向化探的一般工作方法 .....	(94)
三、油气垂向化探数据处理 .....	(95)
四、油气垂向化探成果分析 .....	(99)
第八章 油气地球化学勘探工程决策 .....	(103)
一、决策基本理论简介 .....	(103)
二、油气化探工程决策过程中需要考虑的客观条件 .....	(105)
三、油气化探工程决策的原则和决策方法 .....	(107)
四、油气化探工程决策过程 .....	(111)
五、油气化探工程决策系统结构 .....	(113)
参考文献 .....	(115)

# 第一章 油气地表化探的理论基础

油气地表地球化学勘探的理论基础是一个非常复杂的课题。它是地面地球化学异常形成机制的解释依据,也是阐明油气化探科学性和规律性的根本,它的研究水平和完善程度直接影响着油气化探事业的发展和应用效果。虽然近年来国内外地球化学工作者加强了这方面的研究,对了解化探异常形成过程和分布特点、改进工作方法、探索新领域和途径起了很大促进作用,但仍属薄弱环节,对化探工作中出现的问题仍难以给出全面、准确的解释,不利于油气化探工作的顺利发展。本章将在现代油气生成和运聚理论基础上,结合我们近年的化探工作实践,详细论述油气地表化探的理论基础。

## 一、油气地表化探理论简介

油气藏中的烃类物质在各种动力作用下运移至地表会引起地面地球化学场的异常。人们借助于精密分析仪器检测微油气苗及其蚀变现象,根据地面地球化学场的分布特征来推测地下地球化学场的结构,并结合石油地质条件,评价地下油气藏的存在与分布。这就是对油气地表化探理论的高度概括,它包括油气形成条件、油气垂向运移、油气引起的各种地表及地下效应等方面内容。

### 1. 油气垂向运移

油气形成以后,在各种地质营力作用下,以各种方式发生多种类型的流动即为油气运移。它包括油气在油气源岩内部的流动和由油气源岩向储集层或输导系统流动的初次运移,沿储集层或输导系统运移直至第一次聚集的二次运移以及已聚集的油气继续运动的再次运移。油气藏是油气运移和聚集的结果,油气在各个方向上的运移都可以看成是垂向运移和横向运移的合成。现代石油地质理论认为,油气生成、运移、聚集以至散失、破坏是一个连续不断的过程。在这个过程中,油气的运动(或运移)是绝对的,油气的静止(或聚集)是暂时的、相对的,地下流体(包括油气)的运移遵循流体力学原理。引入流体力学的概念和地下流体力势的表达式,考虑到作用在地下流体上各种力的作用,如果取沉积表面为基准面,取标准压力为一个大气压,则地下孔隙流体力势( $\Phi$ )为

$$\Phi = -\rho g Z + \rho \int_0^p \frac{dp}{\rho(p)} + \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1-1)$$

式中  $\Phi$  —— 流体力势,指相对于基准面单位体积流体所具有的总势能;

$Z$  —— 深度;

$\rho$  —— 流体在深度  $Z$  处的密度;

$g$  —— 重力加速度;

$p$  —— 深度  $Z$  处的孔隙流体压力;

$\rho(p)$  —— 流体密度随压力变化的函数;

$\sigma$  —— 界面张力;

$\theta$  —— 润湿角；

$r$  —— 深度  $Z$  处岩石孔隙的毛细管半径。

式中第一项代表单位体积流体相对于基准面 ( $Z=0$ ) 具有的重力势能, 因为  $Z$  在基准面以下, 故取负值 (此时深度  $Z$  取正值); 第二项代表单位体积流体具有的弹性势能; 第三项代表单位体积流体具有的界面势能。

如果认为岩层都是亲水的, 除油气占据的孔隙空间外, 其余孔隙空间都由地层水充满, 这时, 地层水的水相力势 ( $\Phi_w$ ) 为

$$\Phi_w = -\rho_w g Z + \rho_w \int_0^p \frac{dp}{\rho_w(p)} \quad (1-2)$$

对于地层水来说, 不存在两相界面 (或看作  $\theta_{w/o} = 0$ ), 因此没有第三项界面势能, 而对油相或气相来说, 存在着“油-水”或“气-水”界面, 因而油相力势 ( $\Phi_o$ ) 和气相力势 ( $\Phi_g$ ) 分别为

$$\Phi_o = -\rho_o g Z + \rho_o \int_0^p \frac{dp}{\rho_o(p)} + \frac{2\sigma_{w/o} \cos\theta_{w/o}}{r} \quad (1-3)$$

$$\Phi_g = -\rho_g g z + \rho_g \int_0^p \frac{dp}{\rho_g(p)} + \frac{2\sigma_{w/g} \cos\theta_{w/g}}{r} \quad (1-4)$$

