

引用本文:丁振刚,刘成林,范立勇,等.斜坡—沉积源岩型氦气富集模式——以鄂尔多斯盆地神木气田为例[J].石油实验地质,2024,46(6): 1177-1186.DOI:10.11781/sydz2024061177.

DING Zhengang, LIU Chenglin, FAN Liyong, et al. Slope-sedimentary source rock-type helium enrichment model: a case study of Shenmu Gas Field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1177-1186. DOI: 10.11781/sydz2024061177.

斜坡—沉积源岩型氦气富集模式

——以鄂尔多斯盆地神木气田为例

丁振刚^{1,2}, 刘成林^{1,2}, 范立勇³, 康锐³, 陈践发^{1,2}, 王海东^{1,2},
洪思婕^{1,2}, MUHAMMAD Aslam Khan^{1,2}

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. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 西安 710018

摘要:鄂尔多斯盆地氦气资源丰富,已在伊盟隆起、伊陕斜坡南部等地区发现高含氦、富氦天然气田,这些气田的氦气富集多与断裂发育密切相关。然而,盆地内的构造背景较为复杂,为研究盆地内不同地质背景下氦气的富集特征及控制因素,对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部开展天然气组分分析测试,并结合研究区基础地质资料及前人研究成果,对鄂尔多斯盆地神木气田上古生界的氦气分布特征及其地质影响因素进行探究。神木气田上古生界氦气含量达 0.017%~0.116%,平均氦气含量为 0.05%,达到含氦气田标准;氦气含量在平面上呈“西低东高”的整体分布格局,东部部分地区的氦气含量大于 0.1%;氦气含量与氮气含量呈明显正相关关系,表明天然气藏中的氦气和氮气在成因和溶解—脱溶机制上可能存在必然联系。神木气田氦气的富集受多种地质因素共同影响:上古生界广泛分布的煤系烃源岩提供了充足的氦气;地壳抬升和构造反转控制了氦气的运移方向,且促进了溶解氦的脱溶和聚集;适量的载体气有助于氦气的富集。结合研究区构造背景和氦气成藏地质因素,提出了一种新的氦气富集模式,即斜坡—沉积源岩型含氦天然气富集模式,这为氦气勘探和开发工作提供了重要的理论支持。

关键词:构造运动;斜坡—沉积源岩型;氦气;上古生界;神木气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132.3

文献标识码:A

DOI:10.11781/sydz2024061177

Slope-sedimentary source rock-type helium enrichment model:

a case study of Shenmu Gas Field, Ordos Basin

DING Zhengang^{1,2}, LIU Chenglin^{1,2}, FAN Liyong³, KANG Rui³, CHEN Jianfa^{1,2}, WANG Haidong^{1,2},

HONG Sijie^{1,2}, MUHAMMAD Aslam Khan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China

Abstract: The Ordos Basin is rich in helium resources, with high helium and helium-rich natural gas fields discovered in areas such as the Yimeng Uplift and the southern Yishan Slope. The enrichment of helium in these gas fields is often closely related to the development of faults. However, the structural background within the basin is complex. To study the characteristics and controlling factors of helium enrichment under different geological backgrounds within the basin, an analysis of natural gas composition was conducted in the northeastern Yishan Slope of the Ordos Basin. Combining basic geological data of the study area and previous research findings, the helium distribution characteristics and geological influencing factors in the Upper Paleozoic of the Shenmu Gas Field in the Ordos Basin were explored. The results showed that the helium content in the Upper Paleozoic of the Shenmu Gas Field ranged from 0.017% to 0.116%, with an average content of 0.05%, meeting the standard of a helium-

收稿日期(Received):2023-12-15;修订日期(Revised):2024-10-14;出版日期(Published):2024-11-28.

作者简介:丁振刚(1994—),男,博士生,从事天然气地球化学研究。E-mail:939802641@qq.com.

通信作者:刘成林(1970—),男,博士,教授,从事天然气成藏和油气资源评价研究。E-mail:liucl@cup.edu.cn.

基金项目:国家重点研发计划(2021YFA0719000)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

containing gas field. The helium content showed a spatial distribution pattern of “low in the west and high in the east”, with helium content exceeding 0.1% in some eastern areas. There was a significant positive correlation between helium and nitrogen content, indicating a possible inherent connection between the genesis and dissolution-exsolution mechanisms of helium and nitrogen in natural gas reservoirs. The enrichment of helium in the Shenmu Gas Field was influenced by various geological factors: (1) The widely distributed coal-measure source rocks in the Upper Paleozoic provided ample helium; (2) Crustal uplift and tectonic inversion controlled the migration direction of helium and promoted the exsolution and accumulation of dissolved helium; (3) An appropriate amount of carrier gas aided in helium enrichment. Based on the tectonic conditions of the study area and the geological factors controlling helium accumulation, a new helium enrichment model was proposed, the slope-sedimentary source rock-type helium-rich natural gas enrichment model, providing theoretical support for helium exploration and development.

Key words: tectonic movement; slope-sedimentary source rock type; helium; Upper Paleozoic; Shenmu Gas Field; Ordos Basin

氦气为无色无味惰性气体,沸点极低,具有较好的稳定性、较强的扩散能力和较低的溶解度^[1-4]。全球氦气资源分布极不均衡,主要集中在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯等少数几个国家^[5-8]。目前中国氦气资源量为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$,氦气资源总量较少,约占全球氦气资源量的 1.9%,所占比重极小,因此我国对氦气的进口依赖程度较高。氦气在低温、工程和医疗等多个领域展现了重要作用,可用于质谱仪、核磁共振仪、大型强子对撞机等设备,以及火箭液体燃料的送压剂和增压剂、核反应堆的冷却和检漏。近年来,随着国家科学技术的飞速发展,对氦的需求越来越大,迫切需要对氦资源进行深入研究。中国含油气盆地类型多样,天然气资源丰富,氦气在各个盆地中的分布和富集程度差异较大,目前发现的富氦天然气田都分布在中西部地区的沉积盆地。除此之外,在沉积盆地内部也只有少量的天然气藏中富集氦气,如威远气田、和田河气田、东胜气田等,而绝大部分天然气藏为贫氦气藏^[9-13]。位于鄂尔多斯盆地边缘的东胜气田与庆阳气田的氦气平均含量均大于 0.1%,属富氦气田,其氦气富集与基底断裂有密切联系^[1-2,14-21]。

鄂尔多斯盆地其他天然气田氦气含量如何、有无其他类型的氦气富集模式是本文研究的重点。为此,本文以鄂尔多斯盆地北部神木气田等为研究对象,对上古生界储层含氦天然气展开研究,明确氦气分布特征及其成藏地质因素,建立氦气富集模式,以期对鄂尔多斯盆地神木地区的氦气资源评价和勘探开发提供理论基础。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西缘,是中国典型的克拉通叠合盆地,与周边 6 个盆地(定西、银川、

