

鄂尔多斯盆地含氦天然气地球化学特征与富集影响因素

刘成林^{1,2}, 丁振刚^{1,2}, 范立勇³, 康锐³, 洪思婕^{1,2}, 朱玉新⁴, 陈践发^{1,2}, 王海东^{1,2}, 许诺⁵

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油 长庆油气田公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油 油气和新能源分公司, 北京 100007; 5. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206]

摘要: 鄂尔多斯盆地天然气资源丰富, 部分地区天然气中的氦气含量较高, 亟需深入研究含氦天然气地球化学特征与富集影响因素。通过采集天然气样品并进行组分和同位素等实验分析测试, 结合地质条件, 研究了鄂尔多斯盆地含氦天然气的分布、地球化学特征和影响因素, 研究结果表明: ①鄂尔多斯盆地天然气主要为烃类气体, 氦气含量为 0.016%~0.487%, 平均值为 0.060%; ②鄂尔多斯盆地含氦天然气甲烷碳同位素值分布在 -53.88‰~-29.23‰, 甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素表明烃类气为有机成因; ③鄂尔多斯盆地含氦天然气³He/⁴He含量比值为 20.10×10⁻⁹~120.00×10⁻⁹, 平均值为 42.00×10⁻⁹, R/R_a 值为 0.014~0.085, 平均值为 0.030, 为壳源氦的特征, 不受天然气成因类型和成熟度等因素影响; ④氦气含量较高的天然气主要分布在鄂尔多斯盆地北部东胜气田、西南部庆阳气田和东南部黄龙气田的上古生界石炭系-二叠系, 其分布与古今构造位置、基底断裂、生氦强度及生烃强度相对强弱等因素密切相关。根据含氦天然气地球化学特征评价出富氦-中氦区、低氦区及贫氦区。

关键词: 地球化学; 氦源岩; 氦气; 天然气; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin

LIU Chenglin^{1,2}, DING Zhengang^{1,2}, FAN Liyong³, KANG Rui³, HONG Sijie^{1,2}, ZHU Yuxin⁴, CHEN Jianfa^{1,2}, WANG Haidong^{1,2}, XU Nuo⁵

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company Ltd., PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Oil, Gas & New Energies Company, PetroChina, Beijing 100007, China; 5. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China]

Abstract: The Ordos Basin is renowned for its rich natural gas resources, which exhibit a high helium content in some areas. Therefore, there is an urgent need to thoroughly investigate the geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas. Based on the experiments, analysis, and tests of the compositions and isotopes of natural gas samples, along with geological conditions, we examine the distribution, geochemical characteristics, and controlling factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin. Key findings are as follows: (1) The natural gas in the basin is dominated by hydrocarbon gases, with a helium content ranging from 0.016% to 0.487% (average: 0.060%); (2) The carbon isotope values of methane in the helium-bearing natural gas within the basin range from -53.88‰ to -29.23‰, and those of methane, ethane, propane, and butane indicate an organic origin of the hydrocarbon gases; (3) The helium-bearing natural gas in the Ordos Basin exhibits ³He/⁴He ratios ranging from 20.10×10⁻⁹ to 120.00×10⁻⁹, with an average of 42.00×10⁻⁹, and R/R_a ratios varying between 0.014 and 0.085, with an average of 0.030. These ratios represent crust-derived helium characteristics, which are unaffected by the genetic type and maturity of natural

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-03-14。

第一作者简介: 刘成林(1970—), 男, 博士、教授、博士生导师, 油气成藏与资源评价。E-mail: liucl@cup.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA071900)。

gas; (4) The natural gas with a high helium content is primarily distributed in the Carboniferous-Permian strata of the Upper Paleozoic of Dongsheng gas field (north of the basin), Qingyang gas field (southwest of the basin) and Huanglong gas field (southeast of the basin). This distribution is closely associated with factors like ancient and modern tectonic locations, basement faults, and the intensities of helium and hydrocarbon generation. Based on the geochemical characteristics of helium-bearing natural gas, we identify helium-rich-to-moderate, low-helium, and helium-deficient areas in the Ordos Basin.

Key words: geochemistry, helium source rock, helium, natural gas, Ordos Basin

引用格式: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(2): 384–392. DOI: 10. 11743/ogg20240206.

LIU Chenglin, DING Zhengang, FAN Liyong, et al. Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 384–392. DOI: 10. 11743/ogg20240206.

