

# 氦气的天然气地质意义

李广之, 高伟, 江浩, 庄原

(中国石化集团资产经营管理股份有限公司 合肥培训测试中心, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 氦气具有的不易液化、稳定性好、扩散性强等特点, 使它既能在天然气藏中富集, 又能垂向运移至地表。氦有大气氦、壳源氦和幔源氦3种来源。 $^3\text{He}$  主要来源于地幔;  $^4\text{He}$  主要来源于地壳, 通常以  $R/R_a$  来表示氦的来源。氦气具有丰富的天然气地质意义: 地表氦气浓度异常有一定油气指示意义; 氦气的同位素分布特征值 ( $R/R_a$ ) 还具有指示油气构造环境、指示断裂带及旁证  $\text{CO}_2$  气藏的成因等地质意义。

**关键词:** 氦气; 同位素特征; 天然气; 地质意义; 油气构造环境; 断裂带;  $\text{CO}_2$  气藏成因

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2009)02-0154-03

氦气是油气的伴生物, 与油气的生成没有直接联系, 但它特有的物理性质和化学性质促使它在油气藏中富集或独立成藏。测定对应层位样品的氦气及其同位素含量, 可以追踪下伏地层的含油气信息, 判别油气的构造环境, 指示断裂带及旁证  $\text{CO}_2$  气藏的成因。

## 1 氦的性质与来源

氦在通常情况下为无色、无味的气体; 25 个大气压下的熔点为  $-272.2\text{ }^\circ\text{C}$ , 沸点  $-268.9\text{ }^\circ\text{C}$ ; 密度  $0.1785\text{ g/L}$ , 临界温度  $-267.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 临界压力  $2.26$  大气压; 水中溶解度  $8.61\text{ cm}^3/\text{kg}$ 。氦由原子量为  $4.003$  的  $^4\text{He}$  和原子量为  $3.016$  的  $^3\text{He}$  这两种稳定的同位素组成, 它们的化学性质都不活泼, 一般不与任何元素化合。氦有大气氦、壳源氦和幔源氦3种来源。 $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  具有不同的成因:  $^3\text{He}$  主要为元素合成时形成的原始核素, 由氦的  $\beta$  蜕变生成, 主要来源于地幔;  $^4\text{He}$  则主要为放射性元素铀、钍  $\alpha$  衰变的产物, 主要来源于地壳。氦在土壤气及铀钍矿石中含量极低, 所以  $^3\text{He}$  在地球大气中含量极少, 因此我们通常所测到的氦都是  $^4\text{He}$ 。

$^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  成因的差异成为不同来源氦的判识标志。通常以  $R = w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$  来表示氦的来源,  $R$  值为  $1.4 \times 10^{-6}$ 、 $2 \times 10^{-8}$  和  $1.1 \times 10^{-5}$  时, 分别表示大气来源同位素特征值、壳源同位素特征值和幔源同位素特征值。也常用样品氦 ( $R$ ) 和大气氦 ( $R_a$ ) 的同位素比值来表示气样的氦同位素特征<sup>[1]</sup>, 即  $R/R_a = (w_{^3\text{He}}/w_{^4\text{He}})_{\text{样品}} / (1.4 \times 10^{-6})$ , 当  $R/R_a <$