河套、六盘山、巴彦浩特、渭河)以断裂为界。鄂尔多斯盆地主要由 6 个次级构造单元构成,即伊盟隆起、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起、西缘逆冲带和天环坳陷^[22-24](图 1a)。神木气田位于陕西省榆林市榆阳区 and 神木市境内,其勘探面积为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,与榆林、大牛地、子洲—米脂等多个气田相邻。该气田具有丰富的天然气资源,是鄂尔多斯盆地重要的天然气田之一(图 1b)。构造上神木气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北边界,其形态呈现为宽缓且向西倾斜的斜坡,坡度为 6~10 m/km,倾角小于 1° ;在单斜背景下,发育多列 NE 向低缓鼻隆构造,宽度为 4~5 km,长度为 25~30 km。在神木地区,上古生界石炭系—二叠系发育了一套海陆交互的含煤层系。这些地层由老到新依次为本溪组(C_2b)、太原组(P_1t)和山西组(P_1s),其中煤、暗色泥岩、碳质泥岩是主要的气源岩,这些气源岩的有机质类型主要是腐殖型,是优质的气源岩组合。神木气田的气藏类型是以低产、特低丰度、中深层特大型致密砂岩为主要特征的天然气藏(图 2)。含气产气层主要是二叠系太原组、山西组和下石盒子组。这些气层的单层厚度介于 5~10 m 之间,累计厚度则介于 10~20 m 之间。截至目前,该气田已探明天然气分布面积 $4\ 069 \text{ km}^2$,探明地质储量 $3\ 334 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[25-27]。

2 样品与方法

2.1 样品与实验

根据鄂尔多斯盆地北部神木气田、榆林气田和子洲—米脂气田的天然气成藏区带、气藏单元、赋存砂体及层位等地质特征,本文选取 29 口天然气生产井,开展了天然气样品采集;产气层均为上古生界,部分气井分布见图 1b。为了将空气的干扰降

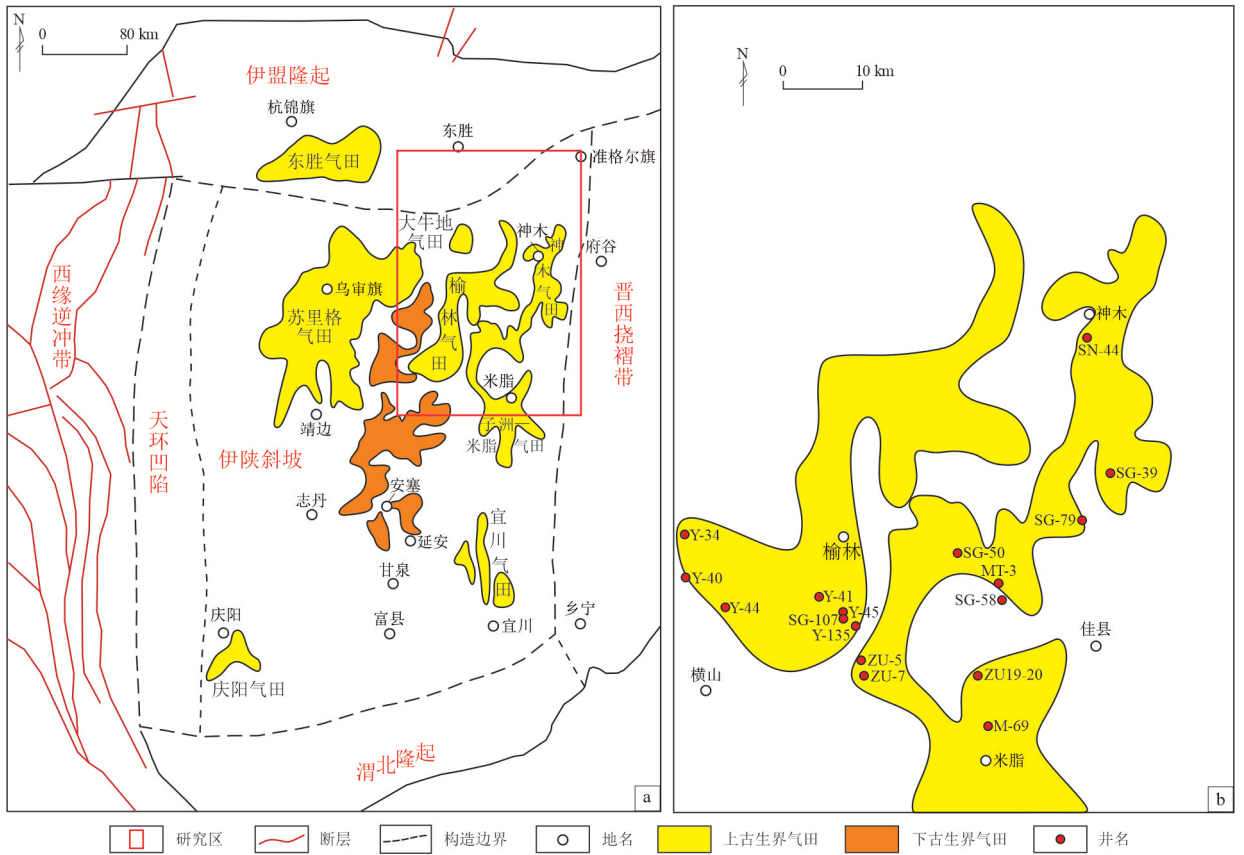


图1 鄂尔多斯盆地神木气田地理位置及部分采样井分布

Fig.1 Geographic location (a) and distribution of some sampling wells (b) in Shenmu Gas Field, Ordos Basin

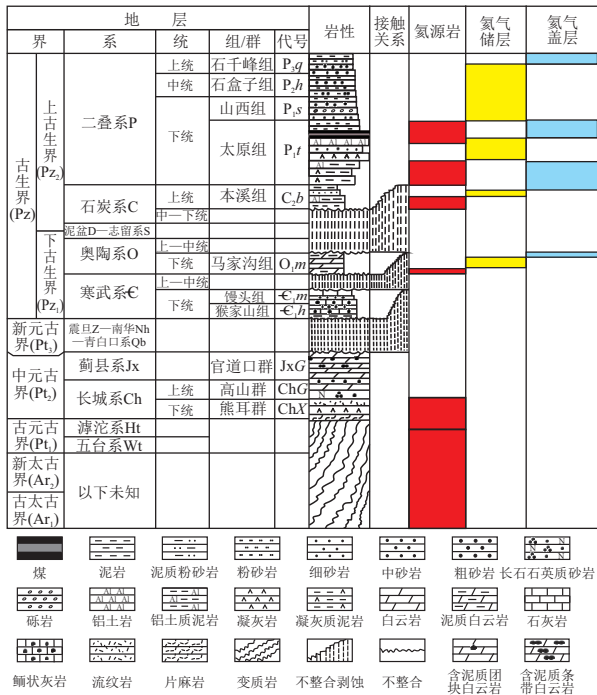


图2 鄂尔多斯盆地神木气田氦气生、储、盖组合柱状图

Fig.2 Column chart of helium generation, storage, and seal assemblages in Shenmu Gas Field, Ordos Basin