氦气的重要性与中国氦气储量少、产量低之间的矛盾使得氦气资源的发现变得更加迫切。将烃类气或非烃气中氦气含量达到0.01%及以上的天然气的称为含氦天然气,并进一步划分为贫氦(0.01%~0.03%)、低氦(0.03%~0.10%)、中氦(0.10%~0.30%)和富氦($\geq 0.30\%$)4种资源(据“十四五”全国油气资源评价,2023)。由于对氦气资源的成藏条件、主控因素和成藏机制还未形成较为成熟的认识,现有的油气勘探理论和资源分布预测技术不适用于富氦天然气的勘探与分布预测,已探明的氦气资源大多是在进行油气勘探过程中偶然发现的^[1-6]。沉积盆地中天然气藏的氦气含量与大地构造背景、基底岩石和上覆沉积盖层的时代、运移-聚集、封盖条件和动态富集过程具有密切的关系^[7-15]。

通过对不同地区天然气中氦气含量进行分析,发现鄂尔多斯盆地氦气含量较高的天然气主要分布在东胜和大牛地等气田下二叠统下石盒子组和山西组致密砂岩储层,以及渭河地区新生界,以水溶气相态赋存^[16-23]。学者们开展了对上述地区含氦天然气烃类组分、碳同位素和稀有气体同位素分析^[24-27],而全盆地含氦天然气地球化学特征和影响因素需要进一步研究。通过对不同含氦丰度天然气藏的系统解剖,综合地球化学资料判识天然气藏中氦气的成因和来源及伴生的天然气成因和来源,结合古构造位置、基底断裂发育情况、氦源岩、烃源岩、保存条件和现今构造位置等综合分析氦气分布的主要控制因素。

1 含氦天然气地质背景

鄂尔多斯盆地地处中国东、西部构造区域的多期、反复交替拉张和挤压作用相互影响的结合区,为活动的褶皱山系和地堑系所环绕,盆地内部构造平缓,沉降

稳定且断裂较少,可划分为伊盟隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、渭北隆起、天环坳陷和西缘逆冲带6个一级构造单元^[28-30]。

盆地潜在氦源岩包括基底岩系和沉积岩系,主要是太古宇-古元古界富含铀(U)和钍(Th)元素的花岗岩和花岗片麻岩、中元古界长城系沉积变质岩、下古生界泥质含量较高的碳酸盐岩,以及上古生界的泥岩、煤和铝土岩,具有“多源供氦”特征,生氦强度较大^[31]。盆地下古生界马家沟组发育海相石灰岩和白云岩,上古生界本溪组、太原组、山西组、石盒子组和石千峰组发育海-陆过渡相和陆相的砂岩及石灰岩,赋存有丰富的天然气资源,也为氦气聚集奠定了载体气条件。通达基底氦源岩和古生界储层的断裂和裂缝是氦气释放和运移的输导系统^[26]。盆地中二叠世晚期上石盒子期湖泊扩展,冲积体系萎缩,形成了一套厚度大、分布稳定、封盖能力强的滨浅湖相沉积,泥岩累计厚度达70~120 m,占上石盒子组厚度的80%以上,成为含氦天然气理想的区域盖层^[32]。

鄂尔多斯盆地在垂向上形成了富铀、钍和钾的基底、沉积岩系为氦源岩、下古生界石灰岩和白云岩及上古生界致密砂岩和石灰岩为储层、上古生界泥岩为盖层的生-储-盖组合,不同地区生-储-盖组合方式有变化(图1)。

2 含氦天然气地球化学特征

在现有资料基础上,结合目前已发现的含氦天然气藏,统一选择双阀高压钢瓶来采集天然气样品,严格避免空气污染和样品渗漏。利用色谱和质谱技术分别系统分析天然气的烃类组分含量、非烃气体(N_2 、 CO_2 等)和稀有气体氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)等组分含量,明确含氦天然气藏的分布特征。进而选择有代表性的

和非烃气(不包括氦气)含量较低(表1)。图2交汇图显示,鄂尔多斯盆地天然气氦气含量与甲烷含量、重烃含量、干燥系数和非烃气含量不具有相关性。

2.2 同位素特征

天然气甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素指示了鄂尔多斯盆地烃类气的有机成因特征,而油型气与煤成气的乙烷碳同位素界限值在 -27.50% [24]。根据统计的51个天然气测试分析数据,鄂尔多斯盆地含氦天然气甲烷碳同位素值分布在 -53.88% ~ -29.23% ,平均为 -38.00% ,其中油型气分布在 -53.88% ~ -31.93% ,平均为 -43.79% ;煤型气分布在 -38.47% ~ -29.23% ,平均为 -33.89% 。盆地含氦天然气乙烷

