石油与天然气地质
第44卷 第6期 OIL & GAS GEOLOGY 2023年12月

文章编号:0253-9985(2023)06-1546-09 doi:10.11743/ogg20230616

鄂尔多斯盆地氦源岩特征及生氦潜力

刘成林[1,2],丁振刚[1,2],陈践发[1,2],范立勇[3],康 锐[3],王海东[1,2],洪思婕[1,2],田安琦[1,2],陈学勇[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 长庆油田公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018]

摘要:氦源是氦气资源形成的首要条件,盆地基底变质岩、泥岩、泥质白云岩、煤和铝土岩等沉积岩为潜在氦源岩。通过野外地质调查、重磁资料解释、岩心描述与主、微量元素测试等方法,研究了鄂尔多斯盆地2大类5套潜在氦源岩及其成氦潜力。研究结果表明:鄂尔多斯盆地的潜在氦源岩分为基底型和沉积型两大类。基底型氦源岩发育在太古宇陆块及其上叠加的古元古界之中,岩性主要为高级变质片麻岩-变粒岩、大理岩、混合岩和花岗片麻岩,U和Th元素平均丰度分别为3.15×10^{-6}和12.38×10^{-6},生氦强度为0.735×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$。沉积型氦源岩主要发育在中元古界长城系沉积变质岩和古生界沉积岩之中。长城系黑色板岩主要分布在盆地北部和西南部,U和Th平均丰度分别为2.36×10^{-6}和8.28×10^{-6},生氦强度为0.522×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$;下古生界下奥陶统马家沟组泥质白云岩分布在盆地中部及东部,U和Th平均丰度分别为1.71×10^{-6}和9.80×10^{-6},生氦强度为0.487×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$;上古生界石炭系-二叠系泥岩和煤在全盆地广泛分布,太原组泥岩U和Th平均丰度分别为9.69×10^{-6}和22.68×10^{-6},生氦强度为1.82×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$,太原组煤U和Th平均丰度分别为16.12×10^{-6}和44.13×10^{-6},生氦强度为3.21×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$;上古生界石炭系铝土岩主要分布在盆地东部和西南部,U和Th平均丰度分别为7.14×10^{-6}和38.57×10^{-6},生氦强度为1.97×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$。鄂尔多斯盆地西南部发育各类氦源岩,具有"多源供氦"特征。该研究为鄂尔多斯盆地氦气资源勘查奠定了基础。

关键词:生氦潜力;氦源岩;氦气;天然气藏;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码**:A

Characteristics and helium-generating potential of helium source rocks in the Ordos Basin

LIU Chenglin[1,2], DING Zhengang[1,2], CHEN Jianfa[1,2], FAN Liyong[3], KANG Rui[3], WANG Haidong[1,2], HONG Sijie[1,2], TIAN Anqi[1,2], CHEN Xueyong[1,2]

[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*]

Abstract: Helium sources act as the primary element in generating helium resources. Potential helium source rocks encompass basement metamorphic rocks and various sedimentary rocks, such as mudstone, argillaceous dolomite, coal, and bauxite, in basins. Based on field geological surveys, gravity-magnetic data interpretation, core description, and major- and trace-element analyses, we investigate five suites of potential helium source rocks of two categories in the Ordos Basin and their helium-generating potential. The results show that two categories of potential helium source rocks, namely basement metamorphic rocks and sedimentary rocks, are developed in the studied basin. The helium source rocks of the basement type are found in the Archean land block and the superimposed Paleoproterozoic strata, dominated by high-grade metamorphic gneiss, granulite, marble, migmatite, and granitic gneiss, with average abundances of U and Th of 3.15×10^{-6} and 12.38×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 0.735×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$. On the other hand, the helium source rocks of the sedimentary type are primarily found in Changchengian metasedimentary rocks of the Mesoproterozoic strata and the Paleozoic sedimentary rocks. The Changchengian black slate is widely seen

收稿日期:2023-06-05;**修回日期**:2023-10-20。
第一作者简介:刘成林(1970—),男,教授、博士生导师,天然气成藏和资源评价。**E-mail**: liucl@cup.edu.cn。
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA071900)。

in the northern and southwestern Ordos Basin, and exhibits average abundances of U and Th of 2.36×10^{-6} and 8.28×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 0.522×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$. The argillaceous dolomite in the Lower Ordovician Majiagou Formation of the Lower Paleozoic strata, found in the central and eastern Ordos Basin, displays average abundances of U and Th of 1.71×10^{-6} and 9.80×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 0.487×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$. The Carboniferous-Permian mudstones and coals of the Upper Paleozoic strata are extensively distributed throughout the Ordos Basin. The Taiyuan Formation mudstones, among others, show average abundances of U and Th of 9.69×10^{-6} and 22.68×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 1.82×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$, while its coals exhibit average abundances of U and Th of 16.12×10^{-6} and 44.13×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 3.21×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$. The Carboniferous bauxite of the Upper Paleozoic strata, primarily occurring in the eastern and southwestern Ordos Basin, demonstrates average abundances of U and Th of 7.14×10^{-6} and 38.57×10^{-6}, respectively, and a helium-generating intensity of 1.97×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$. Various helium source rocks are discovered in the southwestern Ordos Basin, suggesting a multi-source helium supply. Overall, this study lays the foundation for helium resource exploration in the Ordos Basin.