如果考虑到油和水的密度随压力变化很小, 可近似地将其看做是不可压缩流体, 即  $\rho_o(p) \approx \rho_o$ ;  $\rho_w(p) \approx \rho_w$ ; 再考虑到亲水岩层的  $\theta_{w/o}$  和  $\theta_{w/g}$  很小,  $\cos\theta_{w/o} \approx 1$ ,  $\cos\theta_{w/g} \approx 1$ , 这时上边三个式子可简化成:

$$\Phi_w = -\rho_w g Z + p \quad (1-5)$$

$$\Phi_o = -\rho_o g Z + p + \frac{2\sigma_{w/o}}{r} \quad (1-6)$$

$$\Phi_g = -\rho_g g Z + p + \frac{2\sigma_{w/g}}{r} \quad (1-7)$$

以上三式即实际中常用到的计算地下环境水相力势 ( $\Phi_w$ )、油相力势 ( $\Phi_o$ ) 和气相力势 ( $\Phi_g$ ) 的计算公式。据此, 我们可以计算出地下每一点的  $\Phi_w$ 、 $\Phi_o$ 、 $\Phi_g$ 。很明显, 在地层中  $\Phi_w$ 、 $\Phi_o$ 、 $\Phi_g$  的空间分布是连续的, 在地层中每一点单位体积油、气、水受到的作用力大小和方向为

$$\vec{F}_w = -\nabla \Phi_w \quad (1-8)$$

$$\vec{F}_o = -\nabla \Phi_o \quad (1-9)$$

$$\vec{F}_G = -\nabla \Phi_G \quad (1-10)$$

式中,  $\nabla \Phi_o$ 、 $\nabla \Phi_g$ 、 $\nabla \Phi_w$  分别表示油相、气相、水相力势梯度( $\nabla$ 是哈密尔顿算符)。

因为以上流体力势的概念考虑了作用在流体上的各种力的作用效果,因此只要根据流体力势的空间分布就可判别流体是否流动及其流动方向,不必再考虑其他因素。对地下油气水的运移情况来说,地层水按照水相力势的分布规律流动,由水相高力势区向低力势区流动,流动方向就是水相力势梯度的负方向。同理油、气也按照各自的流体力势场分布规律流动。水相力势处处相等( $\Phi_w = 0$ )时,即为地质上所描述的净水环境。如果油相(或气相)等力势面构成了一个(三维的)封闭空间,而且油(或气)相力势指向该空间的内部是降低的,则该空间就是可以富集油(或气)的场所——圈闭。地层中如果某一局部范围是油(或气)相的等力势空间,该空间就是一个实在的油(或气)藏。

引入流体力势的概念,可以方便地、定量地研究地下油气水受到的作用力大小和方向,可以确定流体相对平衡(或静止)的条件及其空间分布。流体力势理论从本质上揭示了地下流体(油、气、水)的运动特征和规律,是定量研究和模拟油气垂向运移的理论基础和依据。

从式(1-5)、(1-6)、(1-7)可以看到,地下流体力势均与埋深( $Z$ )和压力( $p$ )呈正相关,按地下流体从高势区向低势区流动的规律,地下流体方向是从折算压力高的地区向折算压力低值区(压力释放区)流动,从埋藏深处向浅处运移,即地下流体的运移以垂向运移为总的运动趋势,石油天然气也不例外。随着油气勘探实践的深入,油气垂向运移至地表的例证越来越多。

## 2. 地下烃类运移至地表的证据

油气(烃类)由地下深处不断向上运移到达地表,然后被氧化分解或散失到大气中,其证据如下。

①国内外大量含油气盆地内及边缘地带存在显观油气苗,这些油气苗曾是早期勘探的主要标志。它直观地反映了地下烃类生成、运移、散失并到达地表的事实。

②地表化探实践表明,地下油气藏上方地表土壤中存在壤气烃、土壤吸附烃异常,其附近大气中存在甲烷晕,近地表水溶烃异常也普遍存在。在油气运移到达地表的运移通道区引起的大地电磁效应、热效应及放射性等物理异常也已被地球物理勘探方法所证实。烃类在地表和近地表引起的热释碳酸盐异常、烃类氧化菌分布异常以及地表植物的生态变异也间接证明了烃类运移至地表的事实。

③大量地球化学测井和钻井剖面岩屑吸附气资料都能证明气态烃存在垂向运移。图 1-1 为下辽河拗陷黄金带和济阳拗陷临盘油气藏水溶烃含量的垂直变化图,图 1-2 为新疆塔东北沙雅地区沙 4 井岩屑吸附烃垂向变化图,从中可以发现从深部到近地表,气态烃组合具有较好的一致性,说明属同一成因类型。同时,水溶烃和吸附烃含量由深部油藏到近地表呈逐渐降低的趋势,且降低幅度在一定深度以上趋于平稳。

④应用荧光地球化学资料,能够发现土壤冷溶烃荧光光谱与地下产油层中烃类的荧光光谱相似。图 1-3 为尼克松—兰奇油田奥尔莫斯“B”层石油样品与该区土壤样品荧光光谱(据 C. F. Hebert),反映出地表荧光物质源于地下深处的油气藏。

