

油气放射性勘查原理方法与应用

王 平 熊盛青 编著

地 质 出 版 社
北 京

内 容 提 要

本书是关于放射性方法勘查油气藏方面的专著,比较全面系统地介绍了油气放射性勘查方面的理论、方法、技术和应用。

本文的主要内容有放射性测量基础、油气放射性异常特征及形成机理、各种有效的放射性勘查方法与应用,以及干扰因素的消除等。尤其在放射性勘查机理及干扰因素等方面的研究颇具特色,提出了盆地流体微运移循环的设想和油田放射性异常综合成因模式以及多种消除干扰因素的方法。

本书理论联系实际、深入浅出,可供从事油气勘查的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气放射性勘查原理方法与应用 / 王平,熊盛青编著 .

北京:地质出版社,1997.10

ISBN 7-116-02338-0

I. 油… II. 王… ②熊… III. 油气勘探 放射性勘探-概论 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21999 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:官毓兰 王璞

*

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:787×1092¹/₁₆ 印张:9.5 字数:219000

1997年10月北京第一版,1997年10月北京第一次印刷

印数:1—350册 定价:17.00元

ISBN 7-116-02338-0

P·1754

前 言

利用放射性勘查方法寻找油气的试验工作自本世纪 20 年代就已开始, 由于该方法具有简单、实用、投资少、见效快等特点而受到重视。50 年代前后, 在一些国家和地区取得了效果, 钻出了油气。但后来, 由于机理、干扰因素、仪器灵敏度和推断解释等问题没有完全解决, 使放射性勘查方法一度处于停顿状态。70 年代以来, 在找油难度日益增大, 常规方法成本不断提高, 投资又逐渐减少的情况下, 放射性勘查方法第二次兴起。80 年代后, 国内在油气放射性勘查方面再次开展工作, 并取得可喜成绩。根据国内外应用情况大致统计, 放射性勘查方法找油有效率在 50%~90% 范围内, 说明该方法是有效的。然而, 在生产实践中, 仍存在一些需要解决的问题。

目前, 关于油气放射性勘查的理论和方法技术及应用全面文献并不多, 即使在国外也是如此。一般只限于单一方法或某个实例的介绍, 所以在一定程度上影响了油气放射性勘查的进一步发展。本书在总结前人工作的基础上, 结合作者近十年来科研、生产实践, 试图全面、系统地介绍油气放射性勘查的理论、方法、技术和应用, 重点对人们所关心的油气放射性勘查机理问题和干扰因素问题进行了较为深入、系统的探讨。

本书共分三章, 第一章油气放射性勘查的理论依据, 介绍了放射性的基础知识, 通过实例分析论述了油田放射性异常特征, 从理论上探讨了油田放射性异常的物质来源、放射性物质垂向运移等问题, 提出了盆地流体微运移循环的设想和油田放射性异常综合成因模式。第二章油气放射性勘查方法, 介绍了用于油气勘查的放射性方法, 包括航空 γ 能谱测量、地面 γ 能谱测量、常规射气测量、 α 径迹测量、钋-210 测量、 α 聚集器测量、活性炭测量和热释光测量。第三章油气放射性勘查方法的应用, 在分析油气放射性勘查中的干扰因素的基础上, 介绍了减少干扰因素的措施和数据处理方法, 特别是数据归一化方法。最后通过航空 γ 能谱测量和地面放射性测量分析, 说明油气放射性勘查方法的应用效果及应用条件。

本书内容较全面系统, 理论联系实际, 深入浅出, 可供从事非震油气勘查的科技人员参考, 也可供大专院校有关专业的师生参考。

作者在从事油气放射性勘查研究工作中, 得到长春地质学院李舟波教授、戴丽君教授、中国地质大学程业勋教授、章晔教授的指导和地矿部航空物探遥感中心张文斌、徐东宸高级工程师的支持, 在此表示衷心感谢。

由于条件所限, 有不当之处, 请读者和专家批评指正。

王 平 熊盛青

1996 年 5 月 于北京

放射性测量常用物理量和单位的名称、符号对照表

过去常用		标准		单位换算式
量名称和符号	单位名称和符号	量名称和符号	单位名称和符号	
[放射性]活度 A	居里 Ci	[放射性]活度 A	贝可[勒尔]Bq	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
放射性气体浓度 N	埃曼 em	活度浓度 c_A	每升贝可 Bq/L	$1 \text{ em} = 3.7 \text{ Bq/L}$
吸收剂量 D	拉德 rad	吸收剂量 D	戈[瑞] Gy	$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$
剂量当量 H	雷姆 rem	剂量当量 H	希[沃特]Sv	$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$
照射量 X	伦琴 R	照射量 X	1 库仑每千克 库/千克 C/kg	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{kg}\cdot\text{s})$
照射量率 X	伦琴每秒 R/S 微伦琴每小时 $\mu\text{R/h}$ 伽玛 γ	照射量率 X	1 库仑每千克秒 库/(千克秒) C/(kg·s)	$1 \text{ R/s} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ $1 \mu\text{R/h} = 1 \gamma$ $= 71.67 \times 10^{-15} \text{ C}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ $= 71.67 \mu\text{C}/(\text{kg}\cdot\text{s})$
计数率 I_r	每秒计数 cps	计数率 I_r	每秒计数 c/s	$\text{sps} = \text{c/s}$
总计数率 Tc	每分计数 cpm	总计数率 I_{tot}	每分计数 c/min	$\text{cpm} = \text{c/min}$
放射性元素含量		放射性元素质量分数		
铀含量 Q_U U(ppm)	百万分之一(铀) ppm	铀质量分数 w_U 或 $w(U)$	百万分之一 10^{-6}	$1 \text{ ppm} = 10^{-6}$
钍含量 Q_{Th} Th(ppm)	百万分之一(钍) ppm	钍质量分数 w_{Th} 或 $w(Th)$	百万分之一 10^{-6}	$1 \text{ ppm} = 10^{-6}$
钾含量 Q_K K(%)	百分之一(钾) %	钾质量分数 w_K 或 $w(K)$	百分之一 %	$1 \% = 10^{-2}$
归一化法剩余值		归一化法剩余值		
钾剩余值 K_d	百分之一 %	钾剩余值 w_{K_d}	百分之一 %	
铀剩余值 U_d	百万分之一 ppm	铀剩余值 w_{U_d}	百万分之一 10^{-6}	
总道剩余值 Tc_d	每秒计数 cps	总道剩余值 I_{tot_d}	每秒计数 c/s	
简化归一法相对偏差		简化归一法相对偏差		
钾偏差值 KD	百分之一 %	钾偏差值 δw_K	百分之一 %	
铀偏差值 UD	百分之一 %	铀偏差值 δw_U	百分之一 %	

