

石油天然气的磁性勘查

郭友钊 罗壮伟 孟小红 余钦范 等著



地质出版社

石油天然气的磁性勘查

郭友钊 罗壮伟 孟小红 著
余钦范 徐善法 陈本池 孙爱秋

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是石油天然气地质学、矿物学、介质磁学、古地磁学、地球化学等多学科交叉的产物。书中论述的主要内容其一是, 烃类引起的各种次生作用的信息记录在介质的含铁矿物中; 对介质中含铁矿物的磁信息的读取, 可以恢复烃类作用的过程, 为石油天然气的勘查提供信息。其二是, 沉积岩中的含铁矿物的沉积和剩磁的形成受古环境的控制, 对沉积岩磁性的读取, 可以提取古流向、沉积中心、古气候、古地理、地层时代等地质信息。作者以华北油田、胜利油田、辽河油田等地区的磁性研究为例, 介绍了石油天然气磁性勘查的方法、技术、应用效果等。

本书可供从事油气勘查的技术人员及有关专业的师生参考和使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油天然气的磁性勘查/郭友钊等著. -北京: 地质出版社, 1999. 3
ISBN 7-116-02726-2

I. 石… II. 郭… III. 油气勘探: 磁法勘探 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 00371 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑: 傅学信 陈军中

责任校对: 黄苏晔

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 8.25 字数: 190100

1999 年 3 月北京第一版 · 1999 年 3 月北京第一次印刷

印数: 1—800 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-116-02726-2
P · 1961

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

前 言

任何勘查方法，不管是地质物理勘查，地球化学勘查，还是钻探，最终的目的都将是解决地质问题。

地球可设分为几个层次加以认识。小的如原子分子层次，肉眼无法直接看到，因此用化学的方法加以认识，即地球化学勘查方法。较小的地质层次为矿物岩石层次，地质学上有结晶学、矿物学、岩石学等分支来描述这个层次。更大的层次，如地层岩体层次，有时大小仅数十米，多数时候地层岩体大小为数公里，肉眼则望不可及；再如区域地质层次，数十平方公里以上，就不用把这些物质体带回实验室用试管或仪器来直接分析了，此时需要用地球物理方法来勘查，勘查原理就是利用这宏观层次的地质体形成“场”的现象。

矿物岩石研究向下到达原子、分子层次，是一种放大过程，矿物、岩石的图像变成“球体”（即原子）的有序堆积。从这个层次向上到达地层岩体层次以及区域地质层次，使矿物岩石层次的图像成为简单的“轮廓”。因此，地球化学把矿物、岩石解剖到原子，分解而失去了矿物、岩石层次特有的地质信息（单个原子并不能记录地质信息），而反映宏观现象的地球物理对矿物、岩石层次信息反映模糊。

目前，已提出直接反映矿物岩石层次的勘查方法，即介质物理方法。介质磁性用于地质勘查，是其中较成熟的分支。它们的关系见于图1。

本书要讨论的是磁性勘查方法在石油天然气勘探领域应用的可行性与特殊性。共分八章，内容如下。第一章主要介绍石油天然气磁性勘查发展简史。第二章论证烃类的形成、运移、成藏、渗漏等过程导致含铁矿物的相变。第三章从介质磁性的起因开始，讨论磁性元素的地球化学行为，磁性元素与有机地球化学的关联，进一步以磁性矿物学为根据，讨论介质（土壤、岩石）磁性的物质基础。第四章介绍描述介质磁性的参数，讨论影响介质磁性的地质因素，讨论区域上的背景磁性对于寻找油气田具有意义的局部磁性异常。第五章简要介绍磁性勘查中的采样、测试、数据处理与图示等方法与技术。第六章介绍磁性勘查在盆地研究中用于确定古水流方向、沉积中心、确定地层时代等的多个实例。第七章主要介绍土壤磁性用于确定油气渗漏带的实例，每个实例中还介绍了针对不同地区和不同地理景观所采用的磁性勘查的方法与技术。第八章从磁性勘查与非地震油气勘查方法、磁法勘查的比较，进一步讨论磁性勘查方法的特殊性，最后对石油天然气磁性勘查方法的发展方向作了展望。

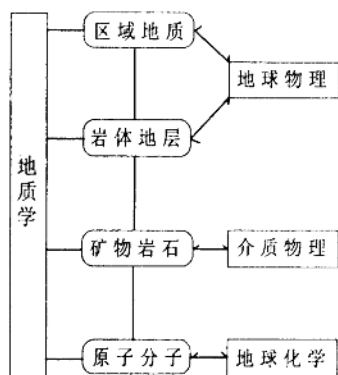


图1 几个地质层次及其主要勘探方法
磁性勘查属介质物理的分支

这八章大致可以分成四部分，第一部分介绍烃类物质与介质磁性的关系，是磁性勘查的物质基础，包括第一、二、三、四章；第二部分简要介绍磁性勘查的方法与技术，为本书的第五章；第三部分介绍磁性勘查的应用实例，由本书第六章和第七章构成；第四部分讨论磁性勘查方法的特殊性与磁性勘查方法的发展方向，包括本书第八章。