Key words: helium-generating potential, helium source rock, helium, natural gas reservoir, Ordos Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20230616.

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. DOI: 10.11743/ogg20230616.

作为现代高科技产业无可替代的关键元素,氦气是重要的战略资源,全球氦资源主要集中在美国、阿尔及利亚和俄罗斯等少数国家。中国氦资源对外依存度极高,进口氦气的渠道和来源地又极为集中和有限,严重制约中国高科技产业和国家安全[1-3]。学者们对富氦常规气、致密气、水溶气藏形成条件开展了研究,取得的进展和认识为本文研究奠定了基础[4-16]。中国已在中部四川、鄂尔多斯等盆地,西部塔里木、柴达木等盆地,东部松辽、海拉尔、苏北、渤海湾等盆地,南方三水等盆地中发现富氦、高氦天然气藏[5-6, 16-25]。部分地区地热井和温泉中也有氦气发现[26-27]。

天然气中的氦主要有大气源、壳源(岩石中放射性U和Th元素衰变形成)和幔源(地球形成时赋存于地球深部的原始氦),多数具有商业价值的氦气资源主要为壳源氦。壳源氦源岩又分为壳源远源型与壳源近源型两种类型[28]。壳源远源型源岩主要包括高级变质片麻岩和变粒岩、大理岩、混合岩和花岗片麻岩等。例如渭河盆地富氦天然气藏的主要氦源岩为北秦岭广泛发育的富U花岗岩;东胜气田氦气主要来源于基底太古宇-元古宇的变质岩-花岗岩中U和Th元素的衰变[25,29]。壳源近源型源岩主要是富U和Th的沉积岩,特别是富有机质页岩。在地壳岩石中,由于吸附大量铀和钍元素且富有机质页岩的U和Th含量最高且氦气生成量最大,单位时间内富有机质页岩生成的氦气量是花岗岩的9~10倍。例如,四川盆地五峰组-龙马溪组富有机质页岩的U和Th含量高、厚度大、分布广,氦气资源潜力大[30-38]。

氦源是氦气资源形成的首要条件,氦源岩空间分布与氦源潜力评价是氦气资源勘查的关键问题。在野外地质调查、重磁资料解释、岩心描述及主、微量元素实验室分析测试等的基础上,系统分析不同U和Th元素含量岩石和矿物的成氦潜力,结合数值模拟定量评价鄂尔多斯盆地氦源潜力,厘定主力氦源;研究沉积盆地及其基底不同岩系的产氦丰度和强度。

1 氦气地质背景

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通西部变质结晶基底之上的多旋回叠合盆地,依据盆地演化历史、构造特征及基底特性的不同,可将盆地划分成6个一级构造单元: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[39]。

盆地天然气资源丰富,目前已发现苏里格、榆林等多个气田。其中,东胜气田氦气平均含量为0.133%,苏里格气田东区、中区、西区和南区均为0.042%~0.108%,榆林气田为0.032%,神木气田为0.029%,子洲米脂气田为0.041%,黄龙气田为0.233%,庆阳气田为0.068%,表明鄂尔多斯盆地天然气具有较高的氦气含量(图1)。