碳同位素值分布在 -39.80% ~ -22.13% ,平均为 -29.58% ,其中油型气分布在 -39.80% ~ -27.57% ,平均为 -35.45% ;煤型气甲烷碳同位素值分布在 -27.09% ~ -22.13% ,平均为 -24.96% 。盆地含氦天然气丙烷碳同位素值分布在 -35.00% ~ -21.60% ,平均为 -27.29% ,其中油型气分布在 -35.00% ~ -26.00% ,平均为 -31.35% ;煤型气分布在 -26.37% ~ -21.60% ,平均为 -24.10% 。丁烷碳同位素值分布在 -33.47% ~ -20.67% ,平均为 -26.68% ,其中油型气分布在 -33.47% ~ -22.87% ,平均为 -31.01% ;煤型气分布在 -24.40% ~ -20.67% ,平均为 -23.10% 。

鄂尔多斯盆地含氦天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 含量比值为 20.00×10^{-9} ~ 120.00×10^{-9} ,平均为 42.00×10^{-9} , R/R_a 值

表1 鄂尔多斯盆地含氦天然气组分特征

Table 1 Compositions of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin

层系	甲烷含量/%	重烃含量/%	非烃气(不包括氦气) 含量/%	干燥系数	氦气含量/%
张夏组	97.84~98.36/98.15(4)	1.62~2.14/1.84(4)	0~0.51/0.13(4)	0.979~0.984/0.982(4)	0.014~0.155/0.148(4)
马家沟组	76.48~99.83/93.66(80)	0.01~9.60/3.84(80)	0~2.89/0.77(80)	0.900~0.990/0.960(78)	0.016~0.089/0.042(80)
本溪组- 下石盒子组	62.96~99.97/93.15(793)	0.01~16.45/4.60(793)	0~8.67/0.82(793)	0.840~0.990/0.950(789)	0.017~0.487/0.060(793)
全盆地	62.96~99.97/93.22(877)	0.01~16.45/4.52(877)	0~8.67/0.82(877)	0.840~0.990/0.950(871)	0.016~0.487/0.060(877)

注:表中数值为最小值~最大值/平均值(样本数)。

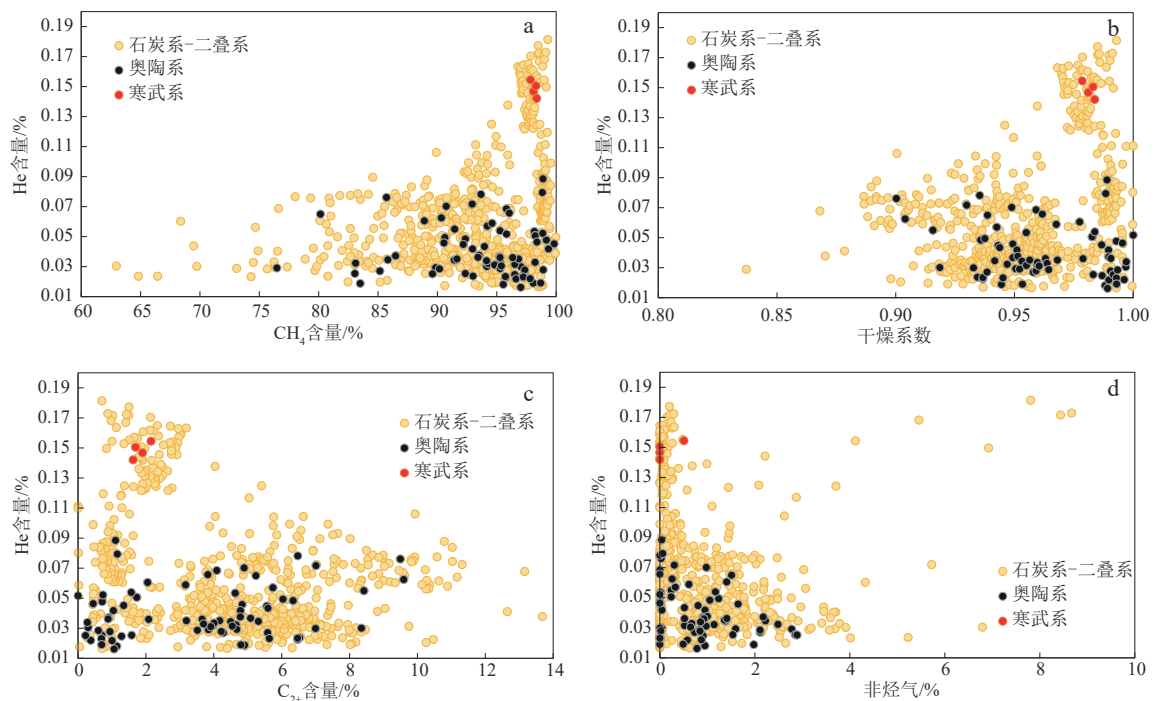
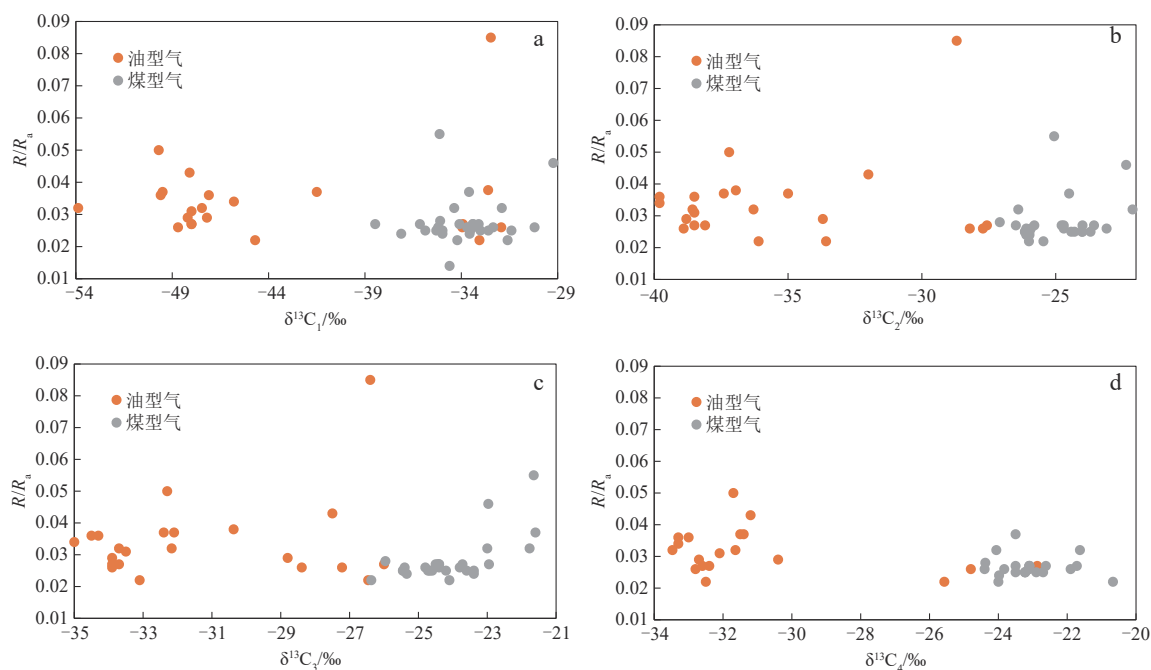