到最低程度,取样容器使用双阀耐高压钢瓶,在正

式取样之前,用所收集到的天然气对钢瓶进行多次冲洗,每次冲洗3~5 min,如果井口压力较小,则加大冲洗次数,尽量降低空气污染。

天然气中氦气分析由中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室的天然气中稀有气体浓度联测仪器完成。天然气中氦气成分检测采用气相色谱法,分析方法参照国家标准《天然气的组成分析——气相色谱法:GB/T13610—2020》。氦气含量测试采用配备氢离子火焰检测器(FID)和双热导检测器(TCD)的Agilent 8890气相色谱仪,仪器进样口温度为250℃,压力为18 psi,隔垫吹扫3 min,分流进样,分流比为80:1;色谱柱为毛细管柱(PLOT Al₂O₃ 27 m×0.32 mm),柱箱初始温度为60℃,保持1 min,然后以20℃/min的升温速率升至80℃,再以30℃/min的升温速率升至190℃,保持7 min。第二个热导检测器负责分析He和H₂,载气为N₂,检测器温度为250℃,尾吹气流量(N₂)为2 mL/min。所测天然气样品He含量小于0.1%时,平行测试的绝对值介于0~0.002%;氦气含量介于0.1%~1%时,平行测试的相对偏差介于0~2.5%。天然气组分测试要求符

合国家标准《天然气在一定不确定度下用气相色谱法测定组成:GB/T 27894.6—2012》。

2.2 生氦量模拟计算方法

基于放射性元素衰变原理,氦气的生成过程是无机过程,不受温度、压力等外界条件影响,仅与元素的半衰期有关。在漫长的地质历史时期,赋存于氦源岩矿物中的 U 和 Th 元素以恒定不变的速率发生衰变,并释放源源不断的氦气。因此,我们可以根据 U 和 Th 元素的放射性衰变原理,得到氦气生成的计算公式[式(1)^[28-29]]。这个公式可以用来评估潜在氦源岩的生氦强度。

$$R_{\text{He}} = 1.207 \times 10^{-13} [U] + 2.868 \times 10^{-14} [\text{Th}] \quad (1)$$

式中: R_{He} 为岩石的生氦强度,单位 $\text{cm}^3/(\text{a} \cdot \text{g})$; $[U]$ 和 $[\text{Th}]$ 分别为岩石中微量元素 U、Th 的含量,单位 10^{-6} 。根据该公式,我们可以得知,单位岩石体积内氦气的生成量是受时间和放射性元素 U、

Th 丰度的共同作用。因此,氦气的累积量主要受源岩中 U、Th 丰度、衰变时间和氦源岩规模的控制。

成因法的氦气生成量根据以下公式(2)^[29]计算:

$$N_{\text{He}} = AH\rho \times (1-\varphi) R_{\text{He}} \quad (2)$$

式中: N_{He} 为岩石的生氦量,单位 10^8 m^3 ; A 为岩石的展布面积,单位 m^2 ; H 为岩石的平均厚度,单位 m ; ρ 为岩石的平均密度,单位 kg/m^3 ; φ 为岩石的平均孔隙度,单位 %。

3 含氦天然气地球化学特征

通过对采集的 29 个天然气样品的天然气组分分析可知,鄂尔多斯盆地中北部地区甲烷含量较高(表 1)。其中,神木气田共有 11 个天然气样品,甲烷含量为 82.01%~92.58%,平均为 88.82%;榆林气田共有 10 个天然气样品,甲烷含量为 85.11%~

表 1 鄂尔多斯盆地神木气田及周缘天然气组分特征

Table 1 Characteristics of natural gas composition in Shenmu Gas Field and surrounding areas of Ordos Basin

编号	气田	井代号	烃类气体组分特征				非烃气组分含量			
			$C_1/\%$	$C_{2-5}/\%$	C_{2+}/C_{1+}	C_1/C_{1-5}	$\text{CO}_2/\%$	$\text{N}_2/\%$	$\text{He}/\%$	$\text{H}_2/\%$
1		SG-39	85.622	6.878	0.07	0.93		2.106	0.120	0.036
2		SG-79	90.204	3.357	0.04	0.96		1.443	0.082	0.014
3		SN-44	82.009	9.304	0.10	0.90	0.030	3.884	0.085	0.013
4		SG-50	88.787	6.474	0.07	0.93	0.584	0.352	0.030	0.028
5		SG-58C4	88.873	5.878	0.06	0.94	1.242	0.206	0.017	0.010
6	神木气田	SG-50C3	89.296	6.489	0.07	0.93	0.594	0.343	0.029	0.028
7		MT-3	91.940	1.393	0.01	0.99	3.439	0.124	0.018	
8		MT-3C6	92.491	1.338	0.01	0.99	3.472	0.109	0.019	
9		SG-39C3	85.185	8.299	0.09	0.91	0.036	1.746	0.091	0.060
10		SG-58	90.075	4.161	0.04	0.96	0.881	0.421	0.032	0.012
11		SG-38C1	92.577	1.860	0.02	0.98	1.750	0.233	0.019	
12		Y-44	89.806	4.424	0.05	0.95	1.765	0.284	0.028	0.028
13		Y-45	89.658	4.761	0.05	0.95	1.005	0.294	0.025	0.014
14		SG-107	88.317	5.706	0.06	0.94	0.695	0.345	0.026	0.021
15		SG-135	85.112	8.554	0.09	0.91	1.327	0.305	0.017	0.010
16	榆林气田	Y-47C6	87.465	7.096	0.08	0.92	0.925	0.314	0.028	0.032
17		Y-40	90.397	3.705	0.04	0.96	0.812	0.584	0.040	0.026
18		Y-40C8	91.017	2.715	0.03	0.97	1.861	0.346	0.030	0.050
19		Y-41	88.924	5.276	0.06	0.94	1.042	0.318	0.025	0.015
20		Y-34	89.804	3.645	0.04	0.96	0.925	0.662	0.032	0.035
21		Y-29	89.442	3.932	0.04	0.96	1.758	0.267	0.023	0.010
22		M-69	91.122	4.367	0.05	0.95	0.042	0.507	0.032	0.017
23		M-31	89.732	5.470	0.06	0.94	0.574	0.540	0.035	0.019
24		M-22C2	90.880	3.266	0.03	0.97	1.538	0.305	0.028	0.012
25	子洲—米脂气田	ZU-18	92.534	1.236	0.01	0.99	2.055	0.199	0.028	0.036
26		ZU-19	89.512	4.764	0.05	0.95	0.954	0.404	0.037	0.030
27		ZU-5-14	87.646	6.377	0.07	0.93	0.580	0.433	0.032	0.036
28		ZU-5-13	86.571	6.211	0.07	0.93	2.454	0.274	0.023	0.015
29		ZU-7-14	90.477	3.845	0.04	0.96	1.316	0.270	0.024	0.022