鄂尔多斯盆地潜在氦源岩的岩石类型主要是太古

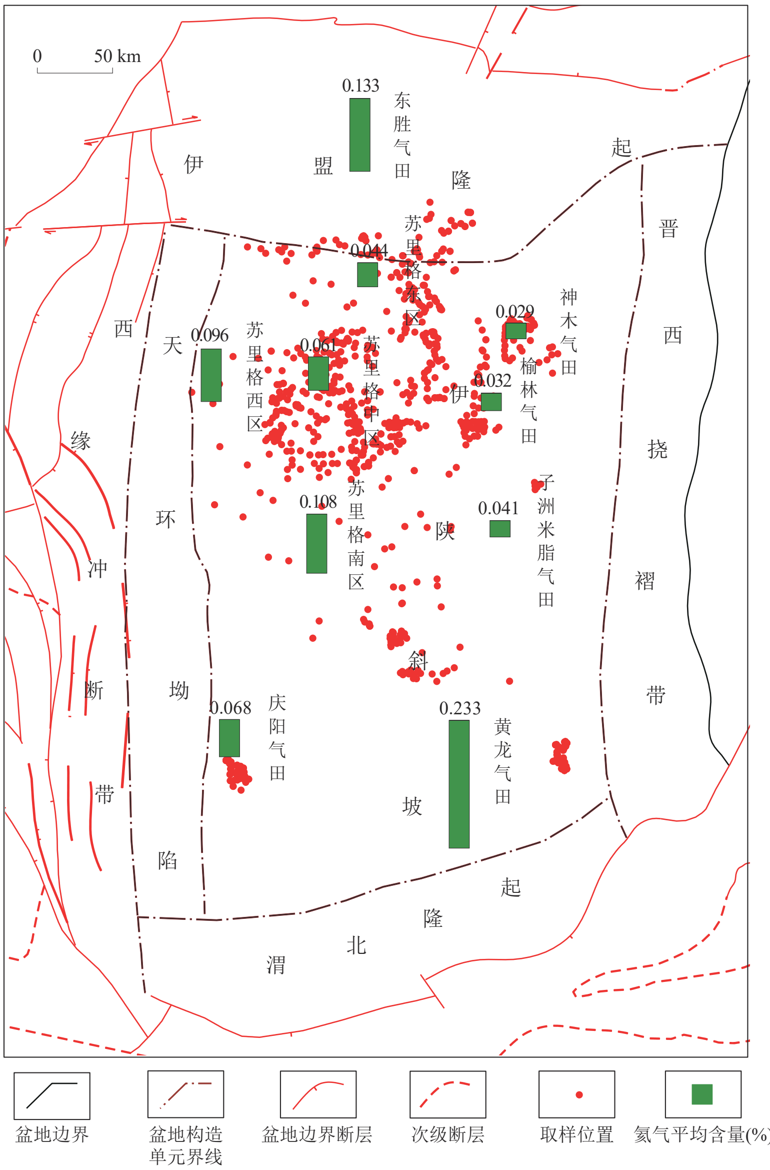

图1 鄂尔多斯盆地已发现含氦天然气田氦气丰度与样品采集点分布[39]

Fig. 1 Map showing the abundance of helium and relevant sampling points in helium-bearing gas fields discovered in the Ordos Basin[39]

宇-古元古界富含U和Th元素的花岗岩和花岗片麻岩等变质岩、中元古界长城系黑色板岩、下古生界下奥陶统马家沟组泥质含量较高的碳酸盐岩和上古生界上石炭统本溪组、下二叠统太原组与山西组的泥岩、煤及铝土岩(图2)。

2 基底型潜在氦源岩

基底经历了太古宙—古元古代构造运动,形成了一套整体磁性较强、以片岩、高级变质片麻岩和变粒岩为主的太古宇变质岩系与另一套整体磁性偏弱、以大理岩、混合岩和花岗片麻岩为主的古元古界变质岩系的稳定结晶基底(图3a—d)。太古宇陆块上叠加了古元古界,从北到南依次为乌拉山群、上集宁群-贺兰山群、恒山-吕梁群、界河口群和涑水-中条群。

基底西部石榴夕线黑云斜长片麻岩与东部片麻状二云母花岗岩的钻孔样品进行SHRIMP锆石U-Pb定年,分别获得了2 031 Ma±10 Ma和2 035 Ma±10 Ma的年龄[40]。北部乌拉山-大青山岩性主要为闪长质变质岩和碱性变质岩,狼山主要为闪长质变质岩,南部秦岭主要为花岗片麻岩。根据重力和磁力资料解释,太古宇和古元古界大致呈北东-南西向相间分布。根据放射性原理和铀、钍衰变方程[公式(1)][35],可计算出氦源岩的生氦强度。