图2 鄂尔多斯盆地含氦天然气地化参数与氦气含量交汇图

Fig. 2 Cross plots between the geochemical parameters and helium content of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin

a. 甲烷含量与氦气含量交汇图; b. 干燥系数与氦气含量交汇图; c. 重烃含量与氦气含量交汇图; d. 非烃气含量与氦气含量交汇图

图3 鄂尔多斯盆地含氦天然气碳同位素值与 R/R_a 值交汇图Fig. 3 Cross plots between the carbon isotope values and R/R_a ratio of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin

a. 甲烷碳同位素值与 R/R_a 值交汇图; b. 乙烷碳同位素值与 R/R_a 值交汇图; c. 丙烷碳同位素值与 R/R_a 值交汇图; d. 丁烷碳同位素值与 R/R_a 值交汇图

为0.014~0.085,平均为0.030,呈现壳源氦的特征,与盆地克拉通稳定构造背景吻合。随天然气甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素值的增大,天然气 R/R_a 值保持稳定,说明鄂尔多斯盆地的壳源氦不受天然气成因类型和成熟度等因素影响,也不受天然气产状、原生性与后生改造的影响^[24](图3)。

根据天然气稀有气体氦、氩和氙(Xe)同位素特征,可以进一步判断不同沉积层的氦源贡献。以鄂尔多斯盆地靖边气田下奥陶统马家沟组五段为例,随 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 含量比值由487增加到1509,天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 含量比值稳定在 $36.00\times 10^{-9} \sim 50.00\times 10^{-9}$,反映天然气类型为典型的壳源天然气。鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩中的U和Th元素含量远小于上古生界煤系源岩,在 $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ 含量比值相同时,来自煤系源岩的天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 含量比值明显低于碳酸盐岩^[33]。根据含氦天然气氩同位素与氙同位素交汇图,判断出上古生界煤系源岩中铀和钍衰变对靖边气田东北部天然气的氦含量贡献较大,而对西南部贡献较小(图4)。