91.02%, 平均为 88.99%; 子洲—米脂气田共有 8 个天然气样品, 甲烷含量为 86.57%~92.53%, 平均为 89.81%。神木气田干燥系数为 0.90~0.99, 平均为 0.95; 榆林气田干燥系数为 0.91~0.97, 平均为 0.95; 子洲—米脂气田干燥系数为 0.93~0.99, 平均为 0.95。整体来说, 3 个相邻气田的甲烷含量基本相近, 干燥系数均在 0.90~0.99 之间, 部分天然气样品的干燥系数较大, 在 0.95 以上(图 3a)。

神木气田 CO₂ 含量为 0.03%~3.47%, 平均为 1.34%, N₂ 含量为 0.11%~3.89%, 平均为 1.00%; 榆林气田 CO₂ 含量为 0.70%~1.86%, 平均为 1.21%,

N₂ 含量为 0.27%~0.66%, 平均为 0.37%; 子洲—米脂气田 CO₂ 含量为 0.04%~2.45%, 平均为 1.19%, N₂ 含量为 0.20%~0.54%, 平均为 0.37%。与其他气田相比, 神木气田 CO₂ 与 He 含量呈负相关关系, 但二者相关性并不明显(图 3b)。神木气田、榆林气田和子洲—米脂气田中 N₂ 含量均与 He 含量呈明显正相关关系(图 3c), 这一规律在我国四川盆地威远气田、柴达木盆地以及美国的潘汉德—胡果顿(Panhandle Hugoton field)气田等国内外多个富氦气田中均有出现, 这表明绝大多数天然气藏中的 N₂ 和 He 在成因和溶解—脱溶过程中有必然联系^[30-32]。

神木气田 He 含量为 0.017%~0.116%, 平均为 0.05%; 榆林气田 He 含量为 0.017%~0.040%, 平均为 0.03%; 子洲—米脂气田 He 含量为 0.023%~0.037%, 平均为 0.03%(表 1)。根据含氦气田分类标准——《天然气藏分类: GB/T 26979—2011》, 将天然气组分中氦气含量达到 0.1% 及以上的称为含氦气藏。戴金星等将氦气含量在 0.05%~<0.15% 的称为含氦气田, 氦气含量在 0.15%~<0.50% 的称为富氦气藏, 氦气含量大于等于 0.5% 的称为特富氦气藏。因此, 神木气田属于含氦气田, 其高含氦区位于神木气田东部。根据神木气田的地质探明储量, 结合氦气平均含量, 可推断其氦气储量为 1.67×10⁸ m³, 具有较大的氦气勘探开发潜力(图 4)。

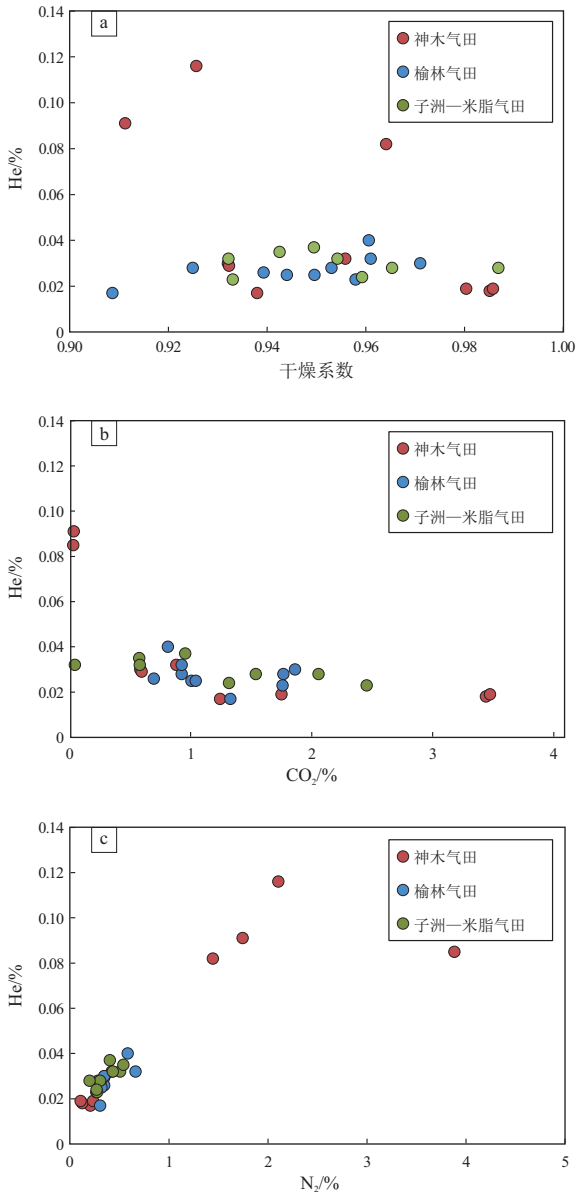


图 3 鄂尔多斯盆地神木气田及周缘天然气 He 含量与干燥系数(a)、CO₂(b)和 N₂(c)的相关性

Fig.3 Correlation between helium(He) content with dryness coefficient (a), CO₂(b), and N₂(c) in Shennu Gas Field and surrounding areas of Ordos Basin

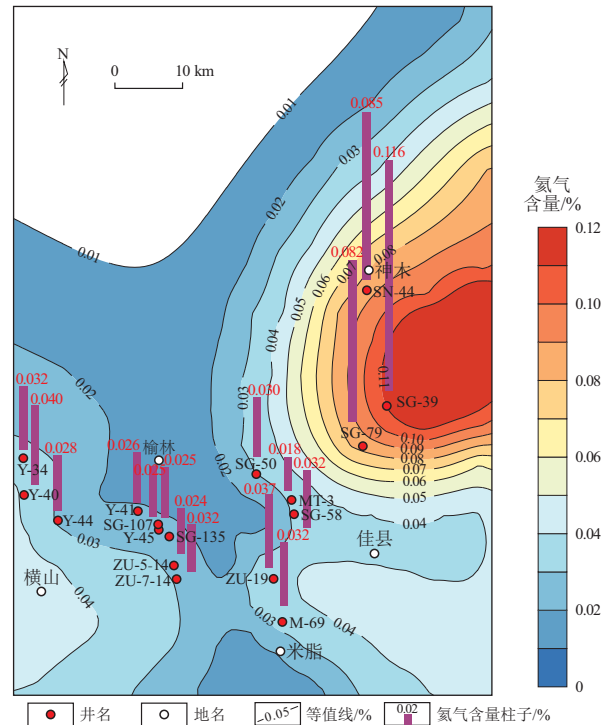


图 4 鄂尔多斯盆地神木气田氦气含量平面分布

Fig.4 Planar distribution of helium content in Shennu Gas Field, Ordos Basin

4 氦气成藏要素

4.1 潜在氦源岩特征

壳源氦的氦源岩石类型和性质是氦源岩有效性的重要影响因素。U、Th 元素在三大岩类中广泛分布,氦源岩石类型多样,可以为花岗岩、变质岩及泥页岩等^[33]。基于自然伽马能谱测井信息可对不同层位的 U、Th 元素含量进行测定,同时根据氦气生成强度公式也可对潜在氦源岩的生氦强度进行计算和评估^[29]。暗色泥岩和煤在神木地区广泛分布,平均年龄为 2.92 亿年,其中石炭系本溪组 U、Th 平均丰度分别为 8.14×10^{-6} 和 19.63×10^{-6} ,生氦强度为 $1.55 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 / (\text{a} \cdot \text{g})$;二叠系太原组 U、Th 平均丰度分别为 3.81×10^{-6} 和 13.01×10^{-6} ,生氦强度为 $8.34 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 / (\text{a} \cdot \text{g})$;山西组 U、Th 平均丰度分别为 4.04×10^{-6} 和 17.13×10^{-6} ,生氦强度为 $9.80 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 / (\text{a} \cdot \text{g})$ 。因此神木气田上古生界石炭系—二叠系暗色泥岩、碳质泥岩、煤不仅是重要的烃源岩,同时也是重要的氦源岩(图 2)。