目 录

第一章 油气放射性勘查的理论依据	(1)
第一节 放射性概述	(1)
一、放射性	(1)
二、天然放射性系列	(3)
三、放射性平衡	(4)
四、放射性测量单位	(6)
第二节 油田放射性异常成因理论概述	(7)
一、深部成因说	(7)
二、浅部成因说	(8)
三、国内的主要观点	(9)
四、对各种观点的分析	(10)
第三节 油田放射性异常特征	(12)
一、井中放射性异常与油气藏的关系	(12)
二、井中异常与地表、空中放射性异常的对比	(16)
三、油田放射性异常基本特征	(19)
第四节 油田放射性异常的物质来源	(21)
一、放射性元素的地球化学性质	(21)
二、放射性元素的地球化学丰度	(23)
三、含油盆地中有机质与铀的关系	(25)
第五节 盆地中放射性元素的垂向运移	(27)
一、放射性元素垂向运移的载体	(27)
二、放射性元素垂向运移的通道	(28)
三、放射性元素垂向运移的动力	(32)
四、盆地中流体微运移循环的设想	(34)
第六节 烃类微渗漏与地表放射性元素的分布变化	(36)
一、烃类微渗漏	(36)
二、烃类微渗漏对地表化学环境的改变	(37)
三、烃类微渗漏与地表放射性元素的重新分布	(39)
第七节 油田放射性异常综合模式	(41)
一、放射性异常的形成	(41)
二、油田放射性异常综合模式	(41)
第二章 油气放射性勘查方法	(46)
第一节 航空 γ 能谱测量	(46)
一、飞机上测得的 γ 照射量率	(46)
二、航空 γ 能谱测量原理	(48)
三、航空 γ 能谱测量方法技术	(52)
第二节 地面 γ 能谱测量	(55)
一、岩石和土壤中铀 (镭)、钍、钾含量的测定	(56)
二、地面 γ 能谱仪的标定	(57)
三、地面 γ 能谱测量统计涨落误差	(59)

四、仪器性能检查	(60)
五、仪器自然底数的测定	(61)
六、野外工作方法	(62)
第三节 常规射气测量	(63)
一、射气性质和射气晕的形成	(63)
二、射气测量工作方法	(67)
三、常规射气测量资料的整理	(71)
第四节 α 径迹测量	(73)
一、固体径迹探测器	(73)
二、射气浓度与 α 径迹密度的关系	(76)
三、 α 径迹测量工作方法	(78)
四、 α 径迹测量资料的整理与解释	(80)
第五节 钋-210 法	(80)
一、钋-210 法基本原理	(80)
二、钋量测量工作方法	(81)
三、钋-210 测量资料的整理与解释	(83)
第六节 α 聚集器测量	(83)
一、 α 卡、 α 杯测量	(84)
二、 α 管测量	(87)
第七节 活性炭测量	(89)
一、活性炭吸附器装置	(89)
二、野外工作方法	(90)
三、室内数据整理	(90)
第八节 热释光法	(93)
一、热释光的基本原理	(93)
二、剂量探测器热释光测量	(95)
三、天然热释光法	(98)
第三章 油气放射性勘查方法的应用	(100)
第一节 干扰因素分析及抑制方法	(100)
第二节 数据处理及解释方法	(103)
一、突出油田异常的一般数据处理方法	(103)
二、消除岩性及土壤干扰的能谱数据归一化方法	(104)
第三节、航空 γ 能谱测量应用实例分析	(111)
一、国外研究实例	(111)
二、在我国油气勘查中的应用	(116)
第四节、地面放射性测量应用实例分析	(124)
一、几个实例	(124)
二、 γ 能谱实测结果分析	(128)
三、氡气测量的有关问题	(129)
四、综合放射性方法在 CQ 油田的应用	(131)
参考文献	(141)

第一章 油气放射性勘查的理论依据

油气放射性勘查是利用放射性测量仪器探测油气田上方地表辐射场的变化规律来寻找油气藏的。这种辐射场的变化主要由放射性元素的分布变化决定，因而地表放射性元素分布与地下油气藏的关系，就是油气放射性勘查的根本问题。本章围绕这个根本问题介绍了放射性的基本概念，论述了油田放射性异常的特征、油田放射性异常的来源、盆地放射性元素的垂向运移以及油田放射性异常的模式。

第一节 放射性概述

元素的性质是由原子结构所决定的。原子核的结构决定元素的稳定性，核外电子的分布和运动状态决定元素的化学性质。

原子核的结构有一定的规律，核质量数小的原子核中质子数与中子数相等，或中子数略多些（只有 ${}^1\text{H}$ 和 ${}^3\text{He}$ 例外）这种原子核通常处于最低能级——基态，因而它们是稳定的。周期表中的轻元素的原子核就是这种稳定的原子核。任何含过多质子或中子的原子核都不稳定，例如周期表中原子序数大于82的元素，其核中的中子数比质子数多50%以上，这些元素的原子核都不稳定。铀是自然界中最重要的放射性核素，在 ${}^{238}\text{U}$ 的核中，质子数=92，中子数比质子数多59%，所以铀不稳定，易发生衰变。某些轻元素，由于其原子核中有过剩的中子或质子（如 ${}^{14}\text{C}$ 有过剩的中子， ${}^{11}\text{C}$ 有过剩的质子），它们也是不稳定的。不稳定的核素都属于放射性核素。

一、放射性

某些核素能自发地放出粒子或 γ 射线，或在轨道电子俘获发生后放出X射线，或发生自发裂变的性质称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素。某元素的所有同位素都具有放射性，则称此元素为放射性元素。铀、镭、钋、钍都为放射性元素。 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}^{222}\text{Rn}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 等为放射性核素。