3 含氦天然气分布特征及其影响因素

3.1 含氦天然气分布特征

根据877个气样测试结果的统计分析,鄂尔多斯盆

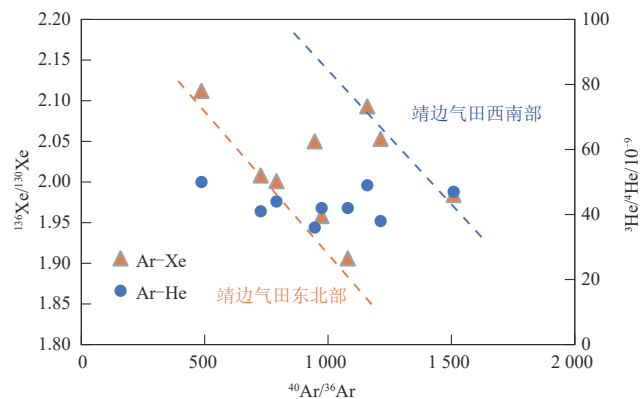


图4 鄂尔多斯盆地靖边气田含氦天然气氩同位素含量比值与氙、氦同位素含量比值交汇图

Fig. 4 Cross plot between isotope values of argon, xenon, and helium of helium-bearing natural gas in the Jingbian gas field, Ordos Basin

地含氦气田的产气层主要为上古生界石炭系—二叠系。其中东胜气田氦气含量为0.045%~0.487%,平均值为0.130%;苏里格气田氦气主要位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡,其中东区氦气含量为0.024%~0.067%,平均值为0.040%,中区氦气含量为0.032%~0.084%,平均值为0.060%,西区氦气含量为0.024%~0.164%,平均值为0.100%,南区氦气含量为0.026%~0.270%,平均值为0.110%;榆林气田氦气含量为0.017%~0.040%,平均值为0.030%;神木气田氦气含量为