同时,对甲烷等烃类的碳同位素分析表明,地表土壤中酸解烃主要是深源热成因的(如表 1-1,郝石生等,1990)。这充分说明了烃类从地下运移至地表土壤中的事实。

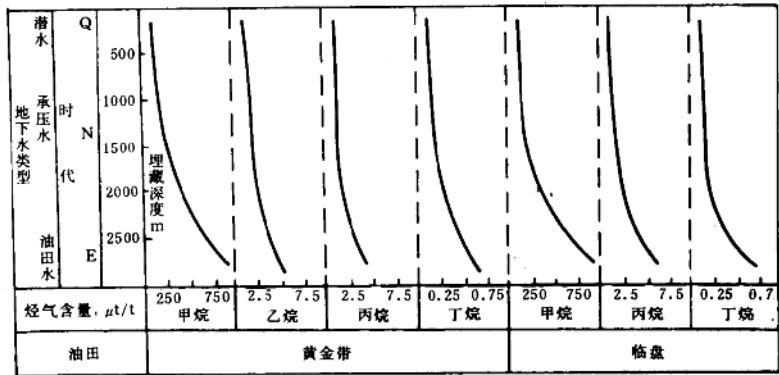


图 1-1 油气藏上方地下水中气态烃含量垂直变化图(据张金来,1988)

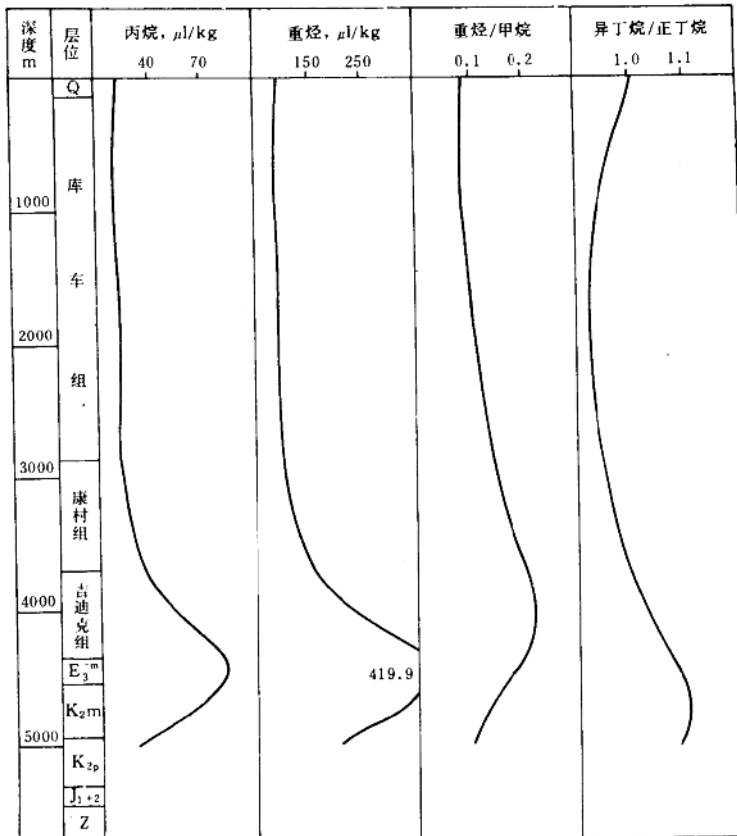


图 1-2 新疆沙雅地区沙 4 井岩屑吸附烃垂向变化图(据贾蓉芬等,1991)



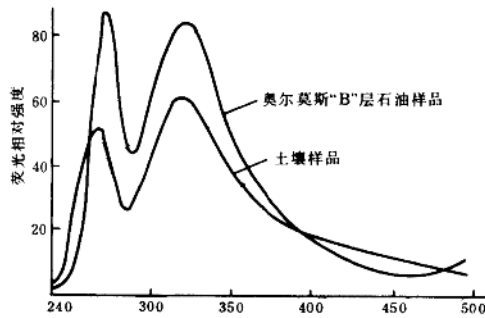


图 1-3 石油荧光光谱与土壤荧光光谱对比

表 1-1 我国东部某地区土壤酸解烃甲烷碳同位素组成

样 品	$\delta^{13}C_1, \%$ (PDB 标准)	相应的地球化学异常	烃类成因判别
1	-41.10	甲烷、重烃、 $\Delta C$	深部热成因
2	-36.55	甲烷、重烃、热释汞	深部热成因
3	-38.94	甲烷、重烃、热释汞	深部热成因
4	-33.60	甲烷、重烃、 $\Delta C$	深部热成因

### 3. 油气运聚动平衡原理与垂向运移模式

从油气运聚动平衡原理得出,地壳中的油气在运移和聚集过程中具有一种动平衡的特征,它存在着同时发生的两个过程,其一是源岩中所生成的油气通过扩散和渗流进入储层后,直接或通过侧向运移而聚集在适当的圈闭内;另一过程则是在运聚作用进行的同时,油气又可通过扩散作用而不断散失(有时渗流作用也参与此过程)。在漫长的地质历史中,地壳中油气藏的赋存状态往往是油气的不断散失和源岩不断补充而达到某种程度上的相对平衡所造成的“暂时”结果,它随地质历史的演化而不断地改变(郝石生,1987)。油气运聚动平衡原理形象而科学地描述了地下油气的运聚规律;同时,也客观地指出了油气化探根据地下油气藏散失至地表的烃类来寻找地下油气藏的可行性和现实意义。由油气运聚动平衡原理可知,地下油气藏中烃类物质运移至地表主要通过渗流作用和扩散作用。