（一）放射性衰变

1. α 粒子

α 粒子是核转变时放出的 ${}^4\text{He}$ 核，其能量介于4~8MeV之间。这种粒子由两个质子和两个中子组成，带两个单位的正电荷，质量数为4。 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{230}\text{Th}$ 、 ${}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}^{222}\text{Rn}$ 等核素衰变时都能放出 α 粒子。

2. β 粒子

β 粒子是 β 衰变中放出的正电子或负电子，其速度很快，接近光速，质量很小，带一个单位的电荷。 ${}^{234}\text{Th}$ 、 ${}^{234}\text{Pa}$ 、 ${}^{214}\text{Bi}$ 、 ${}^{210}\text{Tl}$ 、 ${}^{210}\text{Pb}$ 、 ${}^{210}\text{Bi}$ 等核素衰变时放出 β 粒子。

3. γ 射线

γ 射线是伴随 α 、 β 衰变放出的一种波长极短的电磁辐射。原子核发生 α 、 β 衰变时，新生成的原子核往往处于激发状态，当它由激发状态回到正常状态时，就以 γ 光子的形式放出多余的能量。不同的放射性核素衰变时所放出的 γ 射线的能量是不同的，一般介于几万到几兆电子伏之间， γ 射线本身不带电。 ^{238}U 、 ^{234}Th 、 ^{234}Pa 、 ^{230}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 等核素衰变时放出 γ 射线。

4. 轨道电子俘获

当原子核中质子过剩时，原子核中的质子从核外捕获一个轨道电子而变成一个中子，并放出一个中微子，此现象称为电子俘获。由于K层离核最近，所以K层电子俘获的几率最大。从K层俘获电子叫做K电子俘获。

5. 自发裂变

在无任何外界作用的情况下，原子核自发地分裂成大小不等，质量相近的2个或3~4个碎片，同时放出2~3个中子。各种放射性核素中 ^{238}U 的自发裂变几率最高。但与 α 衰变相比， ^{238}U 自发裂变的几率很低，大约每进行两百万次 α 衰变才发生一次自发裂变。

(二) 射线与物质作用

射线作用于周围物质时，会产生一些特殊现象，这些现象在地质找矿工作中常有广泛的应用，以下对此作一简单的介绍。

1. 穿透物质

射线具有穿透物质的能力，它在物质中穿行的距离叫射程，射程越长，表示其穿透能力越强。不同种类的射线，其射程长短不同。同一种射线的射程，则取决于射线的能量及被穿过物质的性质。在标准状态下， α 粒子随着其本身的能量不同，在空气中的射程为2.5~8.6 cm； β 粒子射程为4~130 cm，最长可达几米； γ 射线的射程为100~200 m。它们的穿透能力之比约为 $\alpha : \beta : \gamma = 1 : 100 : 10000$ 。 γ 射线穿透物质的能力被用于进行地面和航空 γ 测量以寻找矿藏。在固体中三种射线的穿透能力均大大减小。一张纸或0.004~0.005 cm厚的铝箔就可把 α 射线全部屏蔽；0.5cm厚的铝板可以挡住 β 射线，而50~60 cm厚的铝板才能挡住 γ 射线。

2. 电离作用和激发作用

射线通过物质时，可以把部分能量传递给该物质中的束缚电子（外层电子），使其从电子壳层中逸出成为自由电子，而原子则变成带正电的离子，这种作用叫做电离作用。如果束缚电子所获得的能量不足以使它变成自由电子，而只跃迁到更高的能级轨道，则称为激发作用。各种射线的电离作用能力（在单位距离上产生的离子对数）各不相同， α 射线最强， β 射线次之， γ 射线最弱，其比例大约为 $\alpha : \beta : \gamma = 10000 : 100 : 1$ 。静电计和一般的辐射仪就是根据射线的电离作用来测定物质的放射性活度的。

3. 热释光

在加热到一定温度时，处于更高能级的激发电子又能返回原来的基态轨道，同时放出光，这一现象被称为热释光。热释光的强度与放射性物质的含量、非放射性物质被照射的时间呈正相关关系。在地质、考古工作中常利用热释光原理来测定岩石或物质年龄，也有人利用热释光现象进行探测铀矿和油气的试验。

4. 荧光作用

射线射到某些物质上（如硫化锌、碘化钠等）能激起荧光或磷光。某些铀化合物在紫

外线照射下也能发出荧光。荧光的强弱决定于射线的强度。闪烁探测器就是利用 γ 射线能使碘化钠晶体产生荧光的原理来测定物质的放射性活度。

5. 产生热效应

射线被物质吸收，动能转变为热能，致使被照射物质的温度升高。1 g 铀每小时产生 $38.5 \times 10^{-5} \text{ J}$ 的热量，1 g 镭每小时放出 578 J 的热量。三种射线中以 α 射线的热效应最强。放射性衰变所产生的热量对于地球的动力、构造运动有重要影响。

6. 化学反应及其它变化

射线作用可以引起物质发生化学反应及其它变化，如使 H_2O 、 HCl 、 NH_4^+ 分解，使有机组织的分子破坏而造成死亡，等等。射线还能使岩石变色或褪色（石英变黑，萤石变紫，长石变红，炭质褪色）。三种射线中以 α 射线产生化学效应的能力最强。

7. 裂变

核裂变的碎片具有很大的能量，当它们撞击其周围物质时，能使这些物质遭受损伤，这种损伤称为碎片的径迹。径迹的密度与物质中铀含量呈正相关，这一原理被利用来测定水中微量铀和进行径迹找矿。

二、天然放射性系列

自然界中存在着铀、钍、锕三个天然放射性元素系列，它们存在于原子序数 81 到 92 的元素之间。其中从原子序数 84 的 Po 到原子序数 92 的 U 这九个元素，它们所有的同位素都是不稳定的，是具有天然放射性的元素。原子序数为 81、82、83 的 Tl、Pb、Bi 三个元素的部分同位素也是具有天然放射性的。 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{235}U 分别是三个起始元素，经过复杂的衰变形成了三个系列。图 1—1 绘出了三个天然放射性系列。

铀系由 15 个放射性核素组成，根据衰变特征、元素和地球化学性质以及核素的半衰期，将铀系分成二个组：铀组（由原子序数 Z 从 89 至 92 的 4 个核素组成）及镭组（由 $Z < 88$ 的核素组成）。