作 者

1998年9月

目 录

第一章 油气磁性勘查方法发展简史	1
第二章 烃类引起的次生矿化	3
第一节 烃类物质	3
第二节 烃类作用引起含铁矿物的次生矿化	9
第三章 磁性勘查介质	17
第一节 磁性起因	17
第二节 磁性元素的地球化学	22
第三节 磁性矿物学	25
第四节 磁性土壤学	31
第五节 磁性沉积岩岩石学	32
第四章 介质磁性	35
第一节 介质磁化的条件及宏观过程	35
第二节 描述介质磁性的磁学参数及其影响因素	39
第三节 土壤的磁性	45
第四节 沉积岩的磁性	49
第五章 磁性勘查方法技术简介	53
第一节 采样	53
第二节 磁性分析	56
第三节 数据处理与图示	58
第六章 盆地研究中岩石磁性的应用	60
第一节 古水流方向的确定	60
第二节 盆地沉积中心的确定	66
第三节 地层时代的确定	67
第四节 磁性用于油气层解释	70
第七章 土壤磁性用于油气勘查的实例	72
第一节 华北油田	72
第二节 内蒙古开鲁盆地	82
第三节 山东临南油田	93
第四节 辽河欧力坨子油田	112
第八章 几个问题的讨论	115
第一节 与其它非地震油气勘查方法比较	115
第二节 油气勘查中磁性勘查与磁法勘查的对比	117
第三节 石油天然气磁性勘查发展方向的展望	121
主要参考文献	124

第一章 油气磁性勘查方法发展简史

石油天然气磁性勘查方法的发展大体分 3 个阶段，一是发现阶段，二是异常机理的研究阶段，三是应用研究阶段。

发现阶段

石油天然气磁性勘查方法的提出，直接起源于对美国 Cement 油田上方航磁异常的有关地质解释。

1979 年 Donovan 博士对美国 Cement 油田上方高精度航磁异常的研究发现，Cement 油田上方存在着明显的波长短（小于 0.5 km）、幅度低（小于 20 nT）的微磁异常。并认为，该油田上 5 口钻井揭示的现代潜水面附近存在磁铁矿的明显富集以及地表红层发生明显的褪色作用，油田上方沉积层中形成有与烃类作用有关的磁铁矿，是烃类物质强渗漏效应的结果。

异常机理研究阶段

Donovan 提出，油气田上方存在由烃类渗漏效应引起的微磁异常，一批学者对此持有不同认识。

问题焦点之一是，油气田上方是否存在与烃类渗漏效应有关的微磁异常？有人认为 Cement 油田上钻孔中铁制套管也可引起低幅度的微磁异常，其异常特点与航磁中所发现的短波磁异常相似（Czango Baag *et al.*, 1989）。在英国 Lancashire 地区的 Formby 油田所进行的高精度航测与地磁测量，没有发现与烃类渗漏效应有关的微磁异常（Busby, *et al.*, 1991）。Gerry (1991) 和 Donald 等人 (1991) 认为，油气田上方存在微磁异常，但异常幅值仅为几纳特至 20 nT 极易受到地表人文设施的干扰，而区别烃类渗漏效应引起的微磁异常与人文干扰引起的微磁异常是不容易的。

问题的焦点之二是，烃类渗漏效应不一定能导致磁铁矿的形成，也可能形成其它含铁矿物，其中强磁性铁矿物可以作为微磁异常的场源，弱磁性铁矿物却不易产生明显的微磁异常。Reynolds (1991) 认为，Cement 油田钻孔岩心中发现的磁铁矿可能是钻头铁屑的污染物，而呈亚铁磁性的磁黄铁矿与非常丰富的黄铁矿共生，它们是烃类渗漏效应的结果，并且磁黄铁矿是引起航磁中高频异常的场源。目前，经研究确认烃类渗漏效应可以导致含铁矿物的形成和相变：如自生磁铁矿可由烃类渗漏逸出的烃类物质与硫酸盐还原细菌相互作用而形成（Donovan, *et al.*, 1979; Ferguson, 1979），也可由烃类的生物降解作用形成（Elmore, *et al.*, 1987; McCabe, *et al.*, 1987），还可以由油气渗漏带中的自燃变质作用形成的赤铁矿-钛铁矿-磁铁矿固溶体系列（Cisowski, *et al.*, 1987）中得到体现；存在的自生磁黄铁矿可由原油的微生物氧化和硫酸盐还原作用形成（Sassen, *et al.*, 1988）；自生菱铁矿可以在烃类作用下，在碳酸根浓度达到一定程度时形成富集（Machel, *et al.*, 1987）。