4.2 氦气生成量和释放量

根据成因法对神木地区氦气生成量的数值模拟,石炭系—二叠系的氦气生成量为 $35.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。氦气初次运移为氦气从生氦矿物(锆石、磷灰石、独居石等)晶格中释放到源岩孔隙的过程^[34-36]。不同矿物对氦分子的扩散限制温度也不相同,例如晶质铀矿的氦封闭温度为 $27 \sim 76 \text{ }^\circ\text{C}$,磷灰石的氦封闭温度为 $62 \sim 81 \text{ }^\circ\text{C}$,锆石的氦封闭温度为 $165 \sim 186 \text{ }^\circ\text{C}$ 等^[10]。只有突破矿物的封闭温度,氦分子才能从矿物晶格中释放出来,目前来看,温度是影响氦气释放最重要的地质因素。根据 ZHANG 等^[37]对花岗岩氦气释放的研究,绝大多数富铀钍矿物的氦气闭合温度在 $27 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。假设地表温度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,地温梯度 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,则氦气在埋深大于 7800 m 处完全释放,在埋深 $400 \sim 7800 \text{ m}$ 处部分释放,在埋深小于 400 m 处不释放氦气。前人通过分析神木地区和邻近区域的高分辨率区域航磁异常,判断克拉通基底顶界深度在 4 km 左右。由于 U、Th 这类放射性元素的丰度在大陆地壳中的分布是深度的函数,其浓度至地壳底部可衰减至 $1/10$,75% 的 ^4He 产出于深度 10 km 以上的地壳范围,因此,本文仅考虑上地壳中氦气的生成和释放。假设氦气释放效率是温度的函数且地温梯度不变,结合氦气的生成量,可推算出上古生界沉积型氦源岩的释氦量为 $12.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。总体来说,随着埋深增加,氦气的释放效率增大(图 5)。

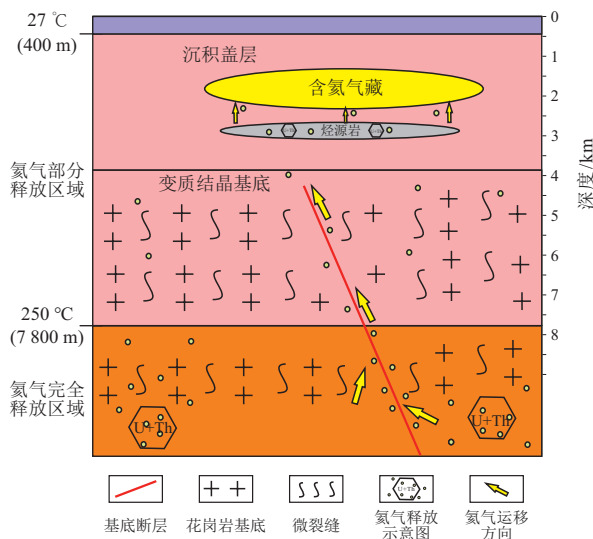


图 5 鄂尔多斯盆地神木地区氦气释放模式
据参考文献[37]修改。

Fig.5 Helium release pattern in Shenmu area of Ordos Basin

4.3 促进氦气富集的构造活动

构造运动不仅决定了鄂尔多斯盆地天然气的分布,也与氦气的富集成藏密切相关,这一现象在盆地东部边缘的神木气田尤为明显^[31]。自晚白垩世以来,原本向东倾斜的地层在受到构造运动影响后,盆地东部抬升,呈西倾单斜构造,气水关系也随之发生变化,氦气运移方向重新调整,沿储层上倾方向向东运移,原生气藏的氦气分布格局发生根本性变化,逐渐向神木气田东部区域聚集成藏,构造反转导致了神木气田现今氦气分布格局的最终成型。在含氦天然气运移过程中,由于氦分子相较于甲烷分子具有更大的分子自由程,氦分子存在明显的运移优势;而地层倒转导致地层水和含氦天然气向相异的方向运移,间接增大了含氦天然气的运移时间和距离,氦气在长距离运移条件下逐渐富集。因此,构造运动对鄂尔多斯盆地天然气的分布和氦气的富集成藏产生了深远的影响(图 6)。

4.4 适量的载体气

氦气在地层中含量极低且难以独立聚集成藏,多在天然气藏中以伴生气体的形式存在,因此氦气和载体气具有同源同储的特点^[35]。神木气田上古生界煤系烃源岩从三叠纪末开始生烃,至侏罗纪末烃源岩达到成熟阶段,开始大量生成烃类气体;同时,受燕山运动的影响,地壳抬升的同时发生构造反转,大量溶于地层水的氦气运移至地层浅部,与载体气相遇,由于氦气分压极低而易脱溶至天然气藏,大量生成的烃类气体在运移的过程中“携带”氦气聚集至圈闭,形成含氦气藏;但氦的生成与载

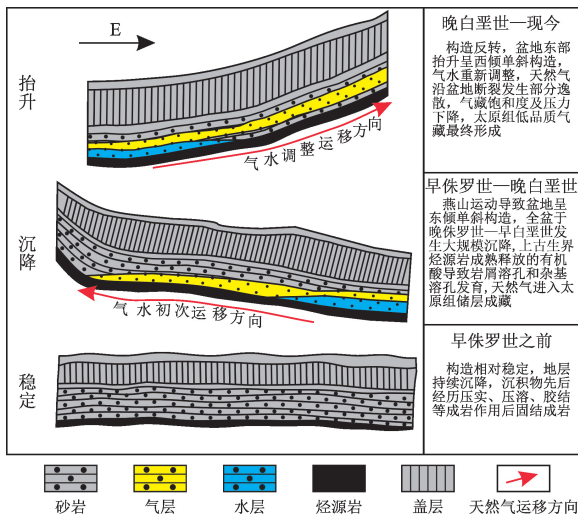


图 6 鄂尔多斯盆地神木气田构造演化

据参考文献[38]修改。

Fig.6 Tectonic evolution of Shenmu Gas Field in Ordos Basin

体气的生成相比微不足道(图 7)。例如,具有最小烃源岩潜力页岩的生气强度是典型页岩氦气生成强度的 3 000 多倍^[39]。由页岩生成的足量烃类气体会将本就少量的氦气大大稀释,造成氦气含量降