铀系产生的 α 粒子，其能量分布在 4.1~7.7 MeV 范围内，且 α 粒子能量越大，其相应的 α 辐射体寿命越小。铀系的主要 β 辐射体为 ^{234}Pa 、 ^{214}Bi 及 ^{210}Bi 。铀系放出的 β 粒子能量变化很大，从 ^{210}Pb 产生的 14 keV 到 ^{214}Bi 放出的 3.2 MeV。铀系主要的 γ 辐射体是 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 。主要的 γ 射线能量是 0.609、1.120、1.764 及 2.204 MeV。铀组产生的 γ 射线虽然能量范围分布很宽，但其强度很弱，相对强度只占整个铀系的 2%。野外测量到的 γ 射线是铀系中第八、九个子体的贡献，并非 ^{238}U 所产生。

对于钍系，除元素 ^{232}Th 外，所有子体的半衰期都相对很短。钍系 α 粒子能量分布在 4.0~8.8 MeV。放出最大能量 α 射线的核素是 ^{216}Po 。主要的 β 辐射体是 ^{212}Bi 和 ^{208}Tl ，后者也是主要的 γ 辐射体，它放出三个天然放射性系列中最大能量的 γ 射线——2.614 MeV。

三个系列中各有一个气态元素，其原子序数为 86，是氡的放射性核素，通常称之为射气。铀系的射气是 ^{222}Rn ，半衰期 $T_{1/2}$ 为 3.82 d。钍系的射气是 ^{220}Rn ，半衰期 $T_{1/2}$ 为 55.6 s。射气都能逸出，它们的衰变子体就可能附着于物体表面。对于铀系，氡的衰变子体分为短寿（ ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po ）及长寿（ ^{210}Pb 、 ^{210}Bi 、 ^{210}Po ）两类。这样，铀系的主要 γ 辐射体都是 Rn 短寿衰变子体。钍系中射气的衰变子体都是短寿核素。

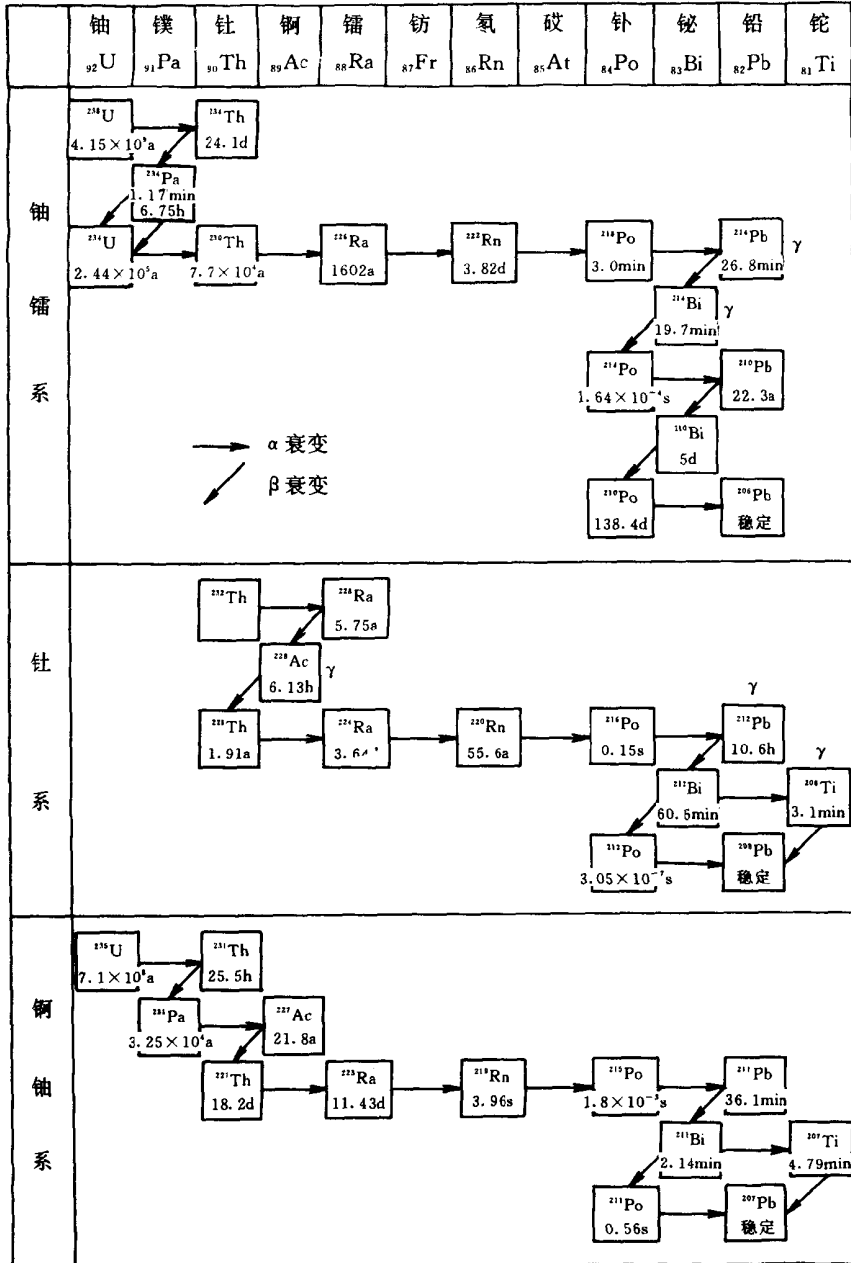


图 1—1 天然放射性系列衰变图

三、放射性平衡

某一衰变系列中，各放射性核素的活度均按该链前驱核素的平均寿命随时间作指数衰减的状态。当前驱核素与子体核素的放射性活度比值为一常数时称为放射性平衡。这种放

放射性平衡只有在前驱核素的平均寿命比该衰变系列中其它任何一代子体核素的平均寿命长时才是可能的。如果前驱核素的寿命很长，以至在考察期间前驱核素总体上的变化中可以忽略，那么所有核素的放射性活度将几乎相等，这时形成的放射性平衡称为长期放射性平衡。如果前驱核素的寿命略大于子体核素，当它们的放射性活度比值为常数时，这时形成的放射性平衡就称为暂时平衡。