$$^{4}He = 1.207 \times 10^{-13}U + 2.868 \times 10^{-14}Th \quad (1)$$

式中:^{4}He为氦源岩的生氦强度,10^{-6} cm^3/(a·g);U为铀

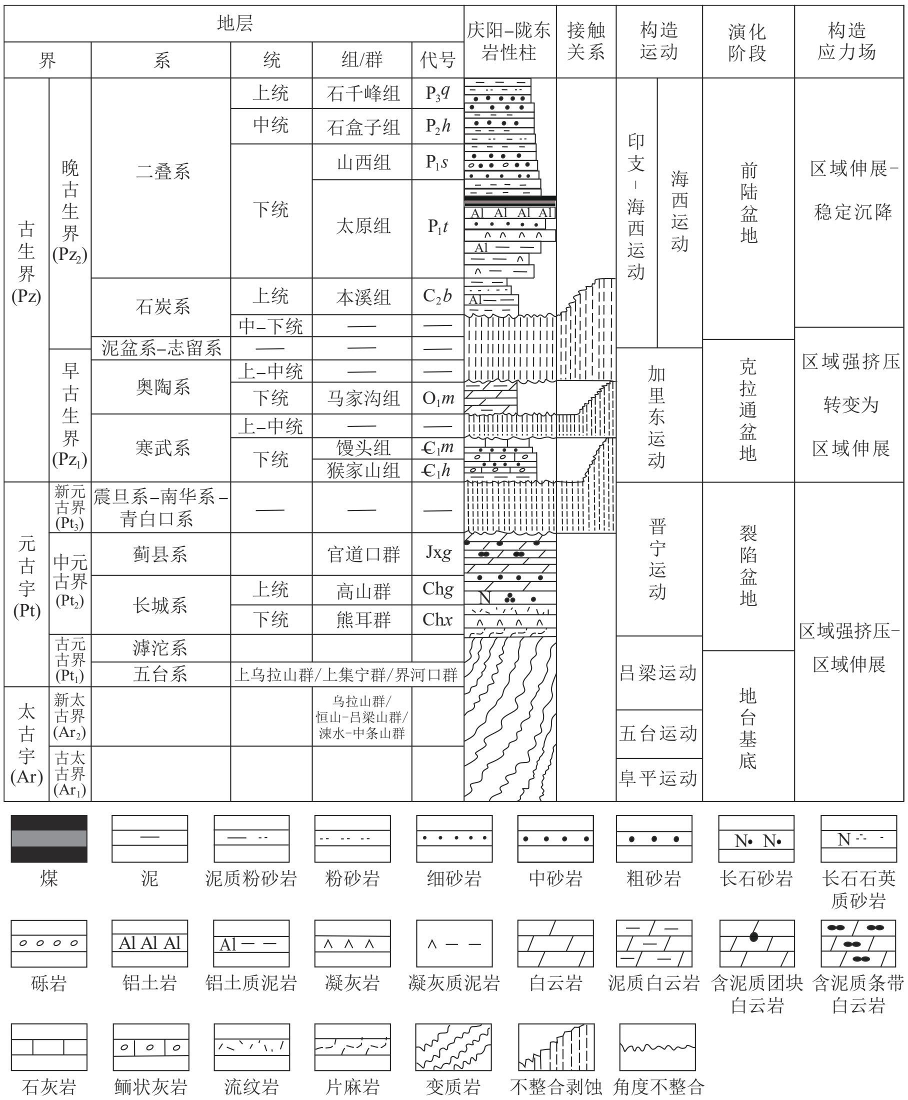

图2　鄂尔多斯盆地潜在氦源岩地层柱状图(据文献[39]修改)

Fig. 2　Stratigraphic column of potential helium source rocks in the Ordos Basin (modified from reference [39])

丰度,10^{-6};*Th* 为钍丰度,10^{-6}。

盆地基底岩石U和Th平均丰度分别为$1.29×10^{-6}$和$8.19×10^{-6}$,生氦强度为$0.391×10^{-6}$ $cm^3/(a·g)$(表1)。鄂尔多斯地区基底厚度远大于上覆沉积层,具有较高的生氦潜力。

3　沉积型潜在氦源岩

基底形成之后,盆地经历了晋宁、加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅等多期构造运动,形成了以陆相碎屑岩和碳酸盐岩为主沉积盖层,厚约3 000～8 000 m[41-48]。

3.1　长城系

中元古界长城系具明显裂陷槽式(拗拉谷)沉积特征,盆地西缘及南缘为主裂陷槽,可能代表了秦、祁、贺三叉裂谷系最早活动的沉积记录,厚度多在千余米及以上,向盆地西缘深坳陷区有明显加厚趋势,沉积厚度局部可达2 000～3 000 m。除了盆地东部,长城系在盆地均有分布,最大厚度可达1 000 m,岩性主要为石英砂岩(图3e)、长石(岩屑)石英砂岩、炭质板岩及结晶灰岩(大理岩)。长城系黑色板岩是潜在氦源岩,主要分布在盆地北部和西南部。中元古代初始年龄取1 717 Ma,U和Th元素平均丰度为$1.29×10^{-6}$和$2.49×10^{-6}$,生氦强度为$0.227×10^{-6}$ $cm^3/(a·g)$。由于中元古界长城系潜在氦源岩岩石年代较老,U、Th元素丰度较高,在平面和深度的发育规模也较大,可见其具有较高的生氦潜力。

3.2　下奥陶统马家沟组

下奥陶统马家沟组在鄂尔多斯盆地西南部中央古隆起和北部伊盟隆起缺失严重,主要发育在鄂尔多斯

表 1 鄂尔多斯盆地潜在氦源岩参数统计

Table 1 Parameter statistics of potential helium source rocks in the Ordos Basin

潜在层系	年龄/Ma	岩性	分布区	U 平均丰度*/10^{-6}	Th 平均丰度*/10^{-6}	生氦强度/[10^{-6} cm^3/(a·g)]
太古宇-下元古界	230 ~ 250	黑云母片岩、花岗片麻岩	北东-南西向条带	(3.97 ~ 0.26)/1.29(12)	(18.75 ~ 1.42)/8.19(12)	0.391
中元古界长城系	153.5 ~ 178.5	板岩	盆地北部、西南部	(4.33 ~ 0.39)/1.29(29)	(8.33 ~ 0.75)/2.49(29)	0.227
下古生界下奥陶统马家沟组	48.7	泥质白云岩	古陆周边	(8.98 ~ 1.53)/4.30(8)	(25.61 ~ 2.28)/10.60(8)	0.820
上古生界石炭系、二叠系	28.5±5	泥岩	全盆地	(16.12 ~ 3.22)/9.68(26)	(54.28 ~ 1.57)/22.68(26)	1.820
		煤	全盆地	(40.49 ~ 2.87)/14.99(15)	(88.12 ~ 2.00)/35.19(15)	2.820
		铝土岩	盆地西南部	(11.85 ~ 1.35)/7.14(11)	(59.39 ~ 6.33)/38.57(11)	1.970

