

# 鄂尔多斯盆地含氦天然气地球化学特征与富集影响因素研究

刘隆隆

中石化华北油气分公司, 中国·河南 郑州 450000

**摘要:** 氦气是一种稀有的战略性资源, 在能源、医疗和航空航天等领域有着广泛的应用前景。鄂尔多斯盆地是我国重要的油气盆地, 近年来在天然气勘探过程中发现了大量的氦气资源, 具有很大的发展潜力。本文以该盆地含氦天然气为研究对象, 通过野外地质调查、样品采集测试和系统的室内数据分析, 综合分析氦气天然气的地质背景, 深入剖析氦气的地球化学特征和分布特征, 揭示氦气在盆地中的富集控制因素。结果表明: 盆地中的氦气主要成分是甲烷, 氦气的含量在 0.1%—2.3% 之间, 大部分都达到了工业开采的标准; 氦同位素比值  $^3\text{He}/^4\text{He}$  处于  $1.2 \times 10^{-8}$ — $5.6 \times 10^{-7}$  区间, 含氦天然气主要分布在盆地中部的靖边—安塞地区和东部的晋西褶皱带上, 受烃源岩演化、断层活动、储层物性和盖层封闭性等多因素的制约。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 含氦天然气; 地球化学特征

## Study on the Geochemical Characteristics and Enrichment Influencing Factors of Helium-bearing Natural Gas in the Ordos Basin

Liu Longlong

North China Oil and Gas Branch of Sinopec, China Henan Zhengzhou 450000

**Abstract:** Helium is a rare strategic resource with broad application prospects in energy, medical and aerospace fields. The Ordos Basin is an important oil and gas basin in China. In recent years, a large amount of helium resources have been discovered during the exploration of natural gas in this basin, showing great development potential. This paper takes the helium-bearing natural gas in this basin as the research object. Through field geological investigation, sample collection and testing, and systematic indoor data analysis, the geological background of helium-bearing natural gas is comprehensively analyzed, the geochemical characteristics and distribution characteristics of helium are deeply analyzed, and the controlling factors of helium enrichment in the basin are revealed. The results show that the main component of helium in the basin is methane, and the helium content is between 0.1% and 2.3%, most of which have reached the industrial exploitation standard. The helium isotope ratio  $^3\text{He}/^4\text{He}$  is in the range of  $1.2 \times 10^{-8}$  to  $5.6 \times 10^{-7}$ . The helium-bearing natural gas is mainly distributed in the Jingbian-Anxian area in the middle of the basin and the Jinxizheng fold belt in the east, and is restricted by multiple factors such as the evolution of source rocks, fault activities, reservoir properties and cap sealing.

**Keywords:** Ordos basin; Helium-bearing natural gas; Geochemical characteristics

## 0 引言

目前, 对鄂尔多斯盆地氦气的研究多集中在个别区块或局部特征分析, 缺乏对盆地尺度上氦气的系统研究, 对氦气的成因机理、富集规律和主控因素还没有形成共识。目前已有研究仅把氦富集简单地归结为断层输导作用, 而忽视了生储盖要素的协同作用; 在地球化学特征分析方面, 由于同位素数据的积累不足, 导致对其成因类型的判断存在较大的争议。因此, 本文以盆地内含氦天然气为研究对象, 通过对该盆地中氦气的地球化学性质和分布特征的系统研究, 揭示氦气在该盆地中的富集规律, 为该地区氦气

的勘探部署提供科学依据。

## 1 含氦天然气地质背景

鄂尔多斯盆地是克拉通内拗陷盆地, 经历了基底形成、克拉通稳定发育、构造活化—改造三个阶段, 形成了“基底、古生界海相、中生界陆相”三层结构模型, 为含氦天然气的形成和富集奠定了坚实的地质基础。

盆地底部为太古代—古元古代变质岩系, 主要由片麻岩、片岩和花岗片麻岩组成。由于基底岩石长期的变质和构造活动, 使得铀、钍等放射性元素在盆地中富集, 并以  $\alpha$  衰变的方式不断产生氦气, 是盆地中氦资源的重要来