1 时, 表示为壳源;  $R/R_a > 1$  时, 表示为幔源<sup>[1-2]</sup>。

## 2 地表氦气异常的示油气意义

油气田天然气中氦的含量分布范围<sup>[3]</sup>一般为  $3.7 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ 。国外(如美国)有的气田气中氦的最高量可达 8%, 但多数气田气的氦含量都在 1% 以下。徐永昌等(1990)提出氦含量大于 0.1% 即具有工业价值<sup>[4]</sup>。目前世界氦生产量的 94% 是从天然气中提取。油气藏中的  $^4\text{He}$  是由围岩中 U、Th 矿物衰变的子体, 在油气藏形成过程中从矿物晶格扩散到自由空间内积累起来的, 它与油气共生、共移、共聚、共散, 成为油气藏的组分之一。氦的扩散系数一般小于  $(3 \sim 5) \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ , 是一种在大多数物质中具有很强烈扩散性的惰性气体, 以致它同水、石油、天然气、大气一起参与远距离迁移和积累过程。气藏中的氦必然会向地表作垂向运移, 气藏源中较高浓度的氦含量就是氦进行垂向运移的物质基础, 浓度差和压力差是运移的主要动力和最重要的基础控制因素, 它决定着地表氦地化信息的强度和可利用性。油气藏盖层的封堵性决定着氦垂向运移路线和运移方式的选择, 继而决定了其运移量和地表异常的分布位置。在气藏上方, 当盖层封堵性很好时, 氦也像烃类一样, 主要以渗滤方式从油气藏的边部裂隙向上运移, 在地表表现为环带异常分布于油气藏周边; 当盖层封堵性较差时, 氦则以渗滤、扩散、微泡等多种方式直接从油气藏上方垂向运移至地表, 构成各种不规则块状异常。可见, 地表氦气含量异常具有一定的油气指示意义。

雅克拉凝析气田位于沙雅隆起的雅克拉断凸带上,它主要受控于背斜构造,是由多类型气藏组成的气田。目前,该区共完成6口探井(沙参2井、沙15井、沙4井、沙5井、沙6和沙7井,均获工业气流),发现了下白垩统、下侏罗统和古生界3个不同类型的气藏,及多层油气显示。图1为雅克拉凝析气田上方的土壤He气(<sup>3</sup>He和<sup>4</sup>He的总含量,以<sup>4</sup>He为主)异常图,He异常下限为 $3.14 \times 10^{-5}$ ,异常呈明显的环状分布,环内面积92km<sup>2</sup>,平均含量为 $1.26 \times 10^{-5}$ ,低于测区的平均值,6口探井均位于环状异常内,与雅克拉构造基本吻合。凝析气藏边部的气水过渡带是氦垂向微渗漏的较强部位,位于构造高部位的沙参2井和沙15井处于环状异常的低值区,即垂向微渗漏的较弱部位。

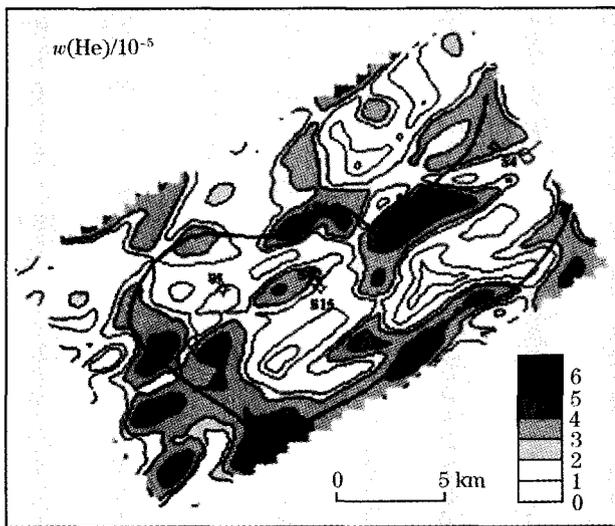


图1 雅克拉地区土壤He气异常

### 3 $R/R_0$ 的地质意义

#### 3.1 示油气构造环境意义

当天然气样品的  $R/R_0 < 1$  时,表示为壳源,没有幔源氦加入,断裂带较少或断裂没有深达地幔,构造环境活动性相对稳定;当天然气样品的  $R/R_0 > 1$  时,表示为幔源,有断裂带且断裂深达地幔,构造环境活动性强。同时,Manyrin 等<sup>[5]</sup>认为  $R$  值与大地热流值之间存在正相关关系,并提出二者之间的换算式,可见,  $R$  值大( $R/R_0$  值也大)也就意味着幔源提供的热能增大。地温和构造的稳定性是油气形成的重要因素,在一定条件下,就可用  $R/R_0$  的分布特征来判别油气的构造环境。