0.012 ~ 0.045 %, 平均为 0.030 %; 子洲-米脂气田氦气含量为 0.017 % ~ 0.062 %, 平均值为 0.040 %; 黄龙

气田氦气含量为 0.015 % ~ 0.276 %, 平均值为 0.230 %; 庆阳气田氦气含量为 0.048 % ~ 0.126 %, 平

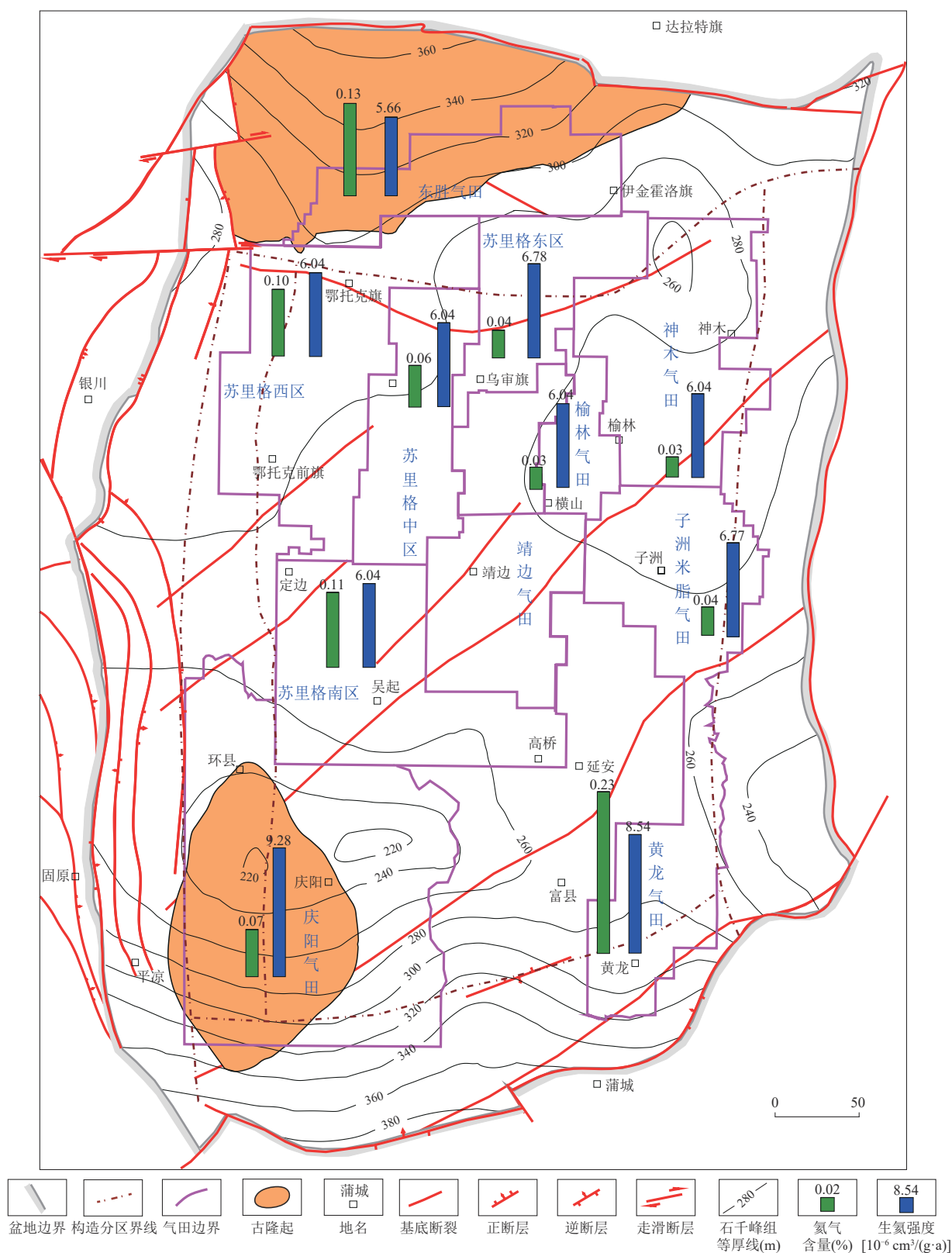


图5 鄂尔多斯盆地已发现含氦气田氦气丰度、生氦强度及盖层厚度分布

Fig. 5 Map showing the distributions of helium abundance, helium generation intensity, and cap rock thickness of helium-bearing gas fields discovered in the Ordos Basin

均值为0.070%。这表明鄂尔多斯盆地天然气普遍具有较高的氦气含量(图5)。

3.2 含氦天然气分布影响因素

含氦天然气分布受古构造位置、基底断裂发育情况、氦源岩、烃源岩、保存条件和现今构造位置等地质因素影响^[7]。鄂尔多斯盆地内富含U和Th元素的基底花岗岩、变质岩和上古生界石炭系-二叠系的煤层、泥岩层和铝土岩层提供氦气,其中,基底生成的氦气以基底断裂为通道向上运移至沉积层系,与近源生成的氦气和烃类气体共同运移至储集层,形成含氦天然气藏。氦气与烃类气为“异源同储”,两种气相对关系变化影响天然气中氦的丰度。盆地内广泛发育的石千峰组厚层泥岩作为良好的盖层,使氦气得到了有效的保存。这些地质因素不同的时-空配置,形成鄂尔多斯盆地富氦-中氦区、低氦区和贫氦区等不同丰度的含氦天然气分布区,具体划分如下。

1) 富氦-中氦区(氦气含量>0.10%)

古构造位置为中央古隆起和伊盟古陆,基底断裂发育;生氦强度为 $5.66 \times 10^{-6} \sim 9.28 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{a})$,石炭系-二叠系煤系烃源岩生气强度为 $10.00 \times 10^8 \sim 20.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,主力氦源岩为基底花岗岩和花岗片麻岩,体量大,有效生氦时间长,生氦强度与生烃强度比值大;石千峰组泥岩盖层厚度为290~330 m,使氦气可以有效保存;现今构造位置为伊盟隆起、伊陕斜坡和天环拗陷。如已发现的东胜气田和庆阳气田。根据以上富氦条件推测,目前鄂尔多斯盆地尚未发现天然气田的地区中,靠近渭北隆起的斜坡地带可能为富氦-中氦区。

2) 低氦区(氦气含量为0.03%~0.10%)

古构造位置为斜坡边缘,基底断裂较发育;生氦强度为 $6.04 \times 10^{-6} \sim 6.77 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{a})$,生气强度为 $20.00 \times 10^8 \sim 30.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,氦源岩为基底花岗岩、花岗片麻岩和上覆泥灰岩、泥岩、煤和铝土岩,体量较大,有效生氦时间较长,生氦强度与生烃强度比值较大;泥岩盖层厚度为270~290 m,保存条件较好;现今构造位置为伊陕斜坡边缘。如已发现的子洲-米脂气田。推测在盆地目前尚未发现天然气田的地区,伊陕斜坡周边可能存在低氦区。

3) 贫氦区(氦气含量为0.01%~0.03%)

古构造位置为斜坡,基底断裂不发育;生氦强度为 $6.04 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{a})$,生气强度为 $25.00 \times 10^8 \sim 40.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,主力氦源岩为泥灰岩、泥岩、煤和铝土岩,体量小,有效生氦时间短,生氦强度与生烃强度比值