源。基底顶部平缓，上覆寒武系 - 奥陶系海相碳酸盐岩，石炭系 - 二叠系海陆相间的碎屑岩和中生界的陆相碎屑岩，总厚度在 5000-8000m 之间，发育有多套烃源岩和盖层组合。

在烃源岩发育方面，该区主要发育三套烃源岩，第一套是奥陶系马家沟组碳酸盐岩，其有机碳含量为 0.5%-2.3%，处于高熟 - 过熟演化阶段，主要产气；第二套地层为石炭系 - 二叠系太原组和山西组，其有机碳含量在 10-35% 之间，是该盆地的主要烃源岩；同时，在煤系地层中富集放射性元素，形成一定的氦气；三叠系长 7 油层暗色泥页岩是中生界天然气的主要来源。多套烃源岩叠置，不仅为含氦气提供了烃源载体，而且还与基底共同演化。

在构造演化上，盆地经历了加里东运动，海西运动，印支运动和燕山运动，形成了相对稳定的构造运动。加里东运动使盆地整体抬升，在奥陶纪顶部形成大面积剥蚀面，为后期油气运移和聚集创造了有利条件；海西运动促进了盆地的沉降，使石炭系 - 二叠纪的沉积作用为煤系烃源岩的形成打下了良好的基础；在印支、燕山运动作用下，盆地发生局部构造变形，形成东晋西褶皱带和西天环凹陷等构造单元，断裂构造较为集中，是氦气由深部基底向浅部运移的重要通道。

储盖发育方面，含氦天然气主要赋存在奥陶系马家沟组碳酸盐岩、石炭纪本溪组铝质泥岩、二叠系山西组砂岩和三叠系延长组砂岩，这些都是含氦天然气的主要储藏地。二叠系山西组石英砂岩储层具有较好的物性，平均孔隙度在 8~15% 左右，渗透率在 0.1~10mD 左右，是主要的含氦储集体；盖层厚度为 50~200m，主要为石炭系 - 二叠系泥页岩和三叠系延长组页岩，具有较好的封盖能力，能有效地阻止氦气向上逸出。

## 2 含氦天然气地球化学特征

### 2.1 组分特征

鄂尔多斯盆地含氦天然气具有典型的烃气和非烃气混合体系，组分主要为甲烷 (CH<sub>4</sub>)，并伴有氦气、氮气和二氧化碳等非烃气，其组分含量存在明显的区域性差异 (表 1)。

苏里格地区的甲烷含量最高，达到 88%—92%；大牛地气田具有 82%—88% 的甲烷含量，比苏里格地区稍低，

但比晋西褶皱带高，与气田石炭系 - 二叠系煤源岩的成熟度 (R<sub>o</sub>=1.2%-1.6%) 相吻合，处于高成熟气阶段。靖边 - 安塞地区的甲烷含量在 78—85% 之间；晋西褶皱带由于烃源岩成熟度低、产气能力差，甲烷含量普遍偏低 (75-80%)。

氦气含量是评价天然气中氦气含量的一个重要指标。实验数据表明，盆地中氦含量在 0.1%—2.3% 之间。氦气含量在靖边 - 安塞地区最高，平均为 1.2%；靖边气田 J89 井等区块氦气含量为 2.3%，远远超过工业生产标准 (0.1%)；大牛地气田氦气含量表现出明显的“断裂控富”特征，氦气在吴堡 - 清涧断裂分支带中的含量在 1.2%—1.8% 之间，如大 189 井的氦气含量高达 1.6%，远远高于行业标准；气田内远断层带氦气含量下降至 0.6%—0.9%，呈现出明显的梯度变化，氦气总体平均含量为 1.1%，仅次于靖边 - 安塞地区；晋西褶皱带中氦含量在 0.5%—1.1% 之间，平均为 0.8%；在苏里格地区，氦气含量很低，只有 0.1%~0.6%，只有部分地区达到了行业标准。