放射性核素在衰变过程中，其原子核数的减少服从指数规律，即

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-1)$$

式中， N_0 ——起始时 ($t=0$) 放射性核素的原子核数； t ——衰变时间； N_t ——经时间 t 后该放射性核素所剩下的原子核数； λ ——衰变常数，即放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率，其单位是时间的倒数 (s^{-1} 、 min^{-1} 、 h^{-1} 、 d^{-1} 、 a^{-1}) 衰变常数 λ 由下式给出：

$$\lambda = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt}$$

式中， N ——在时间 t 时存在的该核素核的数目。

放射性核素的 λ 值越大，衰变越快，在数值上 λ 等于单位时间内发生衰变的原子核数与存在的原子核数之比。

放射性核素衰变速度还可用半衰期表示。半衰期 ($T_{1/2}$) 与衰变常数的关系为

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (1-2)$$

当经过一个半衰期时，原子核数剩下一半；经过两个半衰期时剩下 $1/4$ 若经过十个半衰期，则剩下 $1/1000$ ，这时一般可认为放射性核素已全部衰变完了。

当母体核素衰变所生成的子体核素也具有放射性时，该子体核素也将按自身固有的衰变速率衰变，并继续得到母体核素衰变的补充，所以子体核素能在母体核素及自生衰变速率的影响下，按一定的规律逐步积累，这称为递次衰变规律。假定母体核素 A 没有新的来源，B 为其子体核素，仍具有放射性，则 B 核素的原子核数与 A 核数净增量等于 t 时间内新生 B 核素原子核数减去同一时间内 B 核素的原子核数衰变量，则放射性核素 B 的原子核数 (N_B) 随时间变化的规律可用下式表达：

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A_0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_{B_0} e^{-\lambda_B t} \quad (1-3)$$

式中， N_{A_0} 、 N_{B_0} ——当 $t=0$ 时 A 和 B 核素的原子核数； λ_A 、 λ_B ——A 和 B 核素的衰变常数； N_B ——时间为 t 时 B 核素的原子核数。

等式 (1-3) 中右边前一项表示经时间 t 后由母体核素 A 衰变而来的 B 核素净增加原子核数，后一项是子体核素 B 原有 ($t=0$ 时) 的原子核数 N_{B_0} 经时间 t 衰变剩余的原子核数。由 (1-3) 式可见，B 核素的原子核数随时间的变化取决于 λ_B 与 λ_A 之间的差别。

系列中的每一个核素，既由前一个核素衰变生成，而本身又不断衰变形成下一个核素。可以证明，当时间大于系列中寿命最长的子体半衰期 10 倍以上时，系列中各核素的衰变率相等，即满足等式

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \cdots = \lambda_n N_n \quad (1-4)$$

此时，称系列达到放射性平衡。铀系子体中 ^{234}U 半衰期最长，为 $2.44 \times 10^5 \text{a}$ 因此铀系建立平衡约需 2.5 Ma。计算可知，与 1 g 铀平衡时镭的量仅为 $3.4 \times 10^{-7} \text{g}$ 。而镭组由 ^{226}Ra 到 ^{214}Bi 建立平衡需要 38 d。由于铀与镭的地球化学性质有明显的差异，铀和镭常常分离、迁

移和重新富集，引起铀-镭平衡状态的变化。令二者质量的如下比值为 C ，即

$$C = m_{Ra} / (3.4 \times 10^{-7} m_U)$$

称 C 为平衡因数。当 $C > 1$ 时，称为富镭； $C < 1$ 时，称为富铀； $C = 1$ 表明铀、镭处于平衡。

四、放射性测量单位

放射性测量及防护中常用的物理量及单位如下。

(一) 国际单位制 (SI) 单位

1. 贝可 [勒尔] (Bq) 它是每秒发生一次衰变的 [放射性] 活度^①。

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

[放射性] 活度 (A) 是核反应的物理量，它是指在给定时刻，放射性核素在单位时间内发生核衰变的次数。

2. 戈 [瑞] (Gy) 它是 1 焦耳每千克的吸收剂量。

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

吸收剂量 (D) 是度量介质在辐射场中吸收辐射能量的物理量。定义为：单位质量的某介质所吸收的平均能量，用公式 $D = dE/dm$ 表示。

3. 希 [沃特] (Sv) 它是 1 焦耳每千克的剂量当量。

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

剂量当量 (H) 是辐射防护用的物理量。用以统一衡量各种辐射对人体产生的生物效应。用公式 $H = DQN$ 表示。式中 D 是吸收剂量， Q 是辐射的品质因子， N 是修正因子。

4. 库 / 千克，库仑每千克，(C/kg) 它是 X 射线或 γ 射线的照射量单位。

照射量 (X) 是对辐射产生电离能力的一种度量。它定义为 X 或 γ 辐射在质量为 dm 的空气中释放出来的全部电子 (正电子和负电子) 被完全阻止于空气中时，在空气中形成的一种符号的离子总电荷的绝对值除以 dm ， $X = dQ/dm$ 。

5. 库 / (千克 · 秒)，库仑每千克秒， $C / (\text{kg} \cdot \text{s})$ ^② 它是 X 或 γ 射线的照射量率单位。

照射量率 (X) 即单位时间内的照射量。

以上国际单位是 1975 年国际计量大会通过的，已被我国确定为法定计量单位。

(二) 过去常用的单位

由于学科发展的原因，放射性测量单位几经变革，比较繁杂。但是考虑到学科本身的特点，单位改换需要一个过渡时期，1975 年国际辐射单位及测量委员会建议下述单位暂时和 SI 单位一起使用，但应于 1986 年以前废除。下面介绍在生产工作及专业书籍中过去使用过的常见单位，并给出这些非国际单位制的单位换算为 SI 单位的系数。

1. 居里 (Ci) 它是 1964 年决定使用的表示放射性活度的专用单位。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

2. 埃曼 (em) (专业书刊上常译为 “ 爱曼 ”)。它是放射性气体的活度浓度单位。

① “ [放射性] 活度 ” 及 “ 贝可 [勒尔] ” 是该物理量及其单位的全称，方括号中的字在不致引起误解的情况下可以省略，省略后为其简称。单位的简称 “ 贝可 ” 可作为中文的单位符号，用于科普书籍中；而专著中应该使用外文符号 Bq。其它物理量亦如此。