低的现象,因此载体气的生成强度不宜太大,适量的载体气更有利于氦气的富集。神木气田上古生界气源中心主要分布在气田的西部和南部,其生气强度普遍高于 $24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[24],生气强度较高,但该区域氦气含量较低,普遍小于 0.04%;而生气强度较弱的神木地区东部的氦气含量较高,普遍高于 0.05%(图 4)。因此,烃类气体是氦气运移过程中的重要载体,但过量的烃类气体会稀释氦气的浓度,不利于氦气的富集。

5 氦气富集模式

与东胜气田、庆阳气田不同,由于神木地区基底断裂不发育,且奥陶系马家沟组发育致密碳酸盐岩和膏岩层,基底生成和释放的氦气很难垂向运移至储层中^[40-42],因此天然气藏中的氦气主要源自石炭系—二叠系。氦气在生成后先从矿物晶格中释放出来进入地层水,一部分溶于水形成溶解氦,随地层水运移至储层;另一部分仍以游离态的形式形成“氦泡”,从地层水中逃逸出来与上古生界煤系烃源岩产生的烃类气体合流,并运移至储层。受

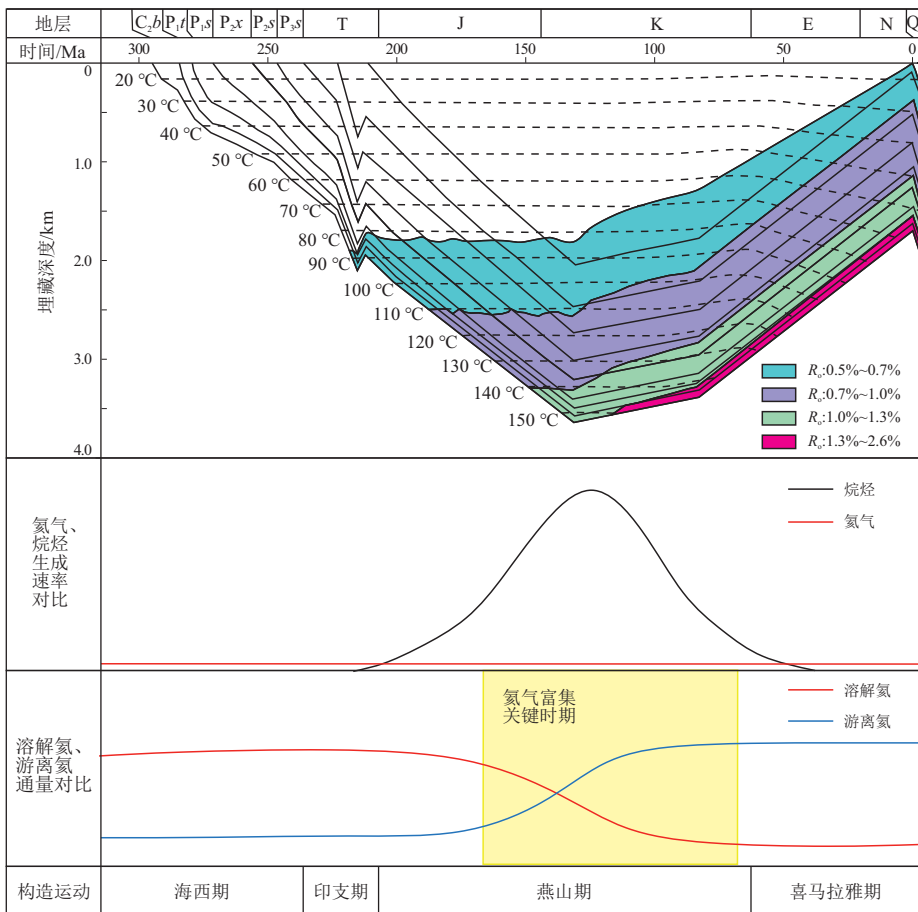


图 7 鄂尔多斯盆地神木气田油气成藏热演化与氦气的关系

Fig.7 Relationship between thermal evolution of hydrocarbon accumulation and helium in Shenmu Gas Field, Ordos Basin

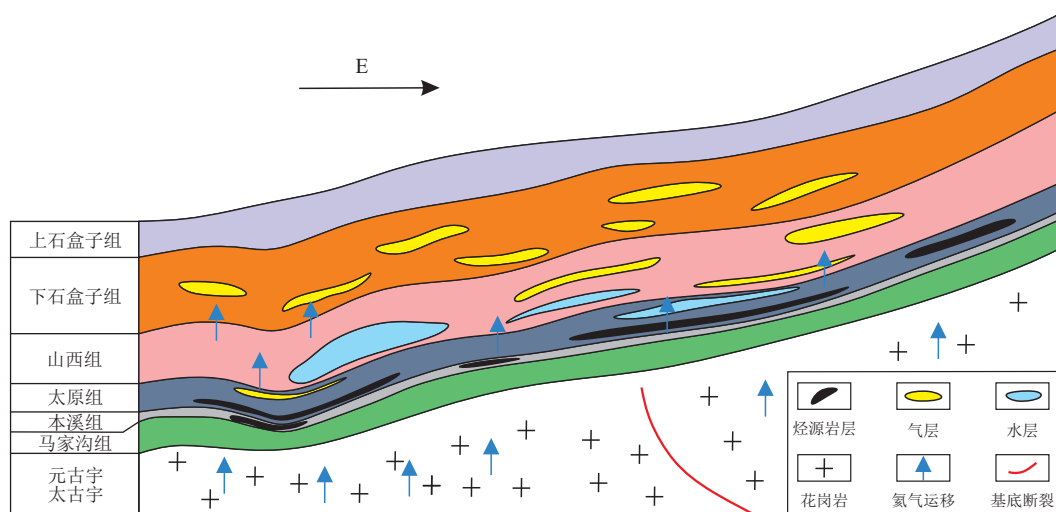


图 8 鄂尔多斯盆地神木气田斜坡型氦气富集模式

Fig.8 Slope-type helium enrichment model in Shenmu Gas Field, Ordos Basin

燕山运动影响,鄂尔多斯盆地整体隆升,剥蚀程度显著,随埋藏深度变浅,地层温度降低,氦气溶解度降低,氦气从地层水中逃逸后与甲烷等烃类气体协同运移;燕山运动末期构造反转,增加了氦气在斜坡背景下的运移距离,有利于氦气富集。神木地区石千峰组和石盒子组中厚层泥岩和山西组泥岩均发育稳定,分布广泛,具有较好的封盖能力,是神木地区重要的上古生界盖层,并起到阻隔氦气散失的作用^[43]。