注:*数据格式为最小值 ~ 最大值/平均值(样本数)。

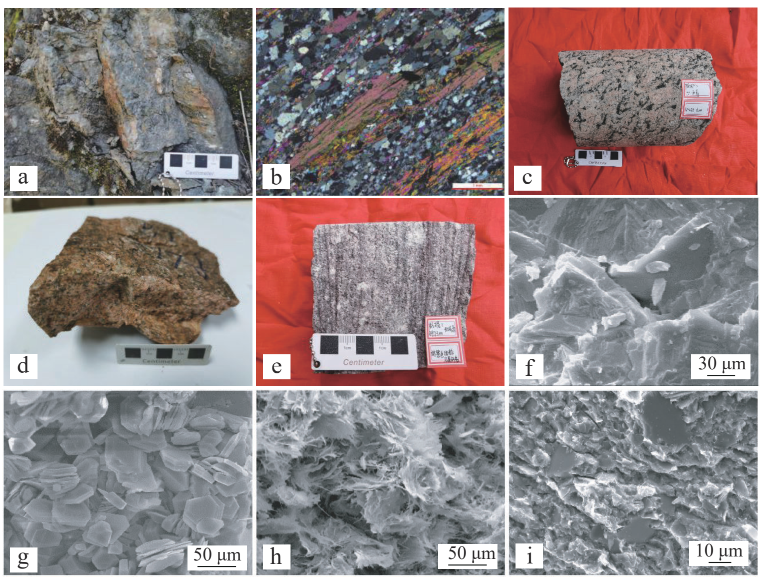

图 3 鄂尔多斯盆地潜在氦源岩特征照片

Fig. 3 Micrographs and pictures showing potential helium source rocks in the Ordos Basin

a. 深色二云母石英片岩,北秦岭,太古宇,野外露头;b. 深色二云母石英片岩(+),北秦岭,太古宇,薄片;c. 花岗片麻岩,杭探 2 井,太古宇,埋深 2 468.60 m,岩心;d. 紫苏花岗片麻岩,乌拉山-大青山,古元古界,野外露头;e. 石英砂岩,杭探 1 井,长城系,埋深 3 973.00 m,岩心;f. 泥质白云岩,米 109 井,马五段,埋深 2 410.82 m,SEM;g. 砂岩中的高岭石,米 109 井,本溪组,埋深 2 396.88 m,SEM;h. 砂岩中的伊利石,米 109 井,太原组,埋深 2 348.60 m,SEM;i. 铝土岩中的水铝石团块斑状分布,陇 81 井,太原组,埋深 3 910.19 m,SEM

盆地中东部,根据沉积演化特征,马家沟组可以分为 6 个段:马一段、马三段和马五段主要为蒸发台地沉积,岩性主要为膏盐岩和白云岩;马二段、马四段和马六段主要为碳酸盐台地沉积,岩性主要为白云岩和石灰岩[44]。以桃 61 井为例,马五段的白云岩夹有薄层泥质白云岩,厚度约为 45 m,Th 和 U 元素含量相对较高,具有一定的生氦潜力。

下古生界下奥陶统马五段泥质白云岩为潜在氦源岩(图 3f)[41],平均年龄为 487 Ma,U 和 Th 元素平均丰度分别为 4.30×10^{-6} 和 10.60×10^{-6},生氦强度为 0.820×10^{-6} cm^3/(a·g)。

3.3 石炭系-二叠系

上古生界石炭系-二叠系泥岩、炭质泥岩和煤是烃源岩,砂岩和铝土岩是天然气储层(图 3g—i)。泥岩和煤在全盆地广泛分布,平均年龄为 292 Ma,其中二叠系太原组泥岩 U 和 Th 元素平均丰度分别为 9.68×10^{-6} 和 22.68×10^{-6},泥岩厚度为 30 m 左右,生氦强度为 1.820×10^{-6} cm^3/(a·g);二叠系太原组煤 U 和 Th 元素平均丰度分别为 14.99×10^{-6} 和 35.19×10^{-6},最大厚度为 14 m,生氦强度为 2.820×10^{-6} cm^3/(a·g)。由于相较于基底氦源岩,上古生界石炭系-二叠系泥岩和煤的厚度不大,制

约了该层系的生氦潜力。

上古生界石炭系铝土岩主要分布在盆地东部和西南部。平均年龄为317 Ma,U和Th元素平均丰度分别为7.14×10^{-6}和38.57×10^{-6},生氦强度为1.97×10^{-6} $cm^3/(a\cdot g)$。铝土岩最大厚度约为15 m,厚度较小,极大地制约了其生氦潜力。鄂尔多斯盆地陇东地区太原组沉积环境和古地貌控制了铝土岩储层的分布,潜坑和阶地型微古地貌富集铝土岩。铝土岩储层的主要矿物为硬水铝石,Al_2O_3成分占90%以上,硬水铝石格架易溶矿物组分遭受溶蚀,形成大量溶蚀孔。铝土岩储集空间主要是颗粒内溶孔、基质溶孔、粒间溶孔、晶间孔隙及微裂隙等,孔径主要介于20～200 μm,整体上以亚微米-微米级孔喉为主,储层孔隙度平均为10.6%,渗透率平均为4.04×10^{-3} μm^2;气藏受岩性圈闭控制,燕山期盆地东部构造抬升,铝土岩储层上倾方向被非渗透性的铝土质泥岩层所限,存在岩性相变有效遮挡条件,有利于形成岩性圈闭,有利于氦气聚集[42]。

4　生氦潜力及潜在区预测

结合上述分析,指出了鄂尔多斯盆地潜在氦源岩的岩石类型主要是太古宇-古元古界富含U-Th元素的花岗岩和花岗片麻岩等变质岩,中-新元古界的石英岩、石英砂岩、结晶灰岩、大理岩和片岩等沉积变质