#### (1) 渗流作用

即流体在多孔介质中的运移。在地下地质条件下,烃类物质的渗流运移包括游离相渗流和水溶相渗流。当烃类物质补充量小于地层水溶量时,只有单相(水相)运移,当烃类供给量大于地层水溶解量时,变成混相或连续相渗流运移,其流动特征符合达西定律。根据郝石生、高耀斌(1989)的研究,按渗流力学原理,地层中流体渗流的达西公式可表达为

$$V_{\alpha}^{(i)} = -\frac{K_{\alpha\beta}}{\mu_i} \cdot k_{ri} \cdot \frac{\partial \Phi_i}{\partial z_{\beta}} \quad (1-11)$$

式中  $i$  ——表示流体相；

$V_{\alpha}^{(i)}$  ——  $i$  相流体渗流速度向量；

$K_{\alpha\beta}$  ——渗透率张量；

$k_{ri}$  ——  $i$  相流体相对渗透率；

$\Phi_i$  ——  $i$  相流体力势；

$\mu_i$  ——  $i$  相流体粘度。

把剖面上地层划分为若干有限单元( $i, j$ )后,在二维空间流体在垂向(深度  $Z$ )上的渗流速度向量可表示为

$$\text{水相} \quad V_{wz} = -\frac{K_z}{\mu_w} \cdot k_{rw} \cdot \frac{\partial \Phi_w}{\partial Z} \Big|_{ij} \quad (1-12)$$

$$\text{油相} \quad V_{oz} = -\frac{K_z}{\mu_o} \cdot k_{ro} \cdot \frac{\partial \Phi_o}{\partial Z} \Big|_{ij} \quad (1-13)$$

$$\text{气相} \quad V_{Gz} = -\frac{K_z}{\mu_G} \cdot k_{rG} \cdot \frac{\partial \Phi_G}{\partial Z} \Big|_{ij} \quad (1-14)$$

分别把(1-5)、(1-6)、(1-7)、(1-11)式代入(1-12)、(1-13)、(1-14)式可得

$$V_{wz} = -\frac{K_z}{\mu_w} \cdot k_{rw} \cdot \rho_w g \Big|_{ij} \quad (1-15)$$

$$V_{oz} = -\frac{K_z}{\mu_o} \cdot k_{ro} \cdot \rho_o g \Big|_{ij} \quad (1-16)$$

$$V_{Gz} = -\frac{K_z}{\mu_G} \cdot k_{rG} \cdot \rho_G g \Big|_{ij} \quad (1-17)$$

当确定了有关地质参数,给出具体的边界条件,便可定量描述地下烃类垂向运移分量的渗流特征。

渗流作用方式包括渗透运移方式和水动力运移方式。渗透运移是指在油气层的巨大压力作用下烃类沿着岩石孔隙、裂隙和断裂等通道运移的作用,是一种重要的烃类运移机制。在地质剖面上,岩石孔隙和裂隙是普遍存在的,即使是粘土质盖层,气态烃也不是绝对不可穿越。构造断裂对烃类的渗透运移起着明显的促进作用,常造成直达地表的油气沥青苗。假设一平方米的致密岩石中仅有一条 0.1mm 的节理缝,则渗透运移的气态烃量比整个面积扩散的气态烃量要多一千倍以上,说明渗透作用是造成地表化探异常的主要运移机制。

水动力运移是指溶于流体中的烃类由于压力、温度、盐度等方面的流体动力学因素的变化或仅由于化学势的驱使而穿过上覆岩层所作的运移。地下水带动游离或溶解气体一起运移促进了地表化探异常的形成。

## (2) 扩散作用

扩散作用是指某一物质在浓度差的作用下,自高浓度区向低浓度区转移而趋于浓度平衡的一种过程。同时,当体系内部存在压力梯度、温度梯度、化学势差时,也可能存在压力扩散、热扩散等。分子扩散作用在气、液、固相中均能发生。扩散系数能定量描述扩散能力,可理解为沿扩散方向、在单位时间内每单位浓度降低、通过单位面积所扩散的某种物质的质量。影响扩散系数的因素主要有扩散组分性质、扩散介质性质、温度、岩石孔隙度及孔隙空间结构等。在地下地质环境中,烃类分子的扩散作用无时无刻不在进行,只要有浓度差便有扩散作用存在。由于液态烃(石油)分子量、分子直径大,其扩散系数比轻烃(天然气)小得多,其扩散速度也比轻烃要慢得多,而轻烃的扩散作用即不容忽视。据郝石生、黄志龙(1989)的研究,在 38 C 时轻烃通过饱和盐水的泥质岩(其孔隙度为 8.77%)的扩散系数为

轻烃种类	扩散系数(cm <sup>2</sup> /s)
甲烷	6.86×10 <sup>-7</sup>
乙烷	3.75×10 <sup>-7</sup>
丙烷	2.15×10 <sup>-7</sup>
正丁烷	1.24×10 <sup>-7</sup>
异丁烷	1.26×10 <sup>-7</sup>
正戊烷	5.20×10 <sup>-8</sup>
异戊烷	7.00×10 <sup>-8</sup>

设油气藏烃类浓度为  $C_0$ (保持不变),盖层厚度为  $L$ ,盖层之上为渗透层,其轻烃浓度为  $C_1$ (保持不变),盖层中原始烃类浓度为 0,则烃类通过盖层的扩散可看作是一维不稳定扩散,可用费克第二定律来描述