通过对神木气田基底岩相发育特征、天然气成藏因素的分析,明确了氦气的成藏条件及其时空配置关系,充足的氦源、构造运动和适量的载体气是其主要控制因素。神木气田的氦气生成量大且成藏期长,从而保证了充足的氦气总量。结合神木气田的构造背景,本文提出了鄂尔多斯盆地一种新的氦气富集模式,即斜坡—沉积源岩型含氦天然气富集模式(图8)。这种富集模式的发现,为氦气的勘探和开发提供了新的思路和方法。

6 结论

(1)神木气田氦气含量达 0.017%~0.116%,平均氦气含量为 0.05%,部分达到含氦标准。产气层均在上古生界,说明该层位具有较大的氦气勘探开发潜力。

(2)神木气田干燥系数介于 0.90~0.99 之间,平均为 0.95; CO_2 含量介于 0.03%~3.47%之间,平均为 1.34%; N_2 含量为 0.11%~3.89%,平均为 1.00%。其中 He 含量与 N_2 含量呈明显正相关关系,这表明 He 和 N_2 在成因和溶解—脱溶机制中可能存在联系。

(3)神木气田氦气的富集是多种地质要素共同控制的结果:广泛分布的基底花岗岩—变质岩系和煤系烃源岩为神木气田提供了充足的氦气;燕山期的构造抬升和反转控制了氦气的聚集;适量的载体气促进了氦气的富集,形成了斜坡—沉积源岩型含氦天然气富集模式。

致谢:本文得到了审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持,在此致以衷心感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

作者刘成林是本刊编委会成员,未参与本文的同行评审或决策。Author LIU Chenglin is an Editorial Board Member of this journal, and he did not take part in peer review or decision making of this article.

作者贡献/Authors' Contributions

丁振刚、刘成林、陈践发参与实验设计;王海东、洪思婕完成实验操作;范立勇、康锐提供了研究区的基础资料;丁振刚、刘成林、Muhammad Aslam Khan 参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by DING Zhengang, LIU Chenglin, and CHEN Jianfa. The experimental operation was completed by WANG Haidong and HONG Sijie. The basic information of the study area was provided by FAN Liyong and KANG Rui. The manuscript was drafted and revised by DING Zhengang, LIU Chenglin, and MUHAMMAD Aslam Khan. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 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氦气田的发现[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 & Experiment, 2022, 44(1): 1-10.
- [2] 何发岐,王杰,赵永强,等.鄂尔多斯盆地东胜富氦气田成藏

- 特征及其大地构造背景[J].古地学报,2022,24(5):937-950.
- HE Faqi, WANG Jie, ZHAO Yongqiang, et al. Accumulation characteristics of Dongsheng helium-rich gas field in Ordos Basin and its tectonic background [J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(5): 937-950.
- [3] 秦胜飞,李济远,梁传国,等.中国中西部富氦气藏氦气富集机理:古老地层水脱氮富集[J].天然气地球科学,2022,33(8):1203-1217.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China: degassing and accumulation from old formation water [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 1203-1217.
- [4] 秦胜飞,李济远.氦气到底有什么用? [J].石油知识,2021(4):44-45.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan. What exactly is the use of helium gas? [J]. Petroleum Knowledge, 2021(4): 44-45.
- [5] DANABALAN D, GLUYAS J G, MACPHERSON C G, et al. The principles of helium exploration [J]. Petroleum Geoscience, 2022, 28(2): petgeo2021-029.
- [6] ANDERSON S T. Economics, helium, and the U.S. federal helium reserve; summary and outlook [J]. Natural Resources Research, 2018, 27(4): 455-477.
- [7] MASSOL O, RIFAAT O. Phasing out the U.S. federal helium reserve: policy insights from a world helium model [J]. Resource and Energy Economics, 2018, 54: 186-211.
- [8] HAND E. Massive helium fields found in rift zone of Tanzania [J]. Science, 2016, 353(6295): 109-110.
- [9] 韩元红,罗厚勇,薛宇泽,等.渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J].天然气地球科学,2022,33(2):277-287.
- HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and helium enrichment mechanism of geothermal water-associated gas in Weihe Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 277-287.
- [10] 张文. 关中和柴北缘地区战略性氦气资源成藏机理研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.
- ZHANG Wen. Accumulation mechanism of helium, a strategic resource, in Guanzhong and north Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019.
- [11] 孟伟. 东营凹陷古近系油气运移和聚集的流体和岩石的地球化学响应 [D]. 北京:中国石油大学(北京),2018.
- MENG Wei. Geochemical response of fluids and rocks to hydrocarbon migration and accumulation in Paleogene of Dongying Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [12] 陶成,刘文汇,腾格尔,等.基于 He 年代累积效应约束天然成藏时代:以四川威远气田为例[J].地质学报,2015,89(S1):183-184.
- TAO Cheng, LIU Wenhui, TENGER, et al. Take Weiyuan gas field in Sichuan Province as an example [J]. Journal of Geology, 2015, 89(S1): 183-184.
- [13] 张健,杨威,易海永,等.四川盆地前震旦系勘探高含氮天然气藏的可行性[J].天然气工业,2015,35(1):45-52.
- ZHANG Jian, YANG Wei, YI Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 45-52.
- [14] 刘强. 渝东地区氦气资源分布特征及开发利用前景 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 36(2): 4-6.
- LIU Qiang. Distribution characteristics and development prospects of helium resources in eastern Chongqing [J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2023, 36(2): 4-6.
- [15] 范立勇,单长安,李进步,等.基于磁力资料的鄂尔多斯盆地氦气分布规律[J].天然气地球科学,2023,34(10):1780-1789.
- FAN Liyong, SHAN Chang'an, LI Jinbu, et al. Distribution of helium resources in Ordos Basin based on magnetic data [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1780-1789.
- [16] 柳永刚,张翔,刘子锐,等.甘肃省首个高品位氦气盆地的发现及勘探前景[J].甘肃地质,2020,29(S2):29-36.
- LIU Yonggang, ZHANG Xiang, LIU Zirui, et al. The first discovery and exploration prospect of high grade helium basin in Gansu Province [J]. Geology of Gansu Province, 2020, 29(S2): 29-36.
- [17] 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氦储量的发现:和田河气田[J].地球科学进展,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.
- [18] 余琪祥,史政,王登高,等.塔里木盆地西北部氦气富集特征与成藏条件分析[J].西北地质,2013,46(4):215-222.
- YU Qixiang, SHI Zheng, WANG Denggao, et al. Analysis on helium enrichment characteristics and reservoir forming conditions in northwest Tarim Basin [J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 215-222.
- [19] 薛华锋,朱兴国,王润三,等.西安地热田伴生富氦天然气资源的发现及意义[J].西北大学学报(自然科学版),2004,34(6):751-754.
- XUE Huafeng, ZHU Xingguo, WANG Runsan, et al. The discovery and significance of rich helium natural gas resource in Xi'an geothermic field [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2004, 34(6): 751-754.
- [20] 冯子辉,霍秋立,王雪. 松辽盆地北部氦气成藏特征研究 [J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 27-30.
- FENG Zihui, HUO Qiuli, WANG Xue. A study of helium reservoir formation characteristic in the north part of Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(5): 27-30.
- [21] 常兴浩,宋凯. 巴什托构造石炭系小海子组高氦气藏成藏机理浅析 [J]. 天然气工业, 1997, 17(2): 30-32.
- CHANG Xinghao, SONG Kai. Analysis of reservoir forming mechanism of high He pool in the Carboniferous of Xiaohaizi Formation of Bashitou structure [J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(2): 30-32.
- [22] 高卓林. 鄂尔多斯盆地东部上古生界山西组山1、山2段气藏地质特征 [J]. 云南化工, 2018, 45(10): 220-221.
- GAO Zhuolin. Geological characteristics of the first and second sections of Shanxi Formation gas reservoir in the eastern Ordos Basin [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(10): 220-221.
- [23] 李明,高建荣. 鄂尔多斯盆地基底断裂与火山岩的分布 [J].