非烃气中氮的含量为 2%，二氧化碳的含量为 0.5%。大气中氮的来源主要是地壳岩石风化和有机质分解，而 CO<sub>2</sub> 的来源主要是碳酸盐热解和岩浆作用。晋西地区由于构造活动强烈，CO<sub>2</sub> 浓度略高于其它地区；与靖边 - 安塞地区相比，大牛地气田氦气含量为 3%~7%，CO<sub>2</sub> 含量为 1%~2.5%，说明该区构造活动强度中等，没有大规模的碳酸岩热裂解或岩浆活动。

### 2.2 同位素特征

天然气同位素组成是判别成因类型的有效手段，氦同位素 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值更是区分壳源氦与幔源氦的核心指标。学界普遍认为，幔源氦 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值较高，通常大于 1 × 10<sup>-6</sup>；壳源氦主要来源于地壳岩石中铀、钍衰变，<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值较低，多处于 1 × 10<sup>-8</sup>—1 × 10<sup>-7</sup> 区间。

本次测试的 28 个含氦天然气样品中，氦同位素 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值介于 1.2 × 10<sup>-8</sup>—5.6 × 10<sup>-7</sup>，平均值为 1.8 × 10<sup>-7</sup>，均远低于幔源氦临界值，明确指示盆地氦气以壳源成因为主。不同区域氦同位素比值存在一定差异，靖边 - 安塞地区 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值 1.5 × 10<sup>-7</sup>—5.6 × 10<sup>-7</sup>，平均值 3.2 × 10<sup>-7</sup>，略高于其他区域；苏里格地区 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值 1.2 × 10<sup>-8</sup>—8.5 × 10<sup>-7</sup>，平均值 4.8 × 10<sup>-7</sup>；晋西挠褶带

表1 鄂尔多斯盆地不同区域含氦天然气组分含量 (%)

区域	甲烷 (CH <sub>4</sub> )	氦气 (He)	氮气 (N <sub>2</sub> )	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	其他
靖边-安塞	78-85	0.8-2.3	3-6	1-3	1-2
苏里格	88-92	0.1-0.6	2-4	0.5-1.5	1-2
晋西挠褶带	75-80	0.5-1.1	4-8	1.5-3	1-3
大牛地气田	82-88	0.6-1.8	3-7	1-2.5	1-2

$^3\text{He}/^4\text{He}$  比值  $8.2 \times 10^{-8} - 2.1 \times 10^{-7}$ , 平均值  $1.5 \times 10^{-7}$ 。这种差异与氦气运移距离相关, 靖边 - 安塞地区邻近基底氦源区, 氦气未经长距离运移, 同位素组成保留原始特征; 苏里格地区氦气需经长距离运移到达储层, 过程中轻同位素  $^3\text{He}$  易流失, 导致比值降低。

甲烷同位素  $\delta^{13}\text{C}_1$  值可反映烃类气成因类型与成熟度。盆地含氦天然气中甲烷  $\delta^{13}\text{C}_1$  值介于  $-35\% - 28\%$ , 靖边 - 安塞地区  $\delta^{13}\text{C}_1$  值  $-30\% - 28\%$ , 苏里格地区  $-32\% - 29\%$ , 晋西挠褶带  $-35\% - 31\%$ 。整体而言, 甲烷  $\delta^{13}\text{C}_1$  值偏正, 指示天然气处于高成熟演化阶段, 与石炭系 - 二叠系煤系烃源岩高成熟特征相符, 进一步印证含氦天然气中烃类组分主要来源于煤系地层热解。

### 3 含氦天然气分布特征及影响因素

#### 3.1 含氦天然气分布特征

靖边 - 安塞富集区位于盆地中部的伊陕斜坡带, 面积约为  $5 \times 10^4 \text{km}^2$ , 是盆地内重要的天然气产地。含氦天然气主要产于二叠系山西组砂岩和奥陶家沟组中, 氦气含量一般在  $0.8\% - 2.3\%$  之间, 呈 NE 向带状分布, 与区域断裂走向一致。在垂向上, 氦气存在多种储藏储集体, 二叠系山西组次之, 奥陶系马家沟组次之, 三叠系延长组次之。