问题的焦点之三是，烃类的渗漏效应是否还可以引起其它的磁效应。当然，烃类渗漏效应导致的物理、化学、生物环境的改变，使一些古老的岩石发生重磁化，这已是 80 年代

古地磁界所关注和确信的一个问题。国内学者孟小红等人关于烃类的化学吸附作用对剩磁稳定性的影响做了深入的研究,发现烃类物质被吸附在岩石孔隙中并导致剩磁稳定性的破坏。

最近,郭友钊等人(1995)讨论了决定烃类渗漏带土壤磁性异常的因素有4个方面:(1)烃类物质的数量;(2)硫酸盐还原细菌群及其生态状况;(3)土壤中鉄的含量及其价态;(4)土壤接受烃类作用持续的时间等。这4个因素往往同时存在、共同决定烃类渗漏带一切物理的、化学的、生物的反应。但它们往往在数量上或性质上的不同,是决定其反应的发展方向、构成渗漏带磁性异常的差异。

应用研究阶段

机理研究,伴随着应用研究。因为高精度航磁或地磁的微磁异常很弱,不易从人文设施所形成的微磁异常中分辨出来,因此磁测用于寻找油气田受到了一定程度的限制。由此提出了利用介质(地表土壤、钻孔岩心或岩屑)寻找油气田或确定地层含油性的设想。

国外应用介质磁性作为寻找油气田方法的较早的研究人员是Foote(1986、1988、1992)、Donald(1990)等。他们主要研究土壤、钻孔岩屑的磁化率与烃类的关系,提出油气田上方较油气田边缘具有较高的磁化率异常,但有时也有相反的情况。

我国学者在土壤磁性用于寻找油气田方面处于领先的水平。郭友钊(1995)等人,不仅研究磁化率这一参数,还研究了天然剩磁、氧化还原剩磁、粘滞剩磁的剩余磁化强度和剩余磁化方向与烃类作用的关系,还从油气藏埋深、烃类渗漏强度等方面分析了磁性异常的几何特征与异常模式,提出了磁倾角可以做为确定烃类渗漏带的可靠标志或参考系(1997)。

目前,国内将土壤磁性用于油气勘查的研究已有多例子。郭友钊等人(1995)对京津地区、内蒙古开鲁盆地、山东临南地区等,刘庆生(1996)对江汉油田、塔北油田、长庆油田等地区,阎桂林(1997)对等南阳地区的研究,均取得了一定的成果和进展。

石油天然气的磁性勘查,源于1979年对航磁高频微磁异常的发现。20世纪80年代主要进行了磁性异常机理的研究,到90年代已开始了磁性勘查的应用研究。

第二章 烃类引起的次生矿化

本章重点讨论由于烃类物质的形成、运移、渗漏等过程所引起的含铁矿物的变化所引起的介质磁性的变化。这是磁性方法能否用于寻找烃类物质的基本前提和着眼点。

本章第一节，分析烃类物质的形成、赋存、运移、渗漏等过程。第二节，则讨论此过程中含铁矿物的次生矿化，作为下面两章讨论烃类物质引起磁性异常的基础。

第一节 烃类物质

一、烃类物质的组成

烃类物质主要指碳氢化合物 (Hrdrocarbon) 以及伴生或共生有机物，其主要成分为碳、氢，次要成分为硫、氮、氧等。

烃类物质的矿产种类主要有天然气、石油、煤、油页岩等。

(一) 天然气的组成

实际研究与应用中，天然气是指沉积圈中以烃类为主的气藏中的天然气和可为工业所利用的二氧化碳气、硫化氢气、氦气等。

气藏中的天然气从成分上分为两种。一是以烃类物质为主的天然气，主要是甲烷气，一般情况下甲烷含量达 80% 以上；其次为重烃，约占 10% 左右；微量气体有氮气、二氧化碳、硫化氢等。二是非烃气为主的天然气，主要有氮气、二氧化碳气、硫化氢气等。

根据雅库琴尼 (1976)，烃类天然气藏占世界气藏总数的 95% 以上，而非烃类天然气藏占世界气藏总数 5% 以内。图 2 示出世界上的 2 000 个气藏约 15 000 个分析数据构制的三角变化图，它有力地说明了天然气藏的主要成分分布状况。

(二) 石油的组成

石油是以液态形式存在于地下岩石孔隙中，具有不同结构的碳氢化合物，是可燃的有机矿产。

石油的元素组成主要为碳、氢，其次为硫、氮、氧等。对于平均元素组成，不同学者的估算不同。亨特的统计结果是碳占质量的 84.5%，氢占 13.0%，硫 1.5%，氮 0.5%，氧 0.5%。据潘钟祥