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (1-18)$$

式中  $C$  —— 烃类浓度;  
 $X$  —— 扩散距离;  
 $t$  —— 扩散时间;  
 $D$  —— 扩散系数。

给定初始条件为  $t=0$ ,  $0 < X < L$  处,  $C=0$ ;

边界条件为  $t=t$ ,  $X=0$  处,  $C=C_0$ ;

$t=t$ ,  $X=L$  处,  $C=C_1$ ;

解方程

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \\ C(x, 0) = 0 \\ C(L, t) = C_1 \\ C(0, t) = C_0 \end{cases} \quad (1-19)$$

则可得到  $t$  时间内通过单位面积盖层的扩散总量

$$Q = \frac{D}{L}(C_0 - C_1)t - \frac{2L}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_1 - C_0(-1)^n}{n^2} (1 - e^{-(\alpha^2 n^2 D t)/L^2}) \quad (1-20)$$

当  $C_1 = 0$  时,即盖层之上渗透层中轻烃很快被运移走时

$$Q = \frac{D}{L} C_0 t + \frac{2L}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_0(-1)^n}{n^2} (1 - e^{-(\alpha^2 n^2 D t)/L^2}) \quad (1-21)$$

公式(1-20)和(1-21)为油气藏中烃类通过致密岩层扩散的数学模型,利用这一模型可计算任何油气藏在地质历史上的扩散损失量,定量评价烃类通过盖层的扩散作用强弱。

地壳中烃类的扩散作用是客观存在的。据计算,廊固凹陷泉 36 气藏现含气面积为  $1\text{km}^2$ , 储量为  $2.0 \times 10^8 \text{m}^3$ , 盖层为  $80 \sim 100\text{m}$  的泥岩,在该气藏形成的  $250\text{Ma}$  中,气藏中甲烷损失量为  $1.03 \times 10^{10} \text{m}^3$  (郝石生、黄志龙,1989);荷兰哈令根气田在地质历史上曾通过  $400\text{m}$  厚的页岩,经  $4.5\text{Ma}$  后扩散损失了一半,现仅剩有  $1.93 \times 10^9 \text{m}^3$  的甲烷。若页岩厚度分别为  $300$ 、 $200$ 、 $100\text{m}$  时,则扩散同样甲烷量所需时间仅为  $2.7$ 、 $1.3$  和  $0.4\text{Ma}$ 。在长期的地质历史发展过程中,扩散的累积量具有重要意义,也客观地说明检测油气藏扩散的轻烃作为化探方法的有效性。

应该说明的是,在烃类从烃源向地表的运移过程中,受地下地质条件影响,其垂向运移还有如下特点:

①在烃类向地表运移的过程中,渗流作用和扩散作用均可发生,两种作用相互影响、相互补充、相互交替。当烃类穿过盖层时,扩散作用可能占主导地位;当烃类穿过渗透层或断裂等通道时,烃类运移以渗流作用为主。

②渗流作用具有运移速度较快,运移量较大的特点,应是大量烃类运移的主要方式。但烃类渗流运移受诸多条件的限制,而只要烃类存在浓度差时均可发生扩散作用。在不存在渗流运移作用时,扩散作用将决定着油气向地表运移的最小强度,这时烃类扩散作用对地面地球化学勘探具有特殊而重要的意义。

③油气藏上方仅仅存在烃类分子扩散作用的情况是理想化的模型。在盖层的不同部位或多或少地会存在节理、裂缝以及脉动裂隙等运移通道,这将大大提高烃类突破盖层逸散的速度和数量。

④烃类物质从烃源运移至地表,垂向运移只是其中的一种趋势和方向,在地下地质条件下同样存在侧向的运移和扩散,特别是在油气藏上方地层倾斜,地下水比较活跃的条件下,侧向运移也可能是油气运移的主导方向。

#### 4. 油气垂向运移的动力、通道与成分分异

##### (1) 油气垂向运移的动力和通道

在油气自源岩层向储层运移的过程中,受到的作用力主要有上覆地层的压力、水热增压作用、干酪根转化成油气时的体积膨胀、生储层间的渗透压差、粘土矿物脱水形成的水动力以及扩散等,进入储层后则以浮力为主,有时压实水流也会促进油气的垂向运移。

普遍发育的储层的孔隙、次生溶孔、裂缝、节理、缝合线、断裂和不整合面等都是油气垂向运移的良好通道。油气生成过程中在生油层中形成的微裂缝对油气垂向运移非常重要。

## (2) 油气垂向运移过程中的成分分异

在烃类自油气藏向上运移的过程中,由于一些分异效应的影响,不同种类的烃类会在空间上发生成分分异。这种现象可用来追索烃类运移的方向和途径,解决某些化探问题。野外和室内研究表明油气垂向运移过程中存在三种分异效应。