② “ 库 / (千克 · 秒) ”；“ 库仑每千克秒 ”，“ $C / (\text{kg} \cdot \text{s})$ ” 它们分别为该单位的中文符号，中文全称和外文符号。——编辑注

$$1 \text{ em} = 10^{-10} \text{ Ci/L} = 3.7 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3 = 3.7 \text{ Bq/L}$$

3. 伦琴 (R) 为照射量单位。

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

4. 伦琴每秒 (R/s) 为照射量率单位。专业书刊上过去常用微伦琴每小时 ($\mu\text{R/h}$) ,简称伽玛 (γ) 作为单位。

$$1 \mu\text{R/h} = 1 \gamma = 71.67 \times 10^{-15} \text{ C/(kg} \cdot \text{s)} = 71.67 \text{ fC/(kg} \cdot \text{s)}$$

此外, 因为“射线强度 I ” (它是单位时间内垂直入射到物质单位截面的射线能量) 与照射量率 X 有近似正比的关系, 过去在放射性勘探工作中也常用 γ 作为其单位。

5. 拉德 (rad) 为电离辐射的吸收剂量专用单位。

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gv}$$

6. 雷姆 (rem) 用于电离辐射防护方面, 为剂量当量所使用的专用单位。

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

在 1986 年制订的中华人民共和国国家标准 GB3102.9 和 GB3102.10 中, 建议一般不使用上述单位, 仅在专业性较强的书籍中暂时并用。1993 年修订版又在备注栏给出了换算为 SI 单位的换算系数, 帮助大家迅速淘汰旧单位。本书遵循上述原则采用 SI 单位, 但个别地方为了叙述方便也采用 SI 的并用单位。

此外, 由辐射仪实测的计数率 [每秒或每分钟记录的脉冲计数 c/s 或 c/min 其中 c 代表计数 (counts)] 与射线强度 I 成正比, 在描述相对射线强度 I_r 时, 常习惯用 c/s , c/min 为单位 (过去的符号是 cps, cpm), 因而计数率也常用符号 I_r (或简写为 I) 表示之。

此外, 在描述相对测量时, 也用习惯用法: 单位时间的脉冲数 (如每秒计数 c/s , 每分钟的脉冲数 c/min) 等来表示辐射的强弱。

第二节 油田放射性异常成因理论概述

异常的机理研究是放射性找油方法的基础, 自该方法提出以来, 人们对此问题就十分关注。30 年代初, Laubmeyer 提出地下流体迁移机理。此后, 又有许多假说问世, 从不同角度对放射性异常的形成进行了解释。从放射性物质来源分析可将假说归纳为二类, 即深部成因说和地表成因说。从放射性物质的运移方式和地球化学作用还可细分为液态运移方式、气态运移方式以及烃类运移作用和细菌氧化作用等。

一、深部成因说

自放射性找油方法产生以来, 从 30 年代到 70 年代末, 在异常机理研究中一直是深部成因说占统治地位, 成为支撑地球化学勘探、放射性勘探等非常规找油方法的基础。

Hans Lundberg (1956 年) 认为油气田产生的放射性异常与油气的积累过程和深层水的迁移有关⁽³⁾。岩石是以不同的方式由矿物颗粒构成的。在深部岩石颗粒间一般充满液体, 通过岩层的液体缓慢移动, 当流体汇聚到圈闭构造时, 在盖层下减缓流动, 在适合的条件下, 油从水中分离出来并逐渐积累。盖层下的油藏形成后, 下面上来的液体被油藏遮挡, 因而很少或没有水到达油藏正上方的地表。另一方面, 水中的组分在与石油的接触中产生变化。根据氯化物和硫酸盐的性质, 烃类的存在会把硫酸分解成硫化物, 以至使从油田边部上溢

的水不含硫。这种含氯化物的水可以从经过的岩石中溶解镭和其它物质，并把它们带到地表，使油田边部地表镭含量高而在油田上方低。

Langford (1962 年) 也认为放射性源来自深部。当有油气储集时，甲烷含量增加，部分垂直运移到地表。这些甲烷分子是某些放射性衰变产物的载体，当甲烷及放射性产物迁移到地下水面上时，便干燥、沉淀及辐射低能 γ 射线（即软射线），而油气聚集区地表铀和钍直接辐射的 γ 射线（硬射线）不变，软射线相对背景增加，因而总射线强度增加，即油气田上方产生高值异常。

Pirson (1969 年) 从盆地形成时深部压实水的垂向运移观点出发，提出一种油藏形成放射性异常的模型^[43]。在含油盆地沉积和固结期间，由于上覆地层的压力，泥岩中的水被挤压出来带着有机物和包括放射性物质在内的其他物质向上迁移。在条件适合的地段（如具有盖层的背斜）有机物积累逐渐形成油藏，油和水分离，向上迁移的溶液被油层阻挡而转向油层的边缘并继续向上迁移。在迁移过程中溶液中的放射性物质部分被地层吸收，即引起上覆地层“矿化”，由于水的垂直运移这种矿化可达很远距离，甚至可穿过不整合面达到地表，它的痕迹用放射性测量最易探测到，因而土壤中的放射性填图可用于寻找油气藏。

Amstrong 和 Heemstra (1973 年) 对前人的工作进行了总结。随后 (1977 年) 他们把解释伽玛异常的理论概括成三点：

第一，重金属（包括铀）与石油碳氢化合物之间存在着某种有意义联系。在沉积地层中形成石油的碳氢化合物趋向与铀共生，因为两者的形成均需要相同性质的围岩和沉积凹陷。美国大多数已发现的含铀矿化的砂岩沉积物中，铀矿物充填着多孔岩石的空隙。可见铀是溶液中沉淀而形成的。