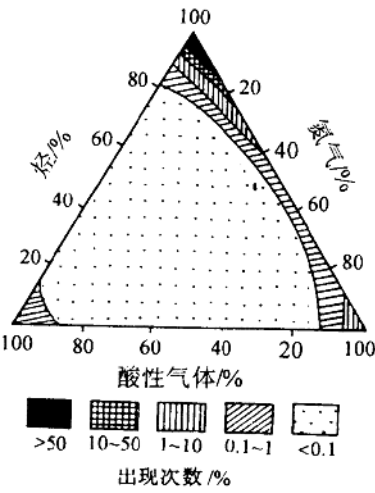


图 2 世界气藏成分图
酸性气指二氧化碳气、硫化氢气

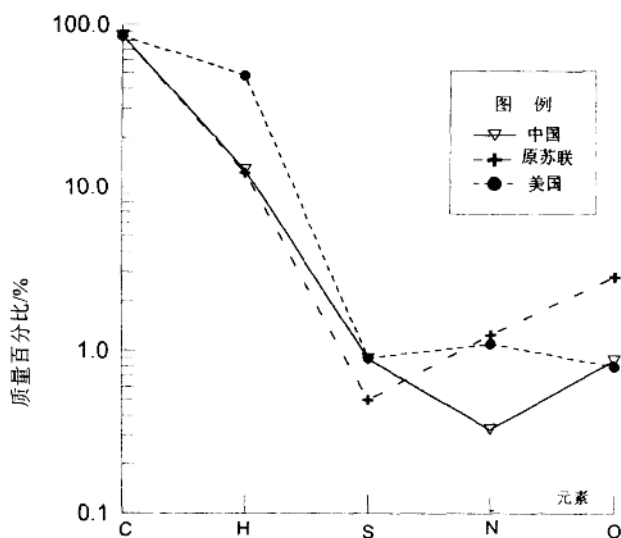


图3 石油的元素组成

中国一组由大庆、胜利、大港、江汉、克拉玛依、孤岛等的混合油统计得到；原苏联一组由雅雷克苏、乌克兰、老格罗尼兹、卡拉-布拉克等的油田统计得到；美国一组由文图拉、科林加、博芒特、堪萨斯等油田统计得到

(1986)：中国、美国、原苏联的石油元素含量列于图3，与亨特的统计结果相似。

石油的化合物，可分为烃类与非烃类，前者包括正构烷烃、异构烷烃、环烷烃、芳烃和环烷芳烃等，后者主要有氮、硫、氧的化合物、有机金属化合物等。

正构烷烃的碳数为 $C_1 \sim C_{60}$ 。根据主峰碳数的位置及形态，正烷烃曲线(图4)分为3种基本类型：①主峰小于 C_{15} ，且主峰区较窄；②主峰大于 C_{25} ，主峰区较宽；③主峰区在 $C_{15} \sim 25$ 之间，主峰区宽。

异构烷烃的碳数以小于 C_{10} 为主，环烷烃也以小于 C_{10} 低分子量环烷烃为主。芳烃和环烷芳烃的基本类型有苯、萘、菲，分子量一般较大。

石油中的非烃类物质，一是含氮、硫、氧化合物，主要有硫醇、硫醚、噻吩和二硫化物等，低分子量者存在于石油的轻、中馏分中，分子量大者存在于胶质、沥青质中。二是有机金属化合物，主要是汞、铅等的化合物。

(三) 煤

煤是由地质时期植物遗体在地下经复杂的生物、物理、化学作用而变质形成的固体可燃的有机矿产。

煤的组成元素，主要为有碳与氢，其次为氧、氮、硫、磷和其它元素。碳与氢占有机可燃物质量的70%以上。挥发分根据煤的变质程度不同而异，一般在5%~55%。见于图5所示。

煤中的碳和氢，多以凝胶化组分(包括木煤、木质镜煤、结构镜煤、无结构镜煤、凝胶化基质)、丝炭化组分(包括丝炭、木质镜煤丝炭、镜煤丝炭、丝炭化基质)、稳定组分

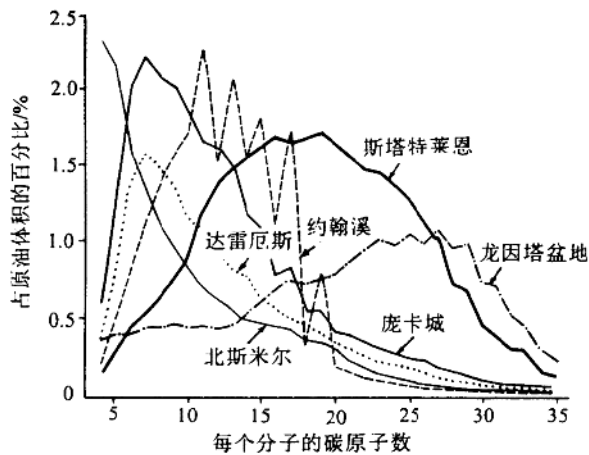


图 4 不同类型石油的正构烷烃分布曲线
(据 R. L. Martia 等, 1986)

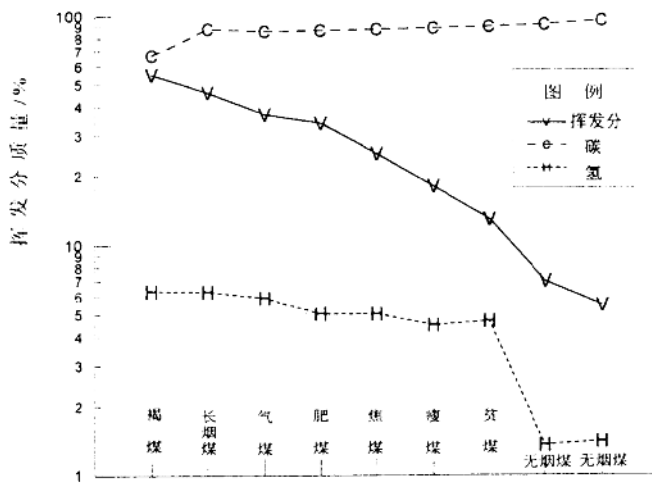


图 5 煤的主要组成成分
(据陆春元, 1987)