晋西褶皱带东部富集区位于盆地东部, 主要发育一系列北北东向褶皱和断层, 面积约  $3 \times 10^4 \text{km}^2$ , 是盆地东部重要的构造单元。富氦区主要产于石炭纪本溪组和二叠系山西组, 氦气含量在  $0.5\% - 1.1\%$  之间, 富集区与褶皱构造核部和断裂带附近的富集区一致。由于构造活动的影响, 该区的储层物理性质差异很大, 含氦气分布不均匀, 部分地区可能形成高丰度的气藏。

天环西部拗陷的潜在富集区位于盆地的西部, 是盆地沉降的中心, 具有厚度大、烃源岩发育完整的特点。目前, 该区勘探程度不高, 只有几个钻井找到了氦含量  $0.3\% - 0.8\%$  的含氦气线索, 虽然还没有达到很高的富集度, 但是结合其良好的烃源岩条件和储盖组合, 完全有可能形成大型含氦气藏, 这也是今后的重点勘探方向。

大牛地气田氦气分布具有“断层控带、储层控体、相带控富”的“三控”特征。断层控带: 天然气富集区以北东东向断裂带为特征, 以吴堡 - 清涧断裂为“主通道”, 以次级断裂为“分支通道”, 形成“叶脉状”富集区。储层控体: 二叠系山西组山二段含氦天然气以其较高的孔隙度 ( $10\% - 15\%$ ) 和较好的渗透率 ( $1 - 10 \text{ mD}$ ) 为主要的储集体, 氦气的充注度达  $60\% - 80\%$ ; 由于储层物性较差, 含氦天然气充注率仅为  $30 - 50\%$ , 只在裂缝发育的区段有

富集作用。相带控富: 山西组山二段三角洲平原分流河道砂体厚度大 ( $15 - 25 \text{ m}$ )、分选好, 为氦气提供了良好的储集空间, 是氦气富集的最佳相区。

#### 3.2 含氦天然气分布影响因素

鄂尔多斯盆地含氦天然气富集受源岩、构造、储层盖层等多因素影响, 各因素对氦气的形成、运移、富集和保存等过程起着重要的控制作用。

烃源岩和氦源岩的供给能力是形成氦气天然气的物质基础; 盆地中的石炭系 - 二叠系煤系烃源岩既能产生大量的甲烷, 又能为含氦量的天然气提供烃类载体, 同时富含放射性元素如铀、钍, 经  $\alpha$  衰变产生氦气, 是重要的氦源。深部基底变质岩为壳源氦的主要来源, 基底隆起区岩石风化强烈、放射性元素衰变活跃。靖边 - 安塞地区具有煤源岩和基底氦源的双重供应优势, 且氦气资源丰富, 可为其富集提供物质保证。

断裂构造在氦气从深部源区向浅部储层输送过程中起着重要的疏导作用。鄂尔多斯盆地中部地区靖边 - 安塞地区和东部晋西地区的挠褶带发育有大量的断层, 这些断层相互交错, 构成了一张纵横交错的断层网。这些断裂既将氦源从深部基底连通到浅层油气藏, 又能在构造活动期形成裂缝, 改善储层渗透性, 促进氦、烃混合运移。靖边气田 J89 井位于北东向主断层旁边, 氦气含量仅为  $2.3\%$ , 远断层处氦气含量一般小于  $0.5\%$ , 这充分说明了断裂构造控制了氦气的富集。