我国  $R/R_0$  值分布呈东部高、西部较高而中部低的特征<sup>[1]</sup>。东部  $R$  高值区( $R/R_0 > 1$ )的气样点群基本沿华夏裂谷系东侧的郯庐大断裂带展布,该断裂带以4~5条主干断裂为骨架<sup>[1]</sup>,深达地幔的超壳

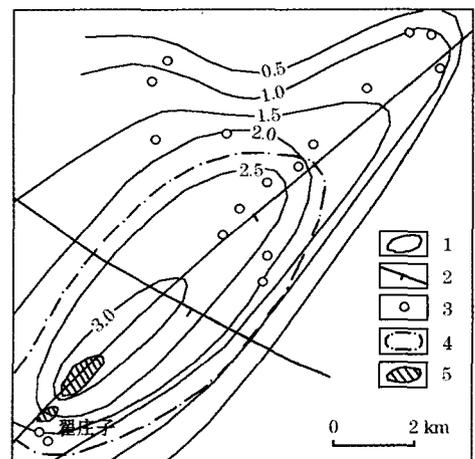
断裂带为幔源物质向地球壳层运移提供了通道,直接导致沿郯庐断裂带天然气中氦具高  $R/R_0$  值。该区沉积了以第三系为主的源岩,地热流值高,而有机质演化快,成油门限浅,天然气以油中溶解气为主,且多为断块油气藏,规模小而复杂,在海域高的地温场为第三纪煤系形成大型煤型气田提供了有力的热源因素,目前,已在我国东海、南海发现此种类型的大中型气田<sup>[6]</sup>。

天然气中氦的  $R$  低值区( $R/R_0 < 0.1$ )主要集中在中部。该区构造环境稳定,地温场很低,对于中新代气田的形成不是有利因素,但为古生代沉积有机质形成和保存天然气提供了有利因素,大地构造的稳定背景也有利于古生代气田的保存,我国以古生界为主的大气区、大气田,如四川气区和鄂尔多斯靖边大气田均分布在此区。

西部为  $R$  较高区( $0.1 < R/R_0 < 1$ )。该区构造环境较为稳定,地温场不高,天然气分布受控因素较为复杂。如:塔里木盆地源岩层系多、地温低、热演化进展相对慢,生成伴生气凝析气甚至高温裂解气;准噶尔吐鲁番—哈密盆地除伴生气外,形成以侏罗纪为源岩的煤型气;柴达木盆地因周边造山带快速抬升,第四系堆积快而厚度大,形成生物气藏<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 示断裂带意义

断裂带成为幔源挥发分向壳层运移的通道,使幔源氦在一定条件下储聚于油气藏中, $R/R_0 > 1$  的气样点群多数沿断裂带分布。例如,郯庐断裂带是深达地幔的超壳断裂带,为幔源物质向地球壳层运移提供了通道,导致了  $R/R_0 > 1$  的气样点群多数是沿断裂带分布<sup>[1]</sup>;又如,翟庄子气田位于黄骅拗陷港西潜山南坡,受港西断裂控制, $R/R_0$  值沿港西断裂向两侧渐低,且  $R/R_0 > 2.5$  的值集中在2条断裂



1— $R/R_0$  等值线;2—断裂;3—取样井;4—幔源CO<sub>2</sub>区;5—气区

图2 港西断裂与  $R/R_0$  关系

带的交汇处(图2),说明港西断裂是气源断层,为幔源成因气的上移通道<sup>[7]</sup>。反之,可根据  $R/R_a > 1$  的值的分布情况推断断裂带的相关信息。

### 3.3 旁证 CO<sub>2</sub> 气藏的成因

戴金星等<sup>[8]</sup>认为,当与 CO<sub>2</sub> 半生的氦同位素  $R/R_a > 1$  时,说明该部分 CO<sub>2</sub> 为地幔成因;孙明良<sup>[3]</sup>认为无机成因 CO<sub>2</sub> 气藏的分布与氦的  $R/R_a$  值高梯度异常带明显相关。我国东部发现的无机成因 CO<sub>2</sub> 气田(藏),与其伴生的氦同位素特征是  $R/R_a > 2.5$ ,这说明有来自幔源的 He 加入(表1),同时旁证了无