挥发分以占煤总质量的百分比表示, 碳与氢以占煤中可燃有机质质量的百分比表示。请注意纵轴 10 以上, 数字 2 应是 20, 类同直至 90。纵坐标 10 以下, 9 应是 0.9。即坐标是以对数刻度的

(包括木栓层、角质层、孢子和花粉、树脂体) 等组成, 以固态形式存在, 在显微镜下可以观察到。

煤中的无机物, 主要有与有机质同时沉积的陆源矿物、化学或 (和) 生物成因的矿物

(如黄铁矿、粘土、菱铁矿等的结核)以及后生矿物(如裂隙中的黄铁矿、方解石、高岭土等)。它们也以固态形式存在。

含碳页岩也是烃类有机质的重要存在形式，与煤相似，碳以固态存在。

总体上，煤是固态的烃类物质，分子量很大；石油是液态的烃类物质，分子量中等；天然气主要是气态的烃类物质，分子量很小。下面讨论这3类烃类物质的形成过程以及相互关系。

二、烃类物质的形成

天然气、石油、煤的形成过程以及相互关系见于图6。烃类物质共同的主要物质来源是地表存在的生物有机质。生物有机质主要是动物、植物的遗体。由于地表以及近地表的生物作用，特别是细菌活动的活跃，动、植物的遗体一大部分经生物降解作用等过程形成生物成因的天然气，另一很少的一部分则经沉积掩埋，进入地下。

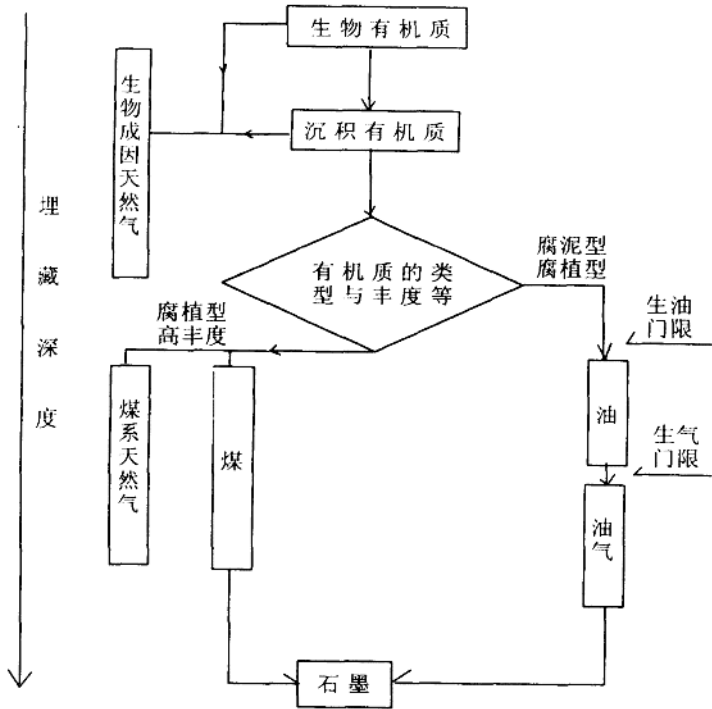


图6 天然气、石油、煤形成过程示意图

在地下一定深度，生物作用减弱；再进入到更大的深度，压力增大，地温增高，热压作用增强，沉积有机质经热催化、热裂解，有机质开始成熟。①高丰度的腐植型有机质向煤方向转化，依次形成泥炭、褐煤、长烟煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤、无烟煤，同时形成大量的以甲烷为主的煤系天然气。②腐泥型有机质和一部分腐植型有机质，进入到

生油门限温度后，形成石油，进入到生气门限后，形成石油与石油气。如果有有机质进入到更高温高压的地层埋深，所形成的煤、石油、天然气则向石墨方向转化。

石油与煤的形成过程，均伴随着有机烃气体的形成。其成因早期以微生物作用为主，晚期则以热动力作用为主。

三、烃类物质的赋存状态

气态的天然气、液态的石油、固态的煤，它们在地下的赋存形式，特别是能为工业应用的赋存形式，存在很大的差异。这种差异，往往决定了勘探方法的不同。

(一) 天然气的赋存状态

天然气赋存相态见于表 1。目前具广泛工业意义的有气顶气、气藏气、凝析气、煤层气。

表 1 天然气的赋存状态

相 态	赋 存	主 要 成 因	开 发 状 况
游离态	气顶气 气藏气 凝析气	石油气 石油气、煤系天然气、生物气 石油气、煤系天然气	3 种均是主要的开发对象
溶解态	油内溶气 水内溶气	石油气或其它类型 各种类型	
吸附态	煤层气 沉积岩吸附气	煤系天然气 煤系天然气、石油气、生物气	煤层气是主要的开发对象
固态气水合物	冰中的天然气		