小;泥岩盖层厚度为260~290 m,保存条件较好;现今构造位置为伊陕斜坡。如已发现的榆林气田。推测在盆地目前尚未发现天然气田的地区,鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部可能存在贫氦区。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地天然气的化学组成主要包括 C_1 — C_6 烷烃气体、非烃气体和微量的稀有气体,氦气含量分布在0.016%~0.487%,平均为0.060%。氦气含量较高的天然气主要分布在鄂尔多斯盆地北部、西南部和东南部的上古生界石炭系-二叠系。氦气含量与甲烷含量、干燥系数、重烃含量和非烃气含量不具有相关性。

2) 鄂尔多斯盆地含氦天然气甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素指示了烃类气的有机成因特征。甲烷碳同位素值分布在-53.88‰~-29.23‰,平均为-38.00‰,其中油型气分布在-53.88‰~-31.93‰,平均为-43.79‰;煤型气分布在-38.47‰~-29.23‰,平均为-33.89‰。

3) 鄂尔多斯盆地含氦天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 含量比值为 $20.00 \times 10^{-9} \sim 120.00 \times 10^{-9}$,平均为 42.00×10^{-9} , R/R_a 值为0.014~0.085,平均为0.030,呈现壳源氦的特征;随天然气甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素值的增大,天然气 R/R_a 值保持稳定,说明鄂尔多斯盆地的壳源氦不受天然气成因类型和成熟度等因素影响,也不受天然气产状、原生性与后生改造的影响。

4) 受古今构造位置、基底断裂、生氦强度与生烃强度相对强弱等主要因素控制,形成富氦-中氦区、低氦区和贫氦区等不同丰度的含氦天然气分布区,富氦-中氦天然气主要分布在鄂尔多斯盆地北部东胜气田、西南部庆阳气田和东南部黄龙气田的上古生界石炭系-二叠系。

参 考 文 献

- [1] YAKUTSENI V P. World helium resources and the perspectives of helium industry development[J]. Neftegasovaâ Geologîâ. Teoriâ i Praktika, 2014, 9(1): 1-22.
- [2] BROWN A A. Formation of high helium gases: A guide for explorationists[C]//AAPG Convention, New Orleans, 2010. Tulsa: AAPG, 2010: 80115.
- [3] 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, 1994, 39(16): 1505-1508.
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Helium isotope distribution in natural gas in Chinese sedimentary basins

- [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(16): 1505–1508.
- [4] 陈新军, 丁一, 易晶晶, 等. 氦气资源的分类、特征及富集主控因素分析[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 41–48.
- CHEN Xinjun, DING Yi, YI Jingjing, et al. Classified characteristics of helium gas resources and controlling factors for the enrichment[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 41–48.
- [5] XU Sheng, NAKAI S, WAKITA H, et al. Helium isotope compositions in sedimentary basins in China [J]. Applied Geochemistry, 1995, 10(6): 643–656.
- [6] LIU Wenhui, XU Yongchang, TAO Mingxin, et al. Helium and argon isotope geochemistry of natural gases in China's petroliferous basins[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2011, 30(1): 19–32.
- [7] 陈践发, 刘凯旋, 董勃伟, 等. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1436–1449.
- CHEN Jianfa, LIU Kaixuan, DONG Qingwei, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436–1449.
- [8] 何发岐, 张威, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 276–291.
- HE Faqi, ZHANG Wei, DING Xiaoqi, et al. Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 276–291.
- [9] 张宝收, 张本健, 汪华, 等. 四川盆地金秋气田: 一个典型以中生界沉积岩为氢源岩的含氢-富氢气田[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 185–199.
- ZHANG Baoshou, ZHANG Benjian, WANG Hua, et al. The Jinqiu Gas Field in the Sichuan Basin: A typical helium-bearing to helium-rich gas field with the Mesozoic sedimentary rocks as helium source rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 185–199.
- [10] 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氢储量的发现: 和田河气田[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1024–1041.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium resources and discovery of first supergiant helium reserve in China: Hetianhe Gas field [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 1024–1041.
- [11] LOWENSTERN J B, EVANS W C, BERGFELD D, et al. Prodigious degassing of a billion years of accumulated radiogenic helium at Yellowstone[J]. Nature, 2014, 506(7488): 355–358.
- [12] BALLENTINE C J, BURNARD P G. Production, release and transport of noble gases in the continental crust[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47(1): 481–538.
- [13] BROWN A. Origin of helium and nitrogen in the Panhandle-Hugoton field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(2): 369–403.
- [14] RUFER D, WABER H N, EICHINGER F, et al. Helium in porewater and rocks of crystalline bedrock from the Fennoscandian shield, Olkiluoto (Finland) [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2017, 17: 762–765.
- [15] HAND E. Massive helium fields found in rift zone of Tanzania [J]. Science, 2016, 353(6295): 109–110.
- [16] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氢气田的发现[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 1–10.
- HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng Gas Field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(1): 1–10.
- [17] 杨方之, 王金渝, 潘庆斌. 苏北黄桥地区上第三系富氦天然气成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(3): 340–345.
- YANG Fangzhi, WANG Jinyu, PAN Qingbin. Discussion on origin of Upper Neogene helium-rich gases in Huangqiao, North Jiangsu[J]. Oil & Gas Geology, 1991, 12(3): 340–345.
- [18] 端祥刚, 胡志明, 常进, 等. 页岩储层气体流动能力实验研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 143–147.
- DUAN Xianggang, HU Zhiming, CHANG Jin, et al. Gas flow capacity experiment in shale reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 143–147.
- [19] 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氢气田——鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1078–1085.
- PENG Weilong, LIU Quanyou, ZHANG Ying, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dong Sheng Gas Field, Ordos Basin, China [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(6): 1078–1085.
- [20] AWAN R S, KHAN A, LIU Chenglin, et al. Subsurface geological model of sedimentary and metasedimentary wedge from Mansehra to Battal based on gravity data, Hazara area, Pakistan[J]. Energy Geoscience, 2021, 2(4): 229–237.
- [21] 胡浩, 周鸿, 隆辉, 等. 四川盆地老气田开发后期综合潜力分析及开发建议——以W气田震旦系气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(6): 877–885.
- HU Hao, ZHOU Hong, LONG Hui, et al. Comprehensive potential analysis and development suggestions of old gas fields in Sichuan Basin in the later stage of development: A case from Sinian gas reservoir in W Gas Field [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(06): 877–885.
- [22] 李玉宏, 张文, 王利, 等. 亨利定律与壳源氦气弱源成藏——以渭河盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(4): 495–501.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Henry's law and accumulation of crust-derived helium: A case from Weihe Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 495–501.
- [23] LIU Quanyou, WU Xiaoqi, JIA Huichong, et al. Geochemical characteristics of helium in natural gas from the Daniudi Gas Field, Ordos Basin, central China [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 823308.