第二，地下水中的金属元素趋向于聚集在水相与碳氢化合物沉淀层之间的初始还原接触带上。水和碳氢化合物接触带的地球化学环境是强还原环境，在这种环境中铀通常由 +6 价变为 +4 价，这种变化能促使还原铀形成有机金属化合物，并使其本身从有机相和水相之间分离出来。热动力条件表明，铀有扩散到有机油矿藏中的巨大趋势。在原油提炼厂的余渣中通常存在高铀含量的事实便可证实这一点。镭通常不与有机物质混合，而从含油岩石中迁移到岩层水中。与铀含量比较，油田水中 ^{226}Ra 含量是相当高的，因为在强还原环境下镭在水中活动性增强，并从地层中溶解出来。负的 E_h 值可使硫化物还原成硫化氢，从而阻止了镭的沉淀。

第三，水成分稳定的垂直运移将 ^{226}Ra 和可溶于水的成分携带到地表。根据热力学理论，流体的迁移方向是从高温区到低温区，从深部到浅部，从盆地中心到盆地边缘，这都是由地热和压力梯度引起的。控制这些迁移活动的因素是岩石孔隙中石油和天然气的浮力、毛细管压力及流体流动的水动力。这些因素能使 ^{226}Ra 向上迁移到达油气边缘的地表并形成异常。

二、浅部成因说

浅部成因说是在石油化探的烃类微渗透理论上发展起来的。

J. G. Morse 等人 (1983 年) 提出一种新模型^[6]。他们认为放射性核素的源与地下油气藏无直接关系。烃类气体透过油气储集层盖层向上渗漏，或随地下水向上运移，直到近地

表潜水面为止。在潜水面附近，烃类气体离开还原环境进入氧化环境，其中部分渗出地面，在地表形成高值烃异常；部分在近地表氧化带内，氧化成二氧化碳和水。二氧化碳与土壤或沉积物的硅酸盐和铝硅酸盐矿物产生化学反应并使其分解，形成次生碳酸盐、二氧化硅和氧化铝。该过程产生的碳酸铝和其它矿物在土壤或沉积物中形成了充填孔隙的特殊胶结物。受到作用的土壤和沉积物能捕获水溶性放射性核素。这些放射性核素不是来自油气藏，而是赋存在潜水面以下饱和和沉积物的游离水中，或在潜水面以上未饱和的孔隙水中。在土壤或沉积物中烃类气体被氧化的氧化-还原界面上，放射性核素极易被捕获。如果这个界面很深，放射性元素到达地面的可能性减少，地面放射性相应降低。如果该界面靠近地表，那么地面放射性将会增高。1995年 Morse 再次阐明烃类存在时的地球化学反应抑制了 U 的运动而导致油藏上方 γ 辐射减少的观点^[64]。

Price (1986 年) 基于地表微生物对烃类的作用讨论了油田放射性异常形成的机制^[7]。他认为：由于微生物氧化垂直迁移烃而产生的高 CO_2 浓度，不仅造成相当数量的方解石沉淀，而且因 CO_2 浓度高而产生的酸溶液会使粘土蚀变或分解（在这些溶液被中和的过程中），从而使二氧化硅和氧化铝的浓度增大。这类粘土蚀变很可能是所报导的油田上放射性低或晕状异常产生的原因。粘土的分解或蚀变会把钾（包括 ^{40}K ）从粘土中释放出来。 ^{40}K 对土壤放射性的贡献是最主要的。其他放射性元素会在碳酸中和过程中从粘土晶格中活化出来。放射性异常的形态主要取决于这些放射性元素的活化程度。如果这些放射性元素从土壤中被搬运出来，便会在正常的背景读数中产生低读数异常。如果这些元素被搬运到油藏地表垂直投影的边缘，并在那里从溶液中沉淀出来，就会形成包围低值区的高值“环”。

三、国内的主要观点

50 年代末我国引入放射性找油方法。在当时历史条件下，主要是进行生产性实验，理论上多遵循国外的假说，没有形成自己的观点。当实际工作结果与理论产生矛盾而无法解释时，很多人对这种方法产生怀疑甚至否定，致使这项工作停止了数年。随着国外放射性找油方法的复兴，80 年代初我国物化探工作者又开始了此项工作的研究。

王载明等 (1987 年) 在总结前人各种观点的基础上提出自己的见解^[8]。认为铀是亲氧元素（又称亲石元素），在自然界不存在单质状态，在不同氧化还原条件下铀有两种价态，即正四价和正六价。在烃类物质富集的油气聚集层内，有机质是强的还原剂，铀呈四价为石油所萃取和螯合，形成稳定的有机金属络合物。由它衰变而来的 ^{226}Ra 是典型的碱土元素，即使在很负的还原电位条件下，也不能在石油中形成络合物，但能溶解于地下水并随之迁移到地表。在氧化带，镭（ ^{226}Ra ）是不活泼的，易生成难溶的硫酸盐或被粘土矿物和铁锰矿物吸附，常常沉积在土壤层中。铀在氧化环境中呈正六价，呈吸附状态赋存于表生带的岩石和矿物中。 UO_2^{2+} 很容易被各种吸附剂吸附，但当溶液中有一定数量 CO_3^{2-} 时便与之结合而形成带有与吸附剂同名（负）电荷的三碳酸合铀酰离子和二碳酸合铀酰离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 、 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ 时，就稳定地存在于地表水中，易被水搬运和淋漓而离开原地，这可能就是油田上方由于 U 元素稀少而反映较低的 ^{222}Rn 放射场的原因。关于高值边界，是由于盖层下储集岩顶层中矿化作用导致自行堵塞。这种自堵现象始于储层顶部中心部位，而后油气聚积本身起了阻挡 Ra 水体垂直向上运移的作用，随着油气聚积的不断扩

大，上移水流携带 ^{238}U 的子体 ^{226}Ra 向聚集边缘分溢，然后垂直向上运移至地表。 ^{226}Ra 在氧化带是不活泼的，形成氧化物和硫酸盐正好被固定在油田边界的多年变化着的潜水面土壤层中，当潜水面离地表在氡的有效扩散距离之内时，就可以用核地球物理仪器探测到 ^{222}Rn 的增高。