表1 我国无机成因 CO<sub>2</sub> 气藏中的  $R/R_a$  值

气田或气藏	井号	产层	$R/R_a$
万金塔	万2		4.91
	万5	K <sub>1</sub> q <sup>3</sup>	3.34
	万6		4.96
翟庄子	潜151	E <sub>s1</sub>	3.62
	滨4-6-6		2.76
平方王	平12-61	E <sub>s4</sub>	2.58
	平14-3		3.19
气田或气藏	井号	产层	$R/R_a$
花17	花17	E <sub>s2</sub>	3.18
	阳25	E <sub>s4</sub>	2.94
黄桥	黄验1	P <sub>1</sub> q	3.50
	苏174	D <sub>sw</sub>	3.96
丁庄垛	苏203	E <sub>2d</sub>	2.74
纪1	纪1	E <sub>1t</sub>	4.58
水深9	水深9	E <sub>1-2b</sub>	4.30

机成因 CO<sub>2</sub> 的气源<sup>[8]</sup>。特别是  $R/R_a > 2$  的地带为无机成因 CO<sub>2</sub> 的有利发育带<sup>[2]</sup>。同理,也可用  $R/R_a > 1$  作为辅助指标,来判别烷烃气的无机成因。

### 4 结论

氦气具有丰富的天然气地质意义:地表氦气浓度异常有一定油气指示意义;氦气的同位素分布特征( $R/R_a$ )值还具有指示油气构造环境、指示断裂带及旁证 CO<sub>2</sub> 气藏成因的地质意义。

### 参考文献:

- [1] 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. 地学前缘, 1997, (3-4).
- [2] 戴金星, 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. 石油学报, 2001, (6).
- [3] 孙明良. 氦同位素在天然气地质学上的作用[J]. 天然气地球科学, 1994, (5).
- [4] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 幔源氦的工业储集和郯庐大断裂带[J]. 科学通报, 1994, (8).
- [5] Manyrin B A, Tolstikhin I N. Helium isotopes in nature [M]. Elsevier, Amsterdam, 1984:175.
- [6] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布[J]. 科学通报, 1990, (12).
- [7] 李先奇, 戴金星. 中国东部二氧化碳气田(藏)地化特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 1997, (3).
- [8] 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等. 中国东部无机成因的 CO<sub>2</sub> 气藏及其特征[J]. 中国海上油气, 1994, (4).

## GEOLOGICAL IMPLICATIONS OF RADON GAS

LI Guang-zhi, GAO Wei, JIANG Hao, ZHUANG Yuan

(Hefei Training and Testing Center of Assets Management Ltd. of China Petrochemical Corporation, Hefei 230022, China)

**Abstract:** As radon gas has such physical-chemical characteristics as reluctance to liquidation, good stability and strong dispersion capacity, it can not only concentrate in the natural gas accumulation but also migrate vertically to the surface. Radon has three kinds of sources: atmospheric radon, crust-derived radon and mantle-derived radon. <sup>3</sup>He is derived mainly from the mantle, <sup>4</sup>He comes mainly from the crust, and  $R/R_a$  is commonly used to signify the source of radon. Radon gas has rich natural gas geological implications: the surface radon gas concentration has certain oil-gas indication significance, and the isotopic distribution characteristic value of radon gas  $R/R_a$  has such geological implications as the indication of the oil-gas structural environment and fault zone and the implication of the genesis of the CO<sub>2</sub> gas accumulation.

**Key words:** radon gas; isotopic characteristics; natural gas; geological significance; oil-gas structural environment; fault zone; genesis of the CO<sub>2</sub> gas accumulation

作者简介: 李广之(1970-),男,1994年毕业于安徽大学化学系,获学士学位,高级工程师。现主要从事地质实验分析工作。