1) 吸附色层效应 是由于沉积岩对各种气态烃吸附能力的差异而产生的分异效应。当混合气体通过细粒岩石(粘土岩、粉砂岩、粘土质岩)时,几乎所有的烃类组分都发生明显的成分分异。而通过纯碳酸盐岩、含盐岩石、变质岩和火成岩时,基本不存在分异效应。吸附色层效应的大小与岩石粒径成反比。混合气体成分也影响分异过程,其中烃类组分的比例越大,分异越明显。岩石中水分的含量对这种效应影响很大,例如当粘土岩的湿度达到10%时,分异效应已经消失。因此,这一效应的表现规模是有限的。只是在运移距离很长,途中岩石湿度较小时该效应才较明显。

2) 分布色层效应 该效应是由各种烃类气体在岩石液态系统中的溶解度差异造成的。特别是在岩石中存在着诸如沥青类物质、石油和凝析油混合物等液态有机组分时,这种效应尤其明显。研究表明,岩石中经常见有浓度偏高的沥青类物质,烃类气流常会把少量液态烃带入上覆岩层,油气层和凝析气层中的油气混合物也会沿各种微裂隙进入上覆地层,沉积层中还存在着有分子量很大的有机化合物,这都有利于分布色层效应的发生。实验证明,水分对该效应的影响比吸附色层效应小得多。分布色层效应作用的结果,使分子量较小的烃和异构烃在较高层位上比例增大。

3) 扩散分异效应 这种分异效应是由各种气态烃扩散系数的差异引起的。实验表明,气态烃混合物通过扩散使分子量较大的烃类聚集在岩石中。在此过程中被留在岩石中的气态烃比例达40%~80%。水分含量对扩散分异的影响不大,主要与岩石成分有关,当岩石湿度达到20%以上时,这种分异仍可进行,只是扩散速度变慢。

根据各种气态烃分异理论和实验的研究结果,可以得出以下结论:

①在气态烃渗透运移的过程中,吸附色层和分布色层是主要的分异作用。

②由于岩石湿度偏高,吸附色层效应的表现规模有限。分布色层效应和扩散分异效应与岩石湿度关系不大,主要受岩石成分和岩石物理性质影响,它们当是气态烃和蒸发态烃成分分异的主要效应。

③在这三种效应中,饱和直链烃的分异方向相同,运移的气态烃相对富含甲烷及其他较低分子量的同系物。因此,可望在剖面中由上向下甲烷/重烃、乙烷/丙烷、丙烷/丁烷等指标递减。这种规律被许多研究者作为化探指标。

④在烃类运移过程中,气态正构烃和异构烃的色层分异和扩散分异效应的结果不同。在吸附色层效应和分布色层效应中,由于异构烃不易被岩石吸附,在液体中的溶解度小,故异丁烷/正戊烷、异己烷/正己烷的比值沿运移方向增大。在扩散分异效应中,正构烃易于透过岩石中的超微毛细管,异构烃由于体积大受到阻碍。因此,在以扩散为主要运移机制的条件下,沿运移方向上述比值减小。

## 二、油气化探地表效应

油气藏中的油气通过垂向运移到达地表,引起地表的地球化学场结构和分布特征发生变化,即油气地表效应(图1-4)。地表化探工作正是基于检测这些烃类地表效应来进行地下含油气性分析和含油远景评价的。

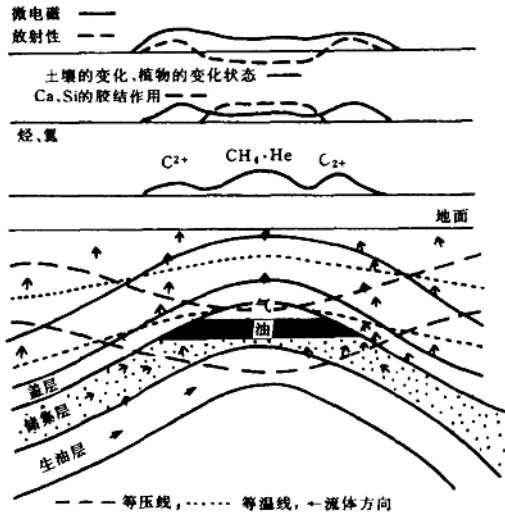


图1-4 油气藏上方地表土壤中常见的异常

### 1. 烃类物质效应

烃类物质通过渗流和扩散运移至地表,主要赋存方式有游离烃、壤气烃、水溶烃以及吸附烃。

#### (1) 游离烃

包括油苗、气苗和甲烷晕。当烃类物质大量运移至地表并散失时,便能形成油气苗。许多为可见油苗,主要分布于储层露头、断裂带露头以及盆地边缘带上。轻烃成分,特别是甲烷,具有供给量大、渗流扩散性能好的特点,可在油气藏上方大气中大量存在并形成甲烷晕。

#### (2) 壤气烃

即近地表土壤间隙中非束缚性轻烃成分。一方面壤气烃不断得到下部运移上来的气态烃的补充,另一方面又不断同周围环境发生物质交换。壤气烃局限于干燥的近地表条件,特别是存在于未充水的空隙。壤气烃与地下烃源在组分上具有较直接的联系。