- 中国科学:地球科学,2010,40(8):1005-1013.
- LI Ming,GAO Jianrong.Basement faults and volcanic rock distributions in the Ordos Basin[J].Science China Earth Sciences, 2010,53(11):1625-1633.
- [24] 米敬奎.鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏的运聚特征[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所地球化学,2003.
- MI Jingkui.The migration and accumulation characters of the Upper Paleozoic gas reservoir in Ordos Basin[D].Guangzhou: Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,2003.
- [25] 姜福杰,贾承造,庞雄奇,等.鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J].石油勘探与开发,2023,50(2):250-261.
- JIANG Fujie,JIA Chengzao,PANG Xiongqi,et al.Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin,NW China[J].Petroleum Exploration and Development,2023,50(2):250-261.
- [26] SHAO Xinhe,PANG Xiongqi,JIANG Fujie,et al.Genesis and accumulation of natural gas in the Upper Palaeozoic strata of north-eastern Ordos Basin,China[J].Geological Journal,2019,54(6):3212-3225.
- [27] XI Shenglia,LIU Xinshe,MENG Peilong.Exploration practices and prospect of Upper Paleozoic giant gas fields in the Ordos Basin[J].Natural Gas Industry B,2015,2(5):430-439.
- [28] 蒙炳坤,周世新,李靖,等.上扬子地区不同类型岩石生氢潜力评价及泥页岩氢气开采条件理论计算[J].矿物岩石,2021,41(4):102-113.
- MENG Bingkun,ZHOU Shixin,LI Jing,et al.Helium potential evaluation of different types of rocks in the Upper Yangtze region and theoretical calculation of helium recovery conditions for shale in Upper Yangtze region[J].Mineralogy and Petrology, 2021,41(4):102-113.
- [29] 何衍鑫,田伟,王磊,等.基于自然伽马能谱测井的氦气资源评价方法:以塔里木盆地古城地区为例[J].天然气地球科学,2023,34(4):719-733.
- HE Yanxin,TIAN Wei,WANG Lei,et al.Quantifying the helium generation based on natural gamma-ray spectrometry data: Gucheng area,Tarim Basin[J].Natural Gas Geoscience,2023,34(4):719-733.
- [30] CHENG Anran,SHERWOOD LOLLAR B,GLUYAS J G,et al. Primary N₂-He gas field formation in intracratonic sedimentary basins[J].Nature,2023,615(7950):94-99.
- [31] PADRÓN E,PÉREZ N M,HERNÁNDEZ P A,et al.Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest[J].Geology, 2013,41(5):539-542.
- [32] 刘雨桐,段堃,张晓宝,等.基岩型富氦气藏形成条件:以柴达木盆地东坪气田和美国中部潘汉德—胡果顿气田为例[J].天然气地球科学,2023,34(4):618-627.
- LIU Yutong,DUAN Kun,ZHANG Xiaobao,et al.Formation conditions of helium-rich gas in bedrock reservoirs:taking Dongping Gas Field in Qaidam Basin and Panhandle-Hugoton Gas Field in central United States as examples[J].Natural Gas Geoscience, 2023,34(4):618-627.
- [33] BALLENTINE C J,BURGESS R,MARTY B.Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust[J].Reviews in Mineralogy and Geochemistry,2002,47(1):539-614.
- [34] IDLEMANA B D,ZEITLER P K,MCDANNELL K T.Characterization of helium release from apatite by continuous ramped heating[J]. Chemical Geology,2018,481:165.
- [35] SATHAYE K J,LARSON T E,HESSE M A.Noble gas fractionation during subsurface gas migration[J].Earth and Planetary Science Letters,2016,450:1-9.
- [36] 李平,马向贤,张明震,等.矿物中氦的扩散过程及控制因素研究进展[J].天然气地球科学,2023,34(4):697-706.
- LI Ping,MA Xiangxian,ZHANG Mingzhen,et al.Research progress on diffusion process and controlling factors of helium in minerals[J]. Natural Gas Geoscience,2023,34(4):697-706.
- [37] ZHANG Wen,LI Yuhong,ZHAO Fenghua,et al.Granite is an effective helium source rock:insights from the helium generation and release characteristics in granites from the north Qinling Orogen,China[J].Acta Geologica Sinica—English Edition, 2020,94(1):114-125.
- [38] 张涛,巩肖可,黄朝,等.鄂尔多斯盆地神木气田太原组低品质气藏储层微观特征及形成机理[J].石油实验地质,2024,46(1):32-45.
- ZHANG Tao,GONG Xiaoke,HUANG Chao,et al.Micro characteristics and formation mechanism of low-quality gas reservoirs in Taiyuan Formation of Shenmu Gas Field,Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2024,46(1):32-45.
- [39] BROWN A A.Formation of high helium gases;a guide for explorationists[R].W.Searchanddiscovery.Com,2010.
- [40] 邓伟,谭秀成,张道锋,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组马五₆亚段硬石膏产状类型与成因[J].古地理学报, 2022,24(2):226-244.
- DENG Wei,TAN Xiucheng,ZHANG Daofeng,et al.Occurrence types and genesis of anhydrite from the Ma₅₆ submember of Ordovician Majiagou Formation in central and eastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography,2022,24(2):226-244.
- [41] XU Wanglin,LI Jianzhong,LIU Xinshe,et al.Accumulation conditions and exploration directions of Ordovician lower assemblage natural gas,Ordos Basin,NW China[J].Petroleum Exploration and Development,2021,48(3):641-654.
- [42] 杨帅,陈安清,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地东部马家沟组含钾蒸发岩系沉积机制及保存条件[J].中国地质,2016,43(6): 2192-2201.
- YANG Shuai,CHEN Anqing,CHEN Hongde,et al.The sedimentation mechanism and preservation condition of the potassium evaporate series in the Majiagou Formation, east of Ordos Basin[J]. Geology in China,2016,43(6):2192-2201.
- [43] 马东焯,陈宇航,王应斌,等.鄂尔多斯盆地东部上古生界盖层封闭性能评价[J].天然气地球科学,2021,32(11):1673-1684.
- MA Dongye,CHEN Yuhang,WANG Yingbin,et al.Sealing capability evaluation of the Upper Paleozoic cap rock in the eastern Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience,2021,32(11):1673-1684.