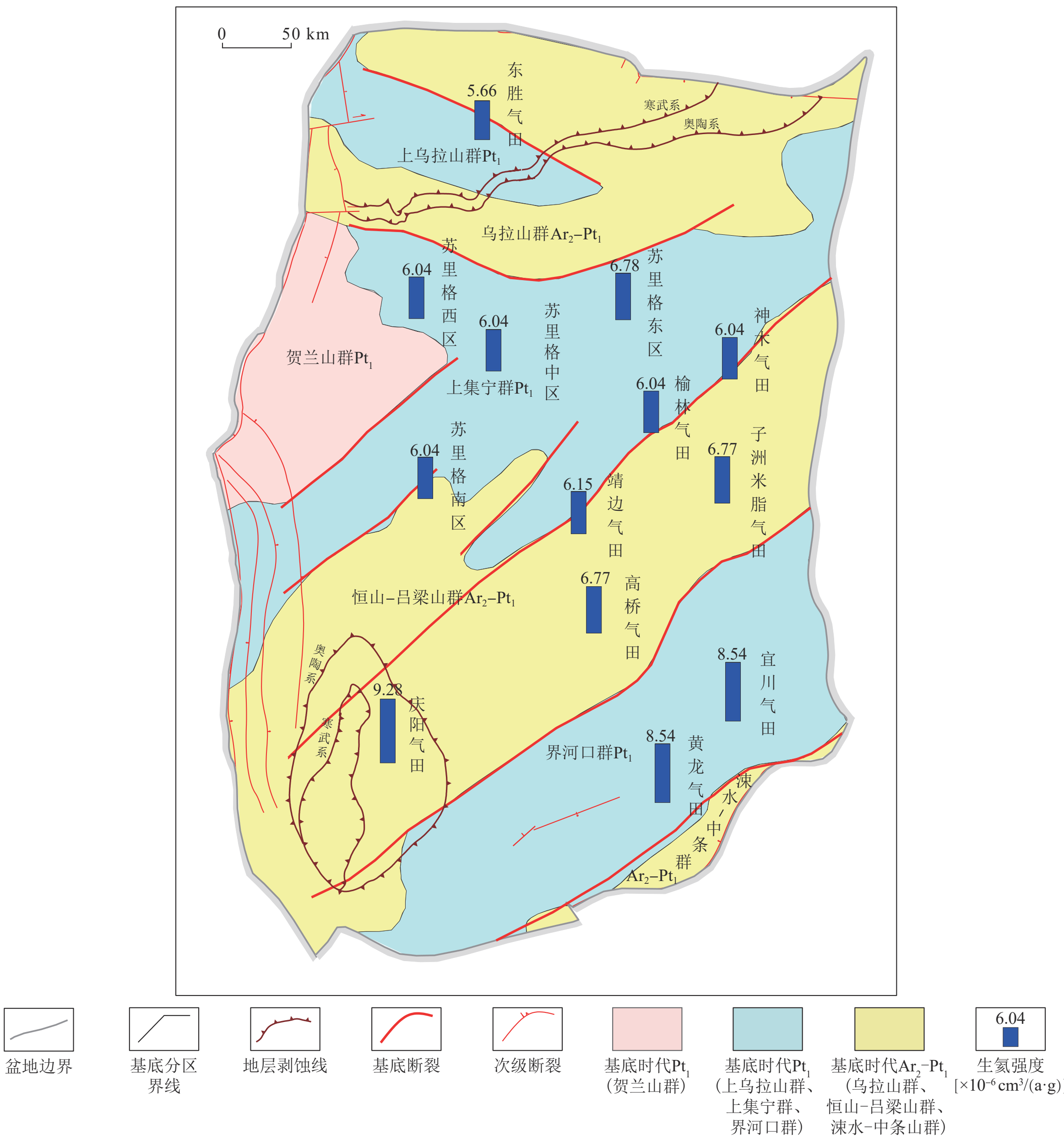

图4　鄂尔多斯盆地潜在氦源岩和生氦强度平面分布

Fig. 4　Planar distributions of potential helium source rocks and helium-generating intensities in the Ordos Basin

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。综合分析,生氦强度由强到弱依次为上古生界煤、上古生界铝土岩、上古生界泥岩、太古宇-古元古界花岗岩及变质岩、中-新元古界沉积变质岩和下古生界碳酸盐岩。但考虑到岩石年龄、氦源岩体积规模等氦源岩生氦潜力评价参数,对氦气生成的贡献仍需更深入的讨论。如太古宇-古元古界的花岗岩-变质岩系的厚度大,而沉积层系的厚度较小,例如石炭系-二叠系的煤系烃源岩厚度只有30 ~ 50 m,尽管其煤系烃源岩生氦强度更大,但单位时间生成的氦气总量远小于太古宇-古元古界的花岗岩-变质岩系。