#### (3) 水溶烃

所有的烃类物质在水中均具有一定的浓度。例如,在 100 C、245bar 的条件下,1m<sup>3</sup> 可以溶解约 3m<sup>3</sup> 天然气(郝石生、张振英,1989)。前人对天然气溶解度问题作了较系统、深入的实验研究,表明烃类在水中的溶解度与环境温度、压力、水型、矿化度、烃浓度以及气态烃类型有较密切的联系。当地表温度、压力、矿化度、水型等条件变化不大时,水溶烃的浓度和成分主要受系统内烃的浓度和气态烃成分的影响,特别是在地表非饱和溶解条件下,水溶烃较好地反映了运移至地表的气态烃的数量和成分。液态烃运移至地表溶于水,损失量相对较少,具有一定的稳定性,易富集成化探检测的目标。在化探超微量级检测技术基础上,水溶烃具有特殊意义。

#### (4) 土壤吸附烃

地表土壤对烃类具有吸附作用,包括在岩土表面形成固-气过渡层的吸附作用和进一步渗透到固相岩土内部的吸留作用(如碳酸盐、硅酸盐晶格内的吸收,甚至化学吸收)。吸附作用是一个可逆的动平衡过程,在地表一定的温度、压力、湿度条件下,其过程可表示为

气态烃  $\frac{\text{吸附}}{\text{解吸}}$  岩土表面吸附  $\frac{\text{吸收}}{\text{破坏}}$  岩土内部吸留

土壤对气态烃的吸附量与土壤(吸附剂)性质、气态烃类型和浓度(气体压力)、时间以及温度、湿度等条件有关。在化探近地表非饱和吸附条件下,它符合兰克缪尔(long muir)等温吸附方程

$$\frac{x}{m} = \frac{abp}{1+bp} \quad (1-16)$$

即

$$x = a \cdot m \cdot \frac{bp}{1+bp} \frac{a \cdot m = E_{\infty}}{E_{\infty}} E_{\infty} \frac{bp}{1+bp} \quad (1-17)$$

式中  $x$  —— 吸附在  $m$  克固体上的气体重量;

$a$  —— 固体表面吸附一个分子厚度的薄气体层时的吸附气体体积;

$b$  —— 温度函数。

其中  $E_{\infty}$  即吸附烃的饱和吸收值,与吸附剂(土壤)颗粒表面存在的剩余表面自由力场范德华引力(活性)和颗粒表面积(多孔性)成线性关系。而  $p$  则直接与烃浓度  $C$  成正比关系。这说明近地表活性多孔介质对烃类的吸附量大,泥质岩比砂质岩吸附量大,这要求我们在取化探土壤样品时应尽量取岩性一致的样品,以粘土类最好。同时,在吸附剂性质变化不大时,土壤吸附烃量与气态烃浓度有关,吸附烃量的多少反映了近地表烃场浓度的大小,指示出地下烃类运移至地表的数量。并且,土壤对烃类的吸附是颗粒的表面现象,因而吸附过程能在短时间内完成,而土壤对烃类的吸收是体积现象,且过程漫长的多,地下烃类留下的“烙印”也较深,故土壤对气态烃的内部吸收能更好地反映出其地球化学背景,也是采用常温酸解脱烃法更有意义之处。土壤对液态烃也具有相似的吸附作用,并且稳定性更大。

地表烃类物质除来源于地下油气藏外,还可能由地表生物化学作用产生,特别是生物甲烷气。这要求我们在化探采样时应尽量远离地表可能的有机质富集区,并适当加大取样深度,尽量避开地表较强的生化作用带。

## 2. 非烃类物质

油气藏物质除形成烃类效应外,其他烃类伴生物也会运移至地表引起物质平衡的改变,间接指示地下油气藏的存在。

### (1) 壤气汞和吸附汞

汞在近地表土壤中的赋存方式主要有两种,一种是以蒸汽汞的形式存在于土壤颗粒间孔隙中,简称壤气汞;另一种是以汞化合物(包括氧化汞、络合汞、卤化汞)和气态汞形式吸附在土壤颗粒表面,称吸附汞。吸附汞通过加热解吸,由金丝捕汞管捕集后再热释测定,故又称为热释汞。由于汞元素其本身具有易吸附、易络合等特殊的物理化学性质,故较易被其他物质吸附,特别是有机质吸附汞的能力较强。因而,地层中与有机质有关的煤、石油、天然气中汞的含量特别高。在成油过程中,汞能与烃类一起释放、运移、聚集,最后在油气藏中形成汞的相对富集区。在油气分异时,汞蒸汽和气态烃能在油气藏顶部产生相当高的蒸汽压。并且,由于其具有易挥发性和强穿透力,使得汞蒸气能以渗透和扩散的方式穿过盖层和上方巨厚地层而到达近地表,形成地表汞异常。我们能通过检测近地表土壤中壤气汞和热释汞的异常,追索与地下油气藏有

关的信息。壤气汞与热释汞同处在一个均衡的交换系统中,土壤中汞的数量除受下部地层运移补充影响外,还与土壤对汞的保存条件有关,特别是土壤中有有机质含量对其有较大的影响。同时,壤气汞还受孔隙含水情况的影响。热释汞则相对稳定,是一个较有效的化探指标。