蒋永一等（1988年）讨论了核技术探测油气田机理^[9]。其要点为：第一，油气田上地化晕的形成主要与成岩过程中深部水的挤压排泄和载流有关。第二，铀镭在不同地化条件下富集情况不同。在油气田的碳氢化合物造成的还原环境下镭溶于水而迁移，在地表（氧化条件下）呈环状分布沉淀于油气藏边缘。铀在深部还原条件下，从水中转入石油。近地表氧化环境使沿宏观和微观裂隙上升的油气氧化成地沥青，强烈吸附铀，形成铀晕。第三，在油田上方上升的碳氢化合物氧化成 CO_2 与土壤作用生成 CaCO_3 壳盖，此壳盖进一步减低了油气正上方的流体渗透性。上述综合作用结果形成围绕油气田发育良好的镭、氡、铀、氦及烃类晕圈。第四，放射性元素从深部运移到地表的主要机制是渗滤和扩散，且以渗滤为主。另外水中的气体组分在地表附近会带一定量水从土壤逸失到大气中，这种蒸发作用进一步加强了深部往地表的渗滤及扩散运移作用。

吴慧山等（1991）对油气放射性勘查机理进行了讨论^[56]，认为：第一，国内外实践证实了油气藏顶部地表附近存在着有别于周围的放射性异常。第二，油水与气水界面放射性物质的来源是由于断裂或背斜构造对岩层的破坏，使溶解的放射性物质随同地下水从高压区流向低压区，造成镭等放射性核素含量的增高。背斜两翼张裂隙更为发育，含水性好，放射性物质含量也较高。第三，油水界面附近溶解大量烃类物质，使原来的还原环境得到加强。镭在还原条件下活泼，因而大量溶解于油水界面处，使该处镭含量明显增高。背斜顶部中间的镭也从油中向背斜两翼强还原介质的油水界面移动，因而油气层上部的镭含量明显低于两侧油水界面的镭含量。第四，油气藏中渗漏出来的烃类沿构造裂隙通过地下水携带放射性物质上升到地表并在氧化还原界面处沉淀。沉淀的镭衰变成氡，通过扩散、抽吸、对流、泵吸和水的搬运作用迁移到地表。油藏顶部放射性高低取决于潜水面高低和地表各放射性核素的综合贡献。

葛君伟、贾文懿（1992年）提出了气体运移假说^[10]。他们认为：放射性元素自身具有很强的垂直迁移能力，这种迁移是导致油气藏上方出现放射性异常的主要因素之一。

根据之一：铀系列中的气态元素 Rn 具有很强的运移能力，且其向上运移速度远远大于横向或向下运移速度，另外其他放射性核素（如 Rn 的长寿子体）也可能参与了运移。根据之二：地球化学研究表明，地气中存在包括 U 、 Ra 在内的十多种金属元素，这些元素可以随地气一起从地壳深部向地表迁移。瑞典科学家认为，金属元素以气体形式迁移可穿过几千米厚的盖层或水层。

由于 Rn 及其子体可以垂直运移相当长的距离，加上其他放射性元素（如 U 、 Ra 等）也可能以气体形式向上迁移，它们在油层或气层（重要是盖层）的屏蔽阻挡下，向油气层边缘集中，从而在油气层上方出现低值异常，边缘出现高值晕圈。

四、对各种观点的分析

上述各种假说是在不同阶段提出来，与当时人们的实践水平和认识水平有关。但各种假说都是从“油田放射性异常”这同一现象出发，因而有共同点。由于不同时期科技发展

总水平的限制和人们认识的局限性，使不同时期提出的假说又有很大差异。分析这些共同点和差异，可以使我们对放射性找油的基础理论有更深入的了解，抓住问题的关键所在，进而提出解决问题的新思路。

(一) 对深部成因说的分析

1. 认为放射性物质来源于深部，把油藏的存在与地表放射异常直接联系起来，对油田上方地表异常给予直观的解释。

2. 认为放射性物质的载体是深部上来的流体（液体或气体），流体在某种动力的作用下垂直迁移到地表，并将放射性物质带到地表。

3. 油气藏的存在对下面上来的流体起了屏蔽阻挡作用，使流体转向由油藏边缘上升，在地表形成周围有高值晕圈的低值异常。

以上三点是深部成因说所共同具有的特点，但在一些观点上相互差异却又很大，主要反映在如下几个方面：

1. 对放射性物质的具体来源各说不一，概括起来有两种看法：a，认为放射性物质来源于油层下部更深处（Langford），由下面流体带上来经油藏到地表形成异常；b，认为放射性物质来源于油层附近和上部地层，当深部上来的流体经过油藏附近时其化学性质发生变化，它在上升途中溶解放射性物质并将其带到地表形成异常（Lundberg）。

2. 在异常形成的时间上主要有两种观点：a，油藏形成的初期，异常就已经形成，后期的各种作用只会对异常起破坏作用（Pirson）；b，异常主要在油藏形成之后产生。

3. 在运移载体方面主要有两种观点：a，液体运移说，认为地下水溶解放射性物质将其带到地表；b，气体运移说，认为放射性元素以气体为载体（如甲烷气体）或以气态方式向上迁移到达地表。

除此之外，还存在着一些没有明确解释的问题：

1. 垂直运移的动因是什么？多数人没有讨论这个问题，即使有人涉及，也只简单提到温度、压力等因素，对压力大小和方向都没有具体分析，更没有令人信服的例证。

2. 众所周知在近地表的地下水活动带中，液体的流动是以水平方向为主，这对深部上来的流体有何影响。前人假说中也没有讨论这一问题。

3. 垂直运移的通道是什么？宏观的断层裂隙作为流体上移通道是人所共知的。但在无断层的泥页岩中，尤其是油气盖层，放射性元素是怎样通过的？对此也没有令人满意的回答。

4. 深部成因说认为地表放射性异常为低值，它对实际测量中存在的高值异常现象也无法解释。

(二) 对浅部成因说的分析

1. 以烃类运移到地表，改变地表的地球化学环境为基础，可以说明地表异常存在的原因。其中 Morse 的观点还可对地表高值异常的现象作出解释。

2. 由于不涉及放射性物质从深部向地表迁移的问题，因而避开对运移动力、通道等问题的讨论。各种浅部成因说的差异在于，Morse 强调地表土壤和沉积物捕获水溶性放射性物质能力的改变，而 Price 强调生物化学作用（细菌）的影响。

浅部成因说的致命弱点是不能解释地下放射性异常的存在。而我们从测井资料中得到的结果证明，油层上方地层中放射性异常是确实存在的。