受U和Th元素在氦源岩中的富集程度影响,鄂尔多斯盆地不同区域的生氦强度存在差异。整体上看,全盆地生氦强度在5.66×10^{-6} ~ 9.28×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,盆地南部的生氦强度较高,具有较高的生氦潜力(图4)。其中盆地西南部庆阳气田的氦源岩生氦强度最大,为9.28×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,而盆地北部东胜气田的氦源岩生氦强度最小,为5.66×10^{-6} $cm^3/(a·g)$。相较于鄂尔多斯盆地其他地区,各类潜在氦源岩在鄂尔多斯盆地西南部均有发育,具有"多源供氦"特征,氦源岩的体积规模优势较为明显,因此鄂尔多斯盆地西南部生氦潜力最大。

5 结论

1)鄂尔多斯盆地潜在氦源岩为地壳型,包括基底岩系和沉积岩系,主要是太古宇-古元古界富含U-Th元素的花岗岩和花岗片麻岩等变质岩、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及上古生界的泥岩、煤和铝土岩。

2)太古宇和古元古界基底岩系生氦强度为0.391×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,长城系板岩、下奥陶统马家沟组泥质白云岩及石炭系-二叠系泥岩、煤和铝土岩生氦强度分别为0.227×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,0.820×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,1.820×10^{-6} $cm^3/(a·g)$,2.820×10^{-6} $cm^3/(a·g)$和1.970×10^{-6} $cm^3/(a·g)$。

3)各类潜在氦源岩在鄂尔多斯盆地西南部均有发育,具有"多源供氦"特征,生氦强度大,是潜在的富氦天然气分布区。

参考文献

[1] BRADSHAW A M, HAMACHER T. Nuclear fusion and the helium supply problem[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9/10): 2694-2697.

[2] 王晓锋,刘文汇,李晓斌,等. 氦气资源的形成聚集与中国氦资源前景[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集,杭州,2019. 贵阳:中国矿物岩石地球化学学会,2019:1154-1155.
WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. The formation and accumulation of helium resources and the prospect of helium resources in China[C]//Abstracts of the 17th Annual Academic Conference of the Chinese Society of Mineral Petrogeochemistry, Hangzhou, 2019. Guiyang: Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2019: 1154-1155.

[3] 张哲,王春燕,王秋晨,等. 中国氦气市场发展前景展望[J]. 油气与新能源,2022,34(1):36-41.
ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Development prospects of China's helium market[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(1): 36-41.

[4] 王先彬. 稀有气体地球化学与宇宙化学及其应用前景[J]. 地质地球化学,1988,16(8):39-47.
WANG Xianbin. Rare gas geochemistry and cosmic chemistry and their application prospects[J]. Earth and Environment, 1988, 16(8): 39-47.

[5] 杜建国,刘文汇. 三水盆地天然气中的氦和氩同位素地球化学研究[J]. 天然气地球科学,1991,2(6):283-285.
DU Jianguo, LIU Wenhui. Helium and argon isotope geochemistry of natural gas in Sanshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 1991, 2(6): 283-285.

[6] 徐永昌,沈平,陶明信,等. 幔源氦的工业储聚和郯庐大断裂带[J]. 科学通报,1990,35(12):932-935.
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Mantle-derived helium industrial accumulation and Tanlu fault[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(12): 932-935.

[7] 徐永昌,沈平,刘文汇,等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——Ⅱ. 幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J]. 中国科学(D辑:地球科学),1996,26(2):187-192.
XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. The mantle-derived geochemical volatile in the natural gas-the new types of helium resources: The industry aggregation of mantle-derived helium in the deposition shell[J]. Science China Earth Sciences, 1996, 26(2): 187-192.

[8] 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. 地学前缘,1997,4(3/4):185-190.
XU Yongchang. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3/4): 185-190.

[9] 徐永昌,沈平,刘文汇,等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998.
XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Noble gas geochemistry in natural gas[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[10] 刘文汇,徐永昌. 沉积岩钾、氩分布与天然气氩同位素——以渤海湾、四川和鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报,1992,10(1):83-92.
LIU Wenhui, XU Yongchang. The distribution of K and Ar in sedimentary rock and the Ar isotope of natural gas from some oil-gas-bearing basins in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(1): 83-92.

[11] 刘文汇, 徐永昌. 氩同位素气源对比原理及应用条件[J]. 地质地球化学, 1994, 22(6): 9-12, 76.
LIU Wenhui, XU Yongchang. Principle and application conditions of argon isotope gas source correlation[J]. Geology-Geochemistry, 1994, 22(6): 9-12, 76.

[12] 樊然学. 氦、氩同位素分析在天然气成藏规律研究中的应用——以川西盆地中部天然气 He、Ar 同位素组成分析为例[J]. 质谱学报, 2000, 21(3/4): 183-184.
FAN Ranxue. Isotopic analysis of helium, argon and their application on accumulation mechanism of natural gases——Cases studies from the central area of western Sichuan Basin[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2000, 21(3): 2-11.

[13] 徐胜. 中国天然气中稀有气体丰度和同位素组成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(2): 71-74.
XU Sheng. Noble gas abundances and isotopes in natural gases in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16(2): 71-74.

[14] 徐胜, 徐永昌, 沈平, 等. 中国中西部盆地若干天然气藏中稀有气候同位素组成[J]. 科学通报, 1996, 41(12): 1115-1118.
XU Sheng, XU Yongchang, SHEN Ping, et al. The rare gas isotope composition in several basins in the west-middle basins in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(12): 1115-1118.