气顶气与石油共存，位于油气藏的顶部，乙烷以上的重烃含量较高，成因上属石油气。

气藏气是单一天然气聚集的气体，可以是石油气、也可以是煤系天然气，或其它成因类型的天然气。凝析气是一种特殊的气藏气，是在较高的温度、压力下由液态逆蒸发而形成，一旦温度、压力降低则逆凝结而形成轻质油。

煤层气是吸附在煤层中的煤系天然气。

(二) 石油的赋存状态

石油主要呈液态存在于岩石孔隙中。根据是否发生运移，分两种形式，一是自生自储型，生油的地层即是储油的地层。二是下生上储或上生下储型，指生油层不是储油层，而是石油经运移储集在有效孔隙度大的岩石或构造中。

(三) 煤的赋存状态

煤是以天然的固体形式存在于煤系地层中。如不经特殊的构造运动的破坏，煤层是没有明显的运移。

四、烃类物质的运移

相对于母岩地层而言，煤以固相“原地”存在。石油呈液态可能“原地”存在，也可能经运移而“异地”存在。天然气中煤层气可能以“原地”存在为主，其它天然气则主要

以“异地”存在。因此，烃类中，石油与天然气存在着运移的情况。

石油的运移分初次运移和二次运移，以及再次运移。

初次运移指石油从细粒的生油岩中向外排出的过程。初次运移的发生，可能是在压实作用、热力作用、粘土脱水作用等控制下，生油岩（主要是泥岩）受到较大的应力作用，发生强烈的变形，导致体积减小，这时必然驱动塑性物质（包括气体、液体以及硬度小的粘土矿物等）的流动。在初次运移中，石油可能呈油相、乳浊液、胶体溶液、气体溶液等相态运移，但多数学者认为初次运移以油相为主。初次运移是与石油生成有密切关系的过程，运移距离较短，一般限于生油岩系中。

二次运移是初次运移的接续，是石油脱离成油母岩向储集岩内部传导的过程，主要的传导层是颗粒较粗的砂岩层、张性或张扭性的非紧闭的断层、不整合面等。二次运移的驱动力主要是浮力、水动力，运移多呈游离相进行。运移的距离不等，最远达到数十公里，甚至上百公里。多数情况下，二次运移的结果使石油聚集成油藏。

再次运移是在二次运移的基础上发生的。与二次运移的性质相似。

一些地区，石油可能只经初次运移，而另一些地区由于构造活动的多期性导致石油发生二次运移，甚至再次运移。

按运移方向，石油的运移可分为水平运移和垂直运移，或分为顺层运移或穿层运移等。运移方向，取决于驱动力条件，不同地区可能不一样，但共同遵循的原则是沿阻力最小的方向运移。

与石油的运移情况比较，煤可以认为是不存在运移的，而天然气的运移强度则更强烈，运移的更远。

五、烃类物质的渗漏

虽然在地表有石油（油苗）的发现，绝大多数情况下石油的运移仅在地下发生，肉眼没有多少机会发现油藏。但是，地表却存在烃类渗漏的现象。

由上述讨论可知，石油与煤的形成，均伴生着天然气的形成。天然气的成分主要以小分子量为主，而小分子量的颗粒，极易于运移，即使在气藏或油藏中，均有向地表渗漏的可能。

L. C. Price (1985) 认为，烃类渗漏主要是 C_1 到 C_5 的烃类物质从油气藏向地表迁移并形成烃类和其它异常的作用。从近地表的生物成因的天然气，到地下较深时形成的煤、石油以及伴生的热成因的天然气，它们在形成、运移、成藏以及破坏过程中，均存在着 C_1 到 C_5 的烃类物质向地表迁移形成地表的异常。即只要有烃类有机矿产（天然气、石油、煤）的存在，即存在着烃类的渗漏的可能。

烃类物质的渗漏，可能通过下列机制实现：扩散作用、逸散作用、盆地深部水对烃类的垂向搬运作用。轻烃类（ C_1 到 C_3 ）物质渗漏，与石油的运移过程可能存在许多的相似性。

综上所述，煤、石油、天然气的形成、运移、渗漏过程是有一定的联系的，见于图 7。这一过程，为寻找地下埋藏的有机矿产，提供了可能。下节着重讨论这一过程中产生的含铁矿物的次生矿化。

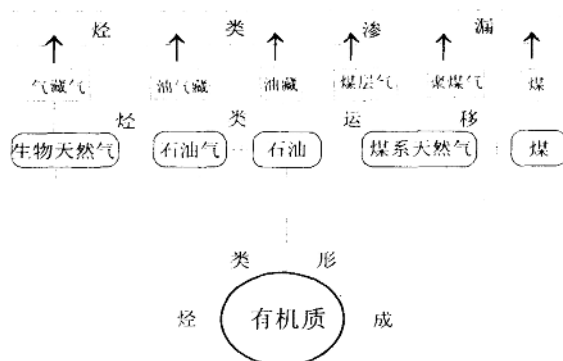


图7 烃类的形成、运移与渗漏的关系示意图

第二节 烃类作用引起含铁矿物的次生矿化

磁效应，是指由于环境的改变，原生环境（早期环境）中的元素种类及含量、矿物种类、结构及含量等介质的改变所引起的磁性变化。

本节首先讨论在没有烃类物质参与的环境下几种含铁矿物的热动力平衡组合，随后讨论含烃类物质参与下环境的破坏引起含铁矿物的热动力平衡的破坏，最后介绍在含烃地层位中所发现的因烃类物质引起的作用所生成的含铁矿物。