### (2)土壤蚀变碳酸盐( $\Delta C$ )

油气藏中低分子量烃类气体运移至地表造成局部还原性环境,使油气藏上方地表土壤中各种化学元素和化合物发生还原、活化,继之重新分布,形成一类特殊的碳酸盐,在地表土壤的硅铝酸盐裂隙或孔隙间呈胶结物存在,称之为土壤蚀变碳酸盐。它稳定而不易淋失,加热分解后的 $CO_2$ 称 $\Delta C$ 。不同的碳酸盐有不同的分解温度,一般都低于 $500^\circ C$ 时发生分解,唯有此类碳酸盐是在 $500\sim 600^\circ C$ 时大量热解,由于其特殊的热分解性质,使 $\Delta C$ 检测法成为化探预测地下油气藏的重要辅助指标。同时化探实践也表明,土壤中大量存在各类碳酸盐矿物时, $\Delta C$ 的应用将受到一定的影响。

### 3. 其他效应

地下油气藏物质垂向运移并到达地表,还可引起其他类型的地表物质效应,如油气藏上方地表的放射性异常、微量元素异常、烃氧化菌增长优势、地表植物变异、低频电磁感应效应等等。随着油气化探理论水平的提高和化探实践的不断深入,各种效应的机理和模式必将得到进一步的完善和证实。科学技术的进步,使应用油气地面化探信息去发现更多的油气藏成为可能。

## 三、地表化探异常模式及其影响因素

油气通过各种方式运移至地表形成多种类型和不同强度的异常。含油气盆地或坳陷、凹陷区比非含油气盆地的平均测值(背景)高得多。不同的地质条件、油气性质等因素会导致不同大小的背景值。异常是指化探指标测值显著高出背景的区域,通常测值大于平均值加一倍方差的测点为异常点。异常强度常用衬度(异常点平均测值除以异常下限值)来表示。多数油气藏上方的异常属于低到中等的异常。异常衬度特别高恰恰表明油气藏的破坏和严重散失。在化探普查中,高丰度背景(高值带)可用于圈定油气聚集带,局部异常可用于圈定油气勘探靶区(油气藏)。

### 1. 异常模式

各种类型的化探异常可简单地概括为三种类型(如图1-5),即线状或串珠状异常、顶端块状异常、边缘环状和半环状晕圈异常。各种异常模式有不同的形成机理。

#### (1)线状或串珠状异常

一般认为这种异常与切割地下油气藏的断层、断裂系统有关,表示油气沿上覆地层的薄弱地带形成的高值区。图1-6为鄂尔多斯盆地郝滩北地区化探异常分布,工区北部发育线状异常,工区南部为双环状异常。

#### (2)顶端块状异常

高丰度值正好位于油气藏上方,异常既可以是连续的片状,也可是斑块状的。一般认为这类异常是小型油气藏的反映,或是由油气藏内部及上部的断层和断裂等因素引起的。顶端块状异常成因见图1-5c。

#### (3)环状和半环状晕圈异常

化探指标围绕油气藏边缘形成高值带,而油气藏正上方却呈现低值甚至背景值,形成环状或半环状晕(图1-5a、b和图1-6)。地层或岩性尖灭油气藏常表现出半环状晕,环状断层



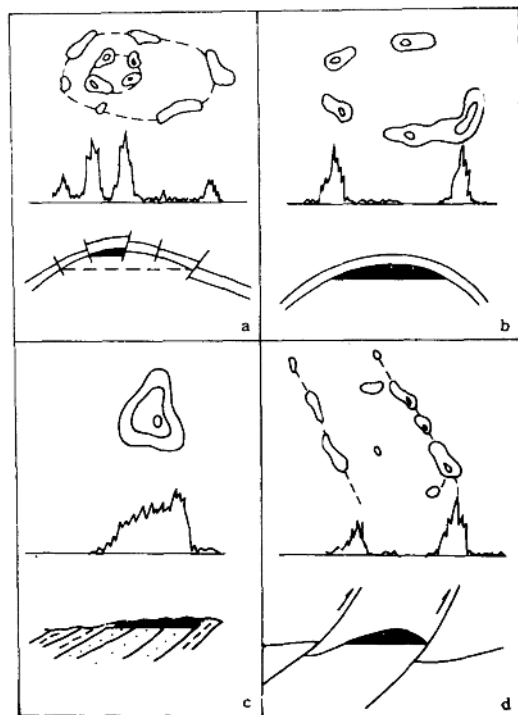


图 1-5 异常模式分类图

a—双环异常;b—单环异常;c—顶端异常;d—线状或串珠状异常(据费琪等,1992)

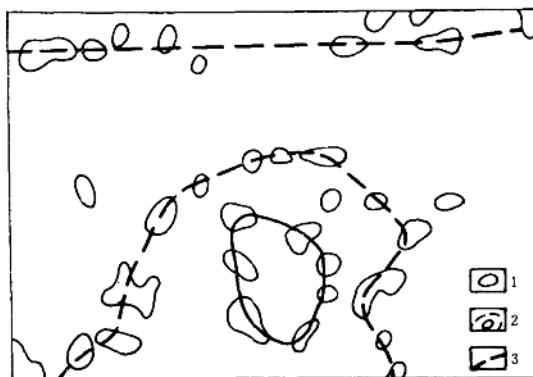


图 1-6 冀淮北地球化学综合异常解释图

1—综合异常;2—双环异常;3—解释断层(据王锡福等,1992)

控制的油气藏常在地表形成环状异常,对于大型背斜构造油气藏形成环状异常的机理有两种意见。