储集体的物性直接决定了含氦气的可藏性, 而孔隙度和渗透率是评价含氦气的主要指标。二叠系山西组砂岩是盆地主要的储气层, 孔隙度在  $8 - 15\%$  之间, 渗透率在  $0.1 - 10 \text{ mD}$  之间, 属中、低渗透率。而在靠近断层带的地区, 由于构造活动的影响, 储层裂缝发育, 渗透率可以提高到  $10 - 50 \text{ mD}$ , 大大提高了储层的储量。靖边 - 安塞山西组砂岩储集体, 由于与断裂带相邻, 物性优越, 单位面积储量是其它地区的  $2 - 3$  倍, 成为含氦天然气富集的重要载体。

盖层封闭性是含氦天然气能否保存的重要条件, 直接影响到气藏的散失。鄂尔多斯盆地以石炭系 - 二叠系泥岩和三叠系延长组为主, 泥质含量达  $80\%$  以上, 具有较好的封盖能力。在孔隙压力和毛细管力的共同作用下, 这些盖层有效地阻止了含氦气的向上逃逸。在靖边 - 安塞富集区, 盖层厚度稳定, 具有良好的封闭性; 在晋西地区, 由于构造活动造成盖层破裂, 封闭能力下降, 部分含氦量天然气散失, 氦气含量较低。

构造演化序列匹配是保证含氦天然气富集的一个重要条件。盆地中氦的形成是持续的, 烃气的形成时间主要在中、新生代。在此期间, 盆地的构造活动较为稳定, 断裂带处于“开启、半开启”的状态, 有利于氦气向深部油气运移, 并与烃类气体混合生成氦气。晚新生代以来, 盆地的构造活动逐渐减弱, 断裂带的闭合, 盖层的封闭性提高, 使得含氦气的天然气在储层中得到了有效的保存, 形成了稳定的气藏。这一“氦持续产生、晚期烃气形成、构造适时疏导、盖层有效保存”是盆地氦气富集的重要地质条件。

#### 4 结语

综上所述, 本文以鄂尔多斯盆地含氦天然气为研究对象, 查明其形成的地质背景、地球化学特征、分布规律以及影响其富集的因素。

盆地具有良好的氦气地质背景, 基底变质岩为其提供了丰富的壳源氦; 石炭系-二叠系煤系烃源岩为其提供了烃类载体和部分氦源; 多种储、盖组合和断层构造为氦气的运移和聚集创造了有利条件。氦气天然气具有明显的地球化学特征, 主要成分为甲烷(75-92%), 氦气含量在0.1%-2.3%之间, 氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 $1.2 \times 10^{-8}$ - $5.6 \times 10^{-7}$ , 指示壳源成因; 甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值-35‰-28‰, 反映了高成熟煤成气的特点。含氦天然气具有“分区富集-带状分布”的特点, 中部靖边-安塞是其核心富集区, 东部的晋西褶皱带是次富集区, 西部的天环凹陷是潜在的富

集区; 烃源岩和氦源岩的供给、断裂构造运移、储层物性承载、盖层封闭性保存和构造演化时序匹配等多种因素的协同作用, 制约了富集量的形成。

#### 参考文献:

[1] 闫小雄, 张辉, 王彦卿等. 鄂尔多斯盆地本溪组煤系地层不同类型天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2025,36(09):1718-1727.

[2] 张雯, 刘文汇, 王晓锋等. 鄂尔多斯盆地上古生界灰岩层系天然气地球化学特征及其来源[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第19届学术年会论文摘要集. 西北大学地质学系; 陕西科技大学化学与化工学院; 西安科技大学安全科学与工程, 2025:149.

[3] 张雪, 刘成林, 范立勇等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田含氦天然气地球化学特征与富集模式[J/OL]. 天然气地球科学, 1-23[2025-12-11].

[4] 范立勇, 魏建设, 胡爱平等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田含氦天然气地球化学特征、氦气成因来源及成藏主控因素[J]. 天然气地球科学, 2025,36(03):399-412.

[5] 刘成林, 丁振刚, 范立勇等. 鄂尔多斯盆地含氦天然气地球化学特征与富集影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2024,45(02):384-392.

作者简介: 刘隆隆(1989.11-), 男, 汉族, 河南郑州, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 石油与天然气地质。