一、含铁矿物的热动力平衡组合

含铁矿物很多，主要有氧化物类的磁铁矿、磁赤铁矿、钛铁矿、针铁矿、褐铁矿等，有硫化物类的黄铁矿、磁黄铁矿，有碳酸盐类的菱铁矿等。

含铁矿物有其特定的成因，即其形成受地质环境的制约，具体来说，含铁矿物形成受温度、压力、pH 值、氧化还原电位、有关离子的浓度等影响。与此相似，含铁矿物的稳定性也受这些条件的影响。一旦矿物所处的地质环境发生改变，其稳定性也就发生变化，矿物就要被破坏。

由于石油形成的温度大约在 40~100℃，这一环境中如果没有烃类物质以及与之相关的因素参与作用，含铁矿物的热动力平衡组合与常温、常压下没有明显的不同。

下面以主要的磁性矿物为例，初步说明它们的热动力平衡组合情况。

图 8 示几种磁性矿物在常温、常压下的热动力学平衡组合。pH 值指溶液的酸碱度， E_h 值指环境的氧化还原电位（单位：伏特）， $\lg c(\text{HS}^-)$ 指水溶液中硫化氢根浓度的对数值， $\lg c(\text{HCO}_3^-)$ 指水溶液中碳酸氢根浓度的对数值。

图 8A 示含硫（以硫化氢根的浓度表示）比较高的环境中的赤铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿的稳定范围。当氧化还原电位在 $(-0.1 \sim -0.2) \text{ V}$ ，pH 值减小到小于 7 时，赤铁矿溶解。在一定的 pH 值下，氧化还原电位降低，则磁黄铁矿溶解。磁黄铁矿则在趋于碱性（pH 值大于 6.6）的环境中稳定。总的趋势是，在一定的酸碱度条件下，随着含硫比较高的环境中

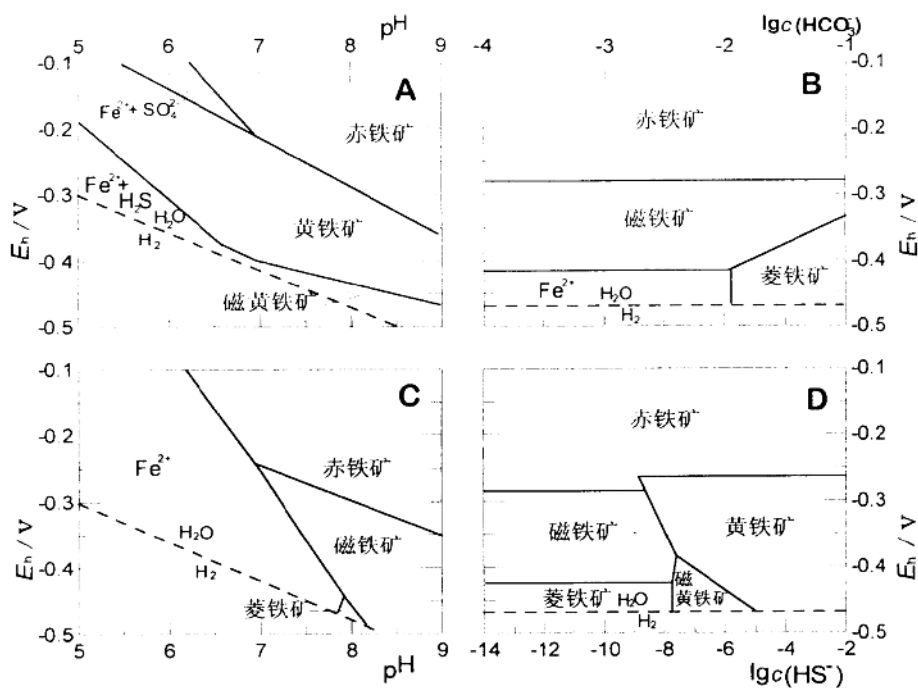


图 8 几种磁性矿物的热力学平衡组合

(据 H. G. Machel 等人, 1991)