[15] 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.

[16] 刘全有, 戴金星, 金之钧, 等. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 107-114.
LIU Quanyou, DAI Jinxing, JIN Zhijun, et al. Geochemistry and genesis of natural gas in the foreland and platform of the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(1): 107-114.

[17] 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): 18-20.
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): 18-20.

[18] 曹忠祥, 车燕, 李军亮, 等. 济阳坳陷花沟地区高含 He 气藏成藏分析[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 395-399.
CAO Zhongxiang, CHE Yan, LI Junliang, et al. Accumulation analysis on a helium-enriched gas reservoir in Huagou area, the Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(4): 395-399.

[19] 王江, 张宏, 林东成. 海拉尔盆地乌尔逊含氦 CO_2 气藏勘探前景[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 109-111.
WANG Jiang, ZHANG Hong, LIN Dongcheng. Exploration prospect of helium-containing CO_2 gas reservoir in Urxun, Hailaer Basin[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(4): 109-111.

[20] 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.

[21] 杨春, 陶士振, 侯连华, 等. 松辽盆地火山岩储层天然气藏 He 同位素组成累积效应[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 109-115.
YANG Chun, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Accumulative effect of helium isotope in gas volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 109-115.

[22] 仵宗涛, 刘兴旺, 李孝甫, 等. 稀有气体同位素在四川盆地元坝气藏气源对比中的应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(7): 1072-1077.
WU Zongtao, LIU Xingwang, LI Xiaofu, et al. The application of noble gas isotope in gas-source correlation of Yuanba reservoir, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1072-1077.

[23] 张晓宝, 周飞, 曹占元, 等. 柴达木盆地东坪氦工业气田发现及氦气来源和勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1585-1592.
ZHANG Xiaobao, ZHOU Fei, CAO Zhanyuan, et al. Finding of the Dongping economic helium gas field in the Qaidam Basin, and helium source and exploration prospect [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(11): 1585-1592.

[24] 陈践发, 刘凯旋, 董勍伟, 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.

[25] 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田——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.

[26] 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.

[27] 张文, 李玉宏, 王利, 等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 236-244.
ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 236-244.

[28] 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.

[29] 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(S1): 47-53.

LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Distribution of the helium-rich wells and helium derivation in Weihe Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(S1): 47-53.

[30] 蒙炳坤，周世新，李靖，等. 上扬子地区不同类型岩石生氦潜力评价及泥页岩氦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.

[31] 聂海宽，刘全有，党伟，等. 页岩型氦气富集机理与资源潜力——以四川盆地五峰组-龙马溪组为例[J]. 中国科学：地球科学，2023, 53(6): 1285-1294.
NIE Haikuan, LIU Quanyou, DANG Wei, et al. Enrichment mechanism and resource potential of shale-type helium: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(6): 1285-1294.

[32] TORGERSEN T, CLARKE W B. Helium accumulation in groundwater, I: An evaluation of sources and the continental flux of crustal ^4He in the Great Artesian Basin, Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(5): 1211-1218.

[33] 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.

[34] 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.

[35] BROWN A A. Formation of high Helium gases: A guide for explorationisits[C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, April 2010, 11-14.

[36] 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.

[37] 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.

[38] HAND E. Massive helium fields found in rift zone of Tanzania [J]. Science, 2016, 353(6295): 109-110.

[39] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律，[M]. 北京：石油工业出版社，2002.
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.

[40] 胡健民，刘新社，李振宏，等. 鄂尔多斯盆地基底变质岩与花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年[J]. 科学通报，2012, 57(26): 2482-2491.
HU Jianmin, LIU Xinshe, LI Zhenhong, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Ordos Basin basement and its tectonic significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(26): 2482-2491.

[41] 吴东旭，周进高，任军峰，等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系[J]. 地球科学，2023, 48(2): 553-567.
WU Dongxu, ZHOU Jingao, REN Junfeng, et al. Reconstruction of depositional environment and source-reservoir configuration relationship of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 553-567.

[42] 胡安平，沈安江，张杰，等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. 石油与天然气地质，2022, 43(4): 943-956.
HU Anping, SHEN Anjiang, ZHANG Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 943-956.

[43] 刘池洋，王建强，张东东，等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. 石油与天然气地质，2021, 42(5): 1011-1029.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.

[44] 任战利，祁凯，李进步，等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. 石油与天然气地质，2021, 42(5): 1030-1042.
REN Zhanli, QI Kai, LI Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1030-1042.

[45] 李相博，王宏波，黄军平，等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质，2021, 42(5): 1043-1055.
LI Xiangbo, WANG Hongbo, HUANG Junping, et al. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1043-1055.

[46] 包洪平，邵东波，郝松立，等. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J]. 地学前缘，2019, 26(1): 33-43.
BAO Hongping, SHAO Dongbo, HAO Songli, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 33-43.

[47] 张涛，张亚雄，金晓辉，等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩层系层序地层模式及其对源-储的控制作用[J]. 石油与天然气地质，2023, 44(1): 110-124.
ZHANG Tao, ZHANG Yaxiong, JIN Xiaohui, et al. Sequence stratigraphy models of carbonate-evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 110-124.

[48] 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.

（编辑 张亚雄）