- [24] 戴金星, 李剑, 侯路. 鄂尔多斯盆地氦同位素的特征[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 473-478.
DAI Jinxing, LI Jian, HOU Lu. Characteristics of helium isotopes in the Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 473-478.
- [25] 刘成林, 刘新菊, 张洪军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质-工程一体化技术实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1238-1248.
LIU Chenglin, LIU Xinju, ZHANG Hongjun, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil development in Ansai area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1238-1248.
- [26] 陶士振, 杨怡青, 高建荣, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩气及伴生氦气形成演化特征[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 551-565.
TAO Shizhen, YANG Yiqing, GAO Jianrong, et al. The formation and evolution characteristics of tight sandstone gas and associated helium in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 551-565.
- [27] 王杰, 贾会冲, 陶成, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区东胜气田氦气成因来源及富集规律[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 566-575.
WANG Jie, JIA Huichong, TAO Cheng, et al. Source and enrichment regularity of helium in Dongsheng Gas Field of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 566-575.
- [28] 何自新, 费安琦, 王同和. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 155-173.
HE Zixin, FEI Anqi, WANG Tonghe. Oil and gas evolution in the Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 155-173.
- [29] 李妍蓉, 李靖, 苏文杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡太原组碳酸盐岩气藏富集规律[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(5): 509-516.
LI Yanrong, LI Jing, SU Wenjie, et al. Natural gas enrichment in carbonate gas reservoirs of Taiyuan Formation in Yishaan slope, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(5): 509-516.
- [30] 刘新社, 张涛, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地中东部太原组石灰岩天然气勘探新突破及勘探方向[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 1-11.
LIU Xinshe, ZHANG Tao, HUANG Daojun, et al. New breakthrough in and direction of natural gas exploration in Taiyuan Formation limestone in the central and eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5): 1-11.
- [31] 刘成林, 丁振刚, 陈践发, 等. 鄂尔多斯盆地氦源岩特征及生氦潜力[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1546-1554.
LIU Chenglin, DING Zhengang, CHEN Jianfa, et al. Characteristics and helium-generating potential of helium source rocks in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1546-1554.
- [32] 付金华. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D]. 西安: 西北大学, 2004.
FU Jinhua. The gas reservoir-forming conditions and accumulation rules of Upper Paleozoic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2004.
- [33] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1902-1905.
LIU Wenhui, SUN Mingliang, XU Yongchang. Rare gas isotopic characteristics and source tracing of natural gas in the Ordos Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(22): 1902-1905.

(编辑 许 诺)