图 A 示在 HS^- 浓度为 10^{-6} mol/L , HCO_3^- 浓度为 10^{-2} mol/L , Fe^{2+} 浓度为 10^{-6} mol/L 时, $pH \sim E_h$ 环境中铁矿物的组合; 图 B 示 pH 值为 7.8, HS^- 浓度为 10^{-2} mol/L , Fe^{2+} 浓度为 10^{-6} mol/L 的环境下 $E_h \sim \lg c(HCO_3^-)$ 下含铁矿物的组合; 图 C 示在 HS^- 浓度为 10^{-12} mol/L , HCO_3^- 浓度为 10^{-12} mol/L , Fe^{2+} 浓度为 10^{-6} mol/L 时 $pH \sim E_h$ 环境中铁矿物的组合; 图 D 示 pH 值为 7.8, HCO_3^- 浓度为 10^{-2} mol/L , Fe^{2+} 浓度为 10^{-6} mol/L 时 $E_h \sim \lg c(HS^-)$ 环境中铁矿物的组合

还原性的增加或氧化性的减弱, 黄铁矿将取代赤铁矿, 而磁黄铁矿进一步取代黄铁矿。

图 8B 示含碳(碳酸氢根的浓度表示)比较高的环境中, 赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿等的稳定范围。它们在一定的碳酸氢根浓度下, 其稳定性决定于氧化还原电位, 随着氧化还原电位值的减小, 赤铁矿在氧化性环境中较稳定, 进入到还原环境则向磁铁矿方向转化, 最后形成菱铁矿。而菱铁矿的形成条件是在碳酸氢根浓度很高时, 并且在还原性环境中, 菱铁矿才能可能取代磁铁矿。

图 8C 示含硫比较低(实际上是不含硫)的环境中的赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿的稳定范围。矿物的稳定性条件是 pH 值应大于 7。矿物种类的变化主要决定于氧化还原电位, 随着环境还原性的增加, 磁铁矿将在弱还原环境中取代赤铁矿, 进而由菱铁矿进一步在强还原环境中取代磁铁矿。

图 8D 示含硫变化比较大的环境中含铁矿物的稳定性情况。当硫含量一定时, 从氧化环

境到还原环境,赤铁矿将被磁铁矿、磁铁矿将被菱铁矿代替,或者赤铁矿被黄铁矿、黄铁矿被磁黄铁矿代替。当氧化还原条件一定时,随着硫含量的增高,磁铁矿将为黄铁矿、菱铁矿将为磁黄铁矿代替。

图8综合说明了,富硫的环境中易于形成黄铁矿、磁黄铁矿,富有机碳的环境中易于形成菱铁矿。赤铁矿在氧化环境中稳定,磁铁矿在弱氧化弱还原环境中稳定,而黄铁矿、磁黄铁矿、菱铁矿则在还原环境中稳定。含铁矿物均在碱性环境中比较稳定,而在酸性环境中相对不稳定。

二、烃类物质引起的环境变化

上述含铁矿物的稳定性是在没有烃类参与的假设条件下进行的讨论。下面将说明当环境中存在着烃类作用时,烃类物质将如何改变环境中的pH度、氧化还原电位,以及硫、碳等的含量。如果这些条件被改变,含铁矿物种类及其含量将随着改变,因此发生了烃类物质作用引起的磁效应。

在一般自然环境中,烃类物质本身与铁族元素或含铁矿物没有明显的化学关系,即它们之间直接形成有机碳氢铁合物的可能性较小。烃类物质与含铁矿物的关系是通过细菌的活动作为桥梁的。

(一) 微生物及其分布

从地表的土壤层,直到地下深处的煤层、油藏和气藏,均有一系列适合不同种类微生物生存的环境条件。据L. C. Price (1985) 介绍,Telegina 等人(1963)在2680m深处发现了与油气有关的烃氧化菌;Rybakova (1957)从4200m深的原油中分离出了脱氮菌和硫酸盐还原菌。

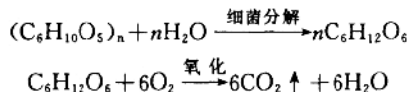
以烃类物质为食物源的细菌有3种类型:①需氧菌,在它们的存在过程中必须有游离氧存在。②兼性需氧菌,它们在有氧环境和无氧环境中都可生存。③厌氧菌,在没有游离氧的环境下生存。需氧菌分布于地表,厌氧菌分布于地下。对于烃类物质的氧化,不仅大多数需氧细菌有这个能力,厌氧菌(如脱氮菌、硫酸盐还原菌等)也有这个能力。

图9表示低位泥炭沼泽剖面中细菌及pH值的变化情况。泥炭剖面富含有机质,表层为氧化环境,有大量的需氧菌(以硝化菌为代表),而厌氧菌很少,随着深度的增加,逐步转化为还原环境,需氧菌减少,而厌氧菌增多。而pH值似乎随深度的增加而增大,与厌氧菌的数量随深度变化的情况一样。当然,这只是限于深度为2m情况下的现象。

(二) 微生物的生态作用

微生物的生态作用,我们关心的是细菌对有机物的分解作用与氧化作用。

细菌对有机质的分解作用,最后产物一般是水、二氧化碳等,如植物遗体中的纤维素被需氧菌分解变成单糖,单糖进一步氧化分解形成二氧化碳和水:



厌氧性的硫酸盐还原菌,对烃类的分解,导致硫化氢、二氧化碳的形成,以氧化甲烷为例,有下式所表示的过程发生:

