



引文格式: 韩伟, 任军峰, 李成福, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化对富氦天然气富集的控制作用初探[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 1-10. DOI: 10.12401/j.nwg.2025004

Citation: HAN Wei, REN Junfeng, LI Chengfu, et al. Preliminary Study On the Controlling Effect of Tectono-Thermal Evolution on Helium-Rich Natural Gas Enrichment in Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 1-10. DOI: 10.12401/j.nwg.2025004

鄂尔多斯盆地构造热演化对富氦天然气富集的控制作用初探

韩伟¹, 任军峰², 李成福³, 康锐², 刘家涛⁴, 魏嘉怡^{2,*}, 李吉庆⁵, 周学荣⁶

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 3. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810000; 4. 青海省核工业地质局, 青海 西宁 810000; 5. 青海省第四地质勘查院, 青海 西宁 810001; 6. 中国冶金地质总局青海地质勘查院, 青海 西宁 810000)

摘要: 鄂尔多斯盆地众多气田中仅东胜气田等个别气田具备氦气资源前景, 说明天然气与氦气的富集过程存在一定差异, 而温度对这两种气体富集均十分重要。笔者从盆地构造热演化的角度探索天然气成藏与氦气富集之间的关系。通过统计鄂尔多斯盆地基底的氦源矿物及其氦封闭温度, 结合盆地构造热演化史, 分析烃源岩、氦源矿物分布及天然气生成和氦气释放的时空特征, 讨论天然气与氦气的富集过程。结果表明鄂尔多斯盆地内气源岩以上古生界烃源岩为主, 分布集中且埋藏较浅, 氦源矿物以锆石、独居石和磷灰石为主, 分布分散且埋藏较深, 烃源岩生气与主要氦源矿物释放氦气的温度、时间重合度较高, 二者的富集过程具有时空耦合关系。此外, 由于天然气生成的量大且集中, 氦气释放的量小而分散, 在距离烃源岩沉降中心较近的原生气藏, 氦气难以富集, 而距离烃源岩沉降中心较远, 距离氦源基底较近的次生气藏往往有利于氦气富集成藏。本次研究将构造热演化与天然气富集成藏和氦气释放结合开展研究, 开拓新思路, 对完善氦气资源调查评价体系具有指示意义。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 构造热演化; 天然气; 氦气; 富集

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0001-10

Preliminary Study On the Controlling Effect of Tectono-Thermal Evolution on Helium-Rich Natural Gas Enrichment in Ordos Basin

HAN Wei¹, REN Junfeng², LI Chengfu³, KANG Rui², LIU Jiatao⁴, WEI Jiayi^{2,*}, LI Jiqing⁵, ZHOU Xuerong⁶

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2025-01-06; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金项目“盆地热演化对壳源氦气富集成藏的控制作用——以渭河盆地为例”(S2024-JC-YB-0817), 中国石油长庆油田分公司重大科技专项“鄂尔多斯盆地地震格架大剖面综合解释与基础地质研究”(2023DZZ02), 2024年度青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划 A 类项目“柴达木盆地北缘氦气资源成藏机理及勘探开发”, 国家重点研发计划“富氦天然气成藏机制及氦资源分布预测技术-复杂地质介质中氦气运聚及富氦气藏封盖机制研究”(2021YFA0719003), 中国地质调查局项目“全国氦气资源潜力评价与战略选区调查”(DD20221665)联合资助。

作者简介: 韩伟(1981-), 男, 正高级工程师, 主要从事油气及非常规能源地质调查。E-mail: hw_198196@163.com。

* 通讯作者: 魏嘉怡(1993-), 女, 工程师, 从事天然气勘探与区域地质综合研究。E-mail: weijiy1993_cq@petrochina.com.cn。

- (1. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. Geological Survey of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China; 4. Qinghai Nuclear Industry Geological Bureau, Xining 810000, Qinghai, China; 5. The Fourth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China; 6. Qinghai Geology Exploration Institute, China Metallurgical Geology General Bureau, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Among the numerous gas fields in the Ordos Basin, only a few gas fields such as Dongsheng Gas Field have the potential for helium gas resources, indicating that there are certain differences in the enrichment process of natural gas and helium, and temperature is very important for the enrichment of both gases. This article explores the relationship between natural gas accumulation and helium enrichment from the perspective of basin tectonic thermal evolution. By analyzing the helium source minerals and their helium sealing temperatures in the basement of the Ordos Basin, combined with the tectonic and thermal evolution history of the basin, this study analyzes the distribution of hydrocarbon source rocks and helium source minerals, as well as the spatiotemporal characteristics of natural gas generation and helium release, and discusses the enrichment process of natural gas and helium. The results show that the upper Paleozoic hydrocarbon source rocks in the Ordos Basin are mainly distributed and shallowly buried, and the helium source minerals are mainly zircon, monazite and apatite, which are dispersed and deeply buried. The temperature and time coincidence of the gas in the source rocks and the helium released by the main helium source minerals are high, and the enrichment process of the two has a spatio-temporal coupling relationship. In addition, due to the large and concentrated amount of natural gas generated and small and dispersed amount of helium released, it is difficult to enrich helium in the primary gas reservoir near the settlement center of the source rock, while the secondary gas reservoir far from the settlement center of the source rock and near the base of the helium source is often conducive to the rich and integrated accumulation of helium gas. In this study, structural thermal evolution is combined with natural gas rich accumulation and helium release, which opens up new ideas and has certain significance for improving the helium resource investigation and evaluation system.

Keywords: Ordos Basin; tectono-thermal evolution; Natural gas; Helium; enrichment

目前,世界范围内工业开发的氦气基本都来自沉积盆地中的富氦天然气藏(载体气为 CH_4 、 N_2 、 CO_2 等),其中天然气主要来源于烃源岩演化,氦气主要来源于氦源岩中放射性元素(氦源矿物)衰变,属壳源氦气(Ballentine et al., 2002; Brown et al., 2010; Dana-balan et al., 2016; 李玉宏等, 2017, 2018, 2022; Halford et al., 2022; 司庆红等, 2023; 马勇等, 2025; 邹易等, 2025)。中国多个含油气盆地都有氦气相关的报道,但氦气的分布并不均匀(李玉宏等, 2018; 陶小晚等, 2019)。例如,孕育了丰富天然气资源的鄂尔多斯盆地,目前仅东胜气田、庆阳气田和黄龙气田氦气含量较高,有望成为大型氦气田,且盆地内各气田中氦气含量差异较大(刘成林等, 2024; 冯旭亮等, 2025),说明氦气富集与天然气成藏具有一定的差异性,也是目前氦气资源调查评价的难点之一。

温度在天然气(氦气载体气)生成、富集成藏过程

中至关重要,研究盆地的热演化史可以了解盆地地层的温度演化过程及天然气成藏期次等关键信息(任战利等, 2008)。同时,已有大量的研究表明温度对氦的释放影响显著(Mitchell et al., 1981; Delaporte et al., 2011; 李平等, 2023),甚至认为地温升高会促进壳源氦的释放,从而导致氦气具有幕式释放的特征(Delaporte et al., 2011)。因此,研究含有富氦天然气藏的盆地的热演化史,在认识天然气生成和富集成藏过程的同时,兼顾地层温度变化对氦气释放的影响,可以探索氦气富集与天然气成藏间的关系,为富氦天然气成藏理论体系提供新的信息。

笔者拟通过分析温度对鄂尔多斯盆地内烃源岩生烃、富集成藏及氦源矿物释放氦气过程的作用,结合盆地构造热演化史和烃源岩、氦源矿物的分布特征,探讨氦气富集与天然气成藏之间的关系,为氦气释放机理研究和调查评价方法提供新的思路。

1 鄂尔多斯盆地烃源岩及氦源矿物分布特征

鄂尔多斯盆地是一个大型克拉通盆地,自早元古代基底形成后,经历了多期构造改造。早古生代处于被动大陆边缘环境,奥陶纪末,盆地整体抬升,缺失志留系—下石炭统,晚古生代中石炭世再次开始并持续接受沉积,沉积环境逐渐由海相转变为陆相;直到中生代晚期早白垩世被再次强烈改造,岩石圈厚度明显减薄,盆地经历了一期构造热事件,这一期构造热事件对盆地油气生成、富集及成藏有着非常重要的控制作用;新生代以来,受远程构造运动的影响,盆地东部

相对隆升,周缘形成了一系列规模不同的断陷(刘池洋等, 2021; 任战利等, 2021; 王君贤等, 2023)。

由于研究区叠合了多个世代沉积,受不同时期沉积构造特征影响,盆地内沉积环境及沉降中心不断改变(表1),并在不同层系、不同地区发育了多套烃源岩作为盆地油气的稳定来源。目前,已明确发育中元古界及下古生界海相、上古生界海陆过渡相和中生界湖相等4套烃源岩。其中,上古生界煤系烃源岩是目前盆地天然气的主要源岩,几乎遍布全盆地,但沉降中心主要位于盆地西缘、东缘,以及中部靖边—延安一带,下古生界烃源岩是次要源岩,分布范围较小,主要位于盆地西缘和南部(图1,表1)(刘池洋等, 2021; 任战利等, 2021; 王君贤等, 2023)。

表1 鄂尔多斯盆地烃源岩分布特征

Tab. 1 Distribution characteristics of source rocks in Ordos Basin

烃源岩层系	沉降中心		成熟期
中生界	盆地西、南部	环县、庆阳、店头	侏罗纪—早白垩世
上古生界	盆地西、东缘及中部	银川—环县、延安西北、绥德以东、神木	中晚侏罗世—白垩世
下古生界	盆地西、南部	鄂托克前旗、铜川	张夏组成熟于中石炭世—早二叠世, 马家沟组成熟于二叠纪—三叠纪, 平凉组成熟于中晚三叠世
中元古界	盆地西南部	银川、平凉、西安	晚二叠世—中三叠世进入生烃门限, 在晚侏罗世—早中白垩世生干气

近年来,众多学者对鄂尔多斯盆地富氦天然气开展研究,基本明确该盆地氦气为壳源氦气(魏泽坤等, 2023; 常洋梅等, 2025),主要来源于地壳中放射性元素U、Th衰变,并将富铀、钍矿物相对富集的岩石定义为“氦源岩”,认为该盆地主要的潜在氦源岩是盆地基底太古界—下元古界的变质岩及花岗岩,铝土岩和不同时期的烃源岩等富铀、钍矿物的岩石也可为富氦天然气提供一定氦源(李玉宏等, 2018; 何发岐等, 2022; 范立勇等, 2023; 陶士振等, 2023; 刘成林等, 2024)。由于盆地基底的变质岩及花岗岩具有强磁性特征,范立勇等(2023)通过磁力资料分析了该盆地主要的基底氦源岩分布,发现这些高磁异常区主要分布于盆地北部巴彦淖尔—包头、磴口—达拉特旗、乌海—乌审召,中部平凉—庆阳以及佳县一带和盆地东南韩城—运城一带。

由于目前尚没有明确的“氦源岩”岩性定义及相关参数,而其中富铀、钍矿物才是衰变释放氦气的关键所在。因此,笔者将这些矿物定义为“氦源矿物”,并将其作为研究重点。张乔等(2022)曾对渭河盆地周缘花岗岩开展研究,其中富铀、钍矿物以锆石、

磷灰石、独居石及榍石等U、Th类质同象矿物最为常见(张文, 2019)。张成立等(2021)对鄂尔多斯盆地基底变质岩及花岗岩的矿物组成开展了详细研究,笔者对其进行整理,发现这些矿物以锆石、磷灰石和独居石等为主(表2)。

综上所述,可以认为鄂尔多斯盆地古生界烃源岩(气源岩)主要分布在盆地西部、东部和南部,分布层位相对较浅且较为集中;而氦源矿物占比最大的基底岩体主要分布在盆地北部和东南部,埋藏较深且较为分散,铝土岩等其他氦源岩也较为分散地分布于不同地区、不同层系,主要分布层位相对较深。

2 温度与天然气生成和氦气释放的关系

烃源岩中的有机质在达到一定温度时即可演化生烃,盆地构造热演化史可详细表征烃源岩演化、生烃过程。大量研究发现,烃源岩在180~250℃之间将大量生成凝析气和湿气,在250~375℃之间将主要生成以甲烷为主的干气(张厚福等, 1999)。任战利等(2008, 2021)根据多种方法研究了鄂尔多斯盆地油

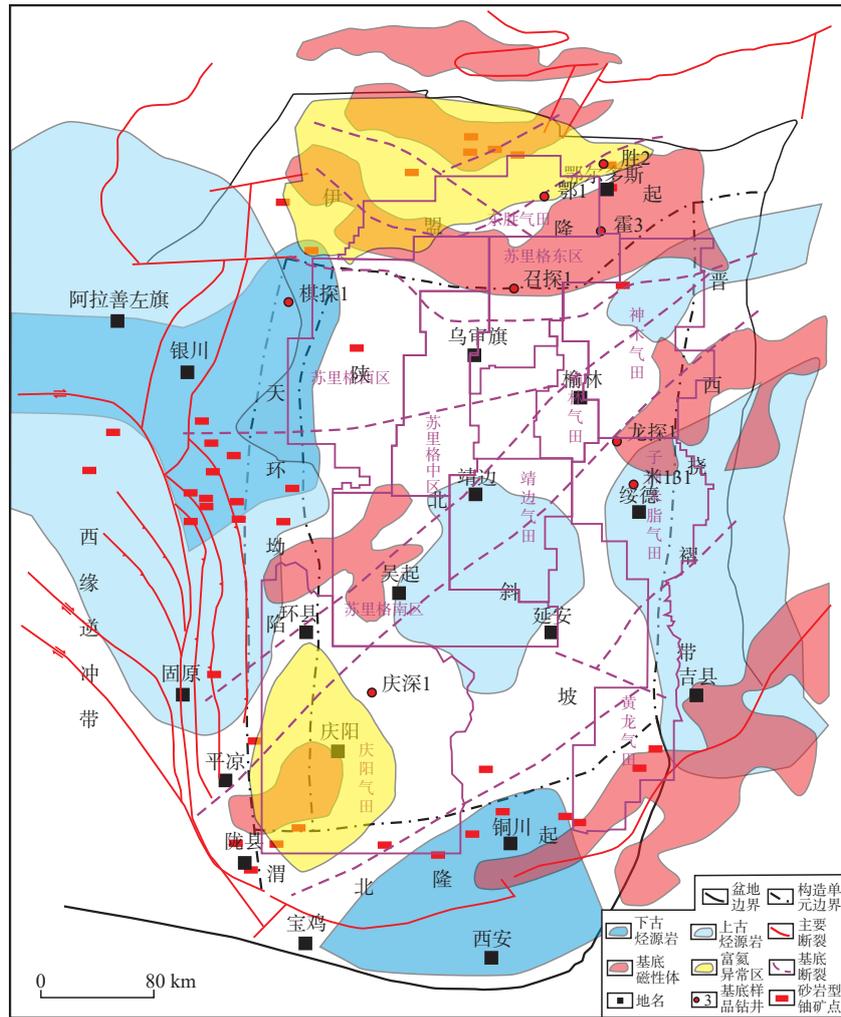


图1 鄂尔多斯盆地烃源岩沉降中心及基底磁性体等分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of source rock subsidence center and basement magnetic body in Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地基底岩石中富铀、钍矿物统计(据张成立等, 2021)

Tab. 2 Statistics of uranium and thorium rich minerals in basement rocks of Ordos Basin

序号	井号	基底岩性	富铀钍矿物	构造位置	深度(m)
1	胜2井	混合岩化黑云母花岗片麻岩	磁铁矿、磷灰石、锆石、独居石	伊盟隆起	1 749~1 758
2	霍3井	夕线石榴二长片麻岩	锆石、钛铁矿		2 985~2 988
3	鄂1井	二长花岗岩	锆石、磷灰石		2 796~2 797.5
4	召探1井	二云母片麻岩	钛铁矿、锆石、独居石	天环向斜	3 515~3 519
5	棋探1井	石榴夕线黑云片麻岩	锆石、独居石、金红石、钛铁矿	陕北斜坡	5 233
6	龙探1井	黑云二长片麻岩	锆石、钛铁矿、独居石		3 085
7	米131井	黑云二长片麻岩	锆石、磷灰石	铜川起	3 310
8	庆深1井	黑云母花岗质片麻岩	锆石、磷灰石、钛铁矿、独居石		4 608~4 610

气藏的主要充注期及形成期为早白垩世: 上古生界煤系烃源岩作为最主要的天然气源岩, 在中晚侏罗世—早白垩世大量生气; 下古生界烃源岩作为次要来源, 在早、中侏罗世生油, 到早白垩世持续升温, 导致生成的油形成裂解气。综上所述, 鄂尔多斯盆地古生界两套烃源岩大规模生成天然气, 并充注及成藏均主要发

生在早白垩世。

放射性元素 U、Th 广泛地分布于地质体中, 在氢源矿物中相对较为富集, 其进行 α 衰变产生氦的过程不受任何外界条件影响。因此, 衰变产生的氦的释放过程(初次运移)是氦气富集的关键基础之一 (Dana-balan et al., 2017; 李玉宏等, 2018, 2022)。

大量的研究表明温度对氦的释放影响显著 (Mitchell et al., 1981; 李平等, 2023), 其核心是氦源矿物的封闭温度 (Farley et al., 2000; Zhang et al., 2020), 不同的氦源矿物对氦的封闭温度各不相同。前人在对渭河盆地、柴达木盆地等有富氦天然气显示的地区开展研究发现, 这些盆地及周缘花岗岩中的氦源矿物主要以锆石、磷灰石、独居石及榍石等 U、Th 类质同象矿物最为常见 (张文, 2019; 张乔等, 2022)。鄂尔多斯盆地基底变质岩和花岗岩中氦源矿物是以锆石、磷灰石和独居石等为主 (表 2), 其中锆石的封闭温度为

170~190 °C, 磷灰石为 75±7 °C, 独居石为 241 °C (Dodson et al., 1973; Zhang et al., 2020)。

综上所述, 温度对烃源岩生烃和氦源矿物释放氦气都有很重要的作用, 并且还有一定的重合范围, 比如烃源岩在大量生成凝析气和湿气的温度范围恰好也是锆石和独居石释放氦气的区间。因此, 笔者推测这二者在混合成藏的过程中有一定的耦合关系 (图 2), 并依据锆石等常见氦源矿物对氦的封闭温度划分了氦源矿物对氦的封闭带 (图 3): 即将小于 60 °C 划为氦气封闭带, 这一温度与烃源岩生烃门限温度和磷灰石

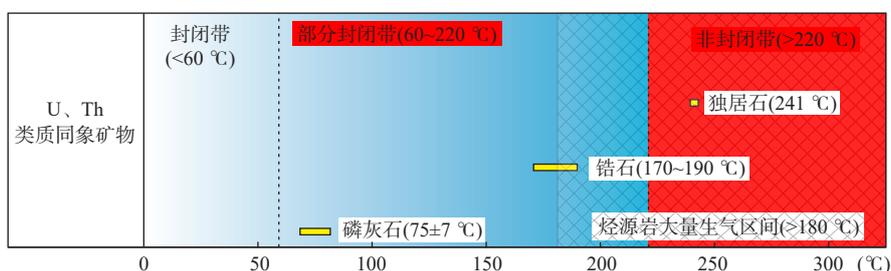


图2 鄂尔多斯盆地基底主要氦源矿物的氦封闭温度区间

Fig. 2 Helium sealing temperature range of main helium source minerals in Ordos Basin basement

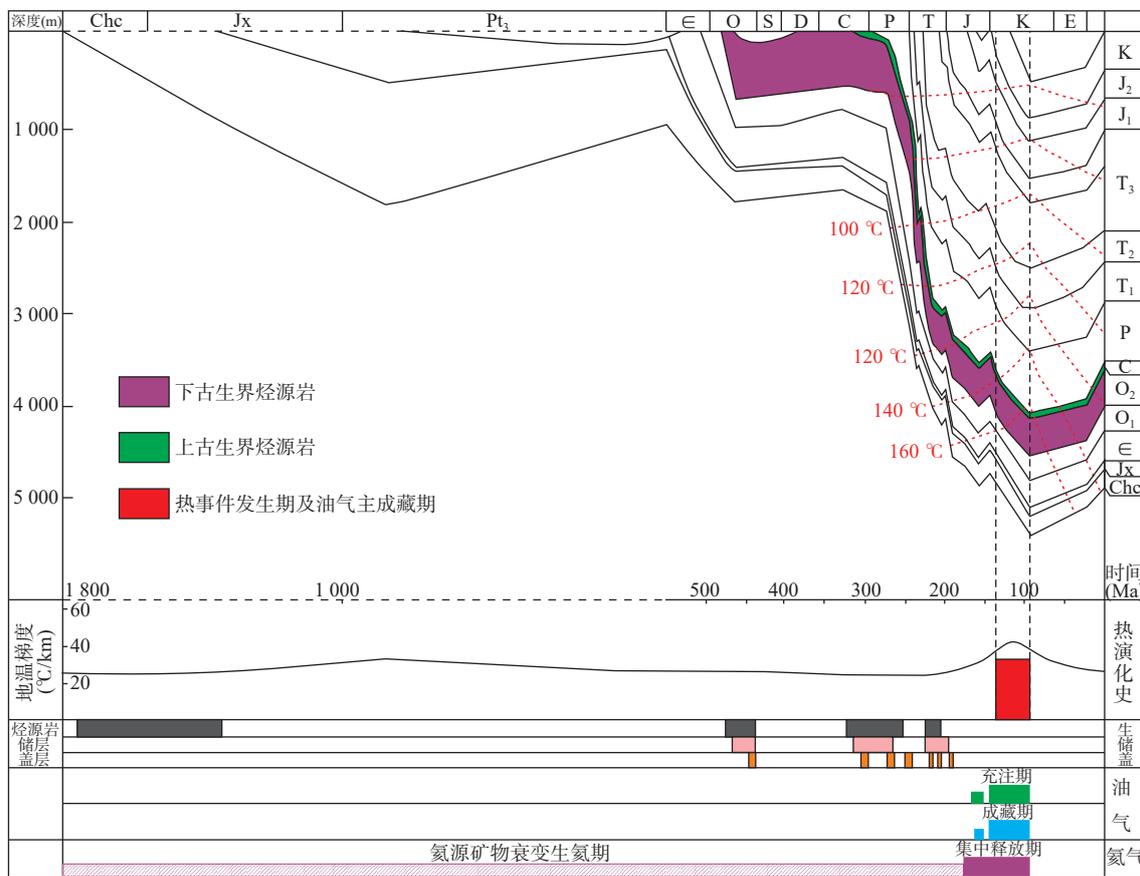


图3 鄂尔多斯盆地油气成藏、氦气释放时期与热事件对应关系

Fig. 3 Corresponding relationship between hydrocarbon accumulation, helium release periods and thermal events in the Ordos Basin

的封闭温度较为接近,在该区间内很少有天然气生成,且主要氦源矿物尚未进入氦封闭温度,所释放氦气有限,少量普通矿物和 U、Th 独立矿物释放的氦气难以得到保存;60~220 °C 为部分封闭带,这一区间内烃源岩开始大量生成天然气,氦气也有了富集成藏的载体,且磷灰石、锆石等主要氦源矿物进入氦封闭温度,开始释放氦气,但仍有独居石等主要氦源矿物尚未进入封闭温度;大于 220 °C 为非封闭带,这一区间烃源岩进入大量生气阶段,且几乎所有氦源矿物都无法封闭氦气。因此,结合前文烃源岩生烃温度,可认为 180 °C 以上是烃源岩大量生气的温度区间,也可能是氦源矿物释放氦气的主要温度区间。

3 鄂尔多斯盆地天然气藏及富氦天然气藏分布特征

鄂尔多斯盆地的天然气源以上古生界石炭系—二叠系煤系烃源岩为主,以下古生界奥陶系碳酸盐岩为辅。其中,下古生界天然气藏主要呈 SN 向分布在陕北斜坡的乌审旗—榆林到志丹—安塞一带,上古生界天然气藏几乎遍布陕北斜坡,甚至分布于伊盟隆起的杭锦旗一带,即东胜气田(刘池洋等,2021)。通过油源对比等研究显示,来自盆地中部的成熟煤型气除了形成于烃源岩发育区附近以外,可通过同世代层系(石炭系—二叠系),以水平运移的方式从盆地中部向盆地北、东北和东部地势较高的区域运移,进而保存成藏(刘池洋等,2021)。

刘成林等(2024)通过对鄂尔多斯盆地含氦天然气的富集影响因素研究认为,氦气含量较高的天然气藏主要分布在盆地北部东胜气田、西南部庆阳气田和东南部黄龙气田,含气层位均为上古生界石炭系—二叠系,且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。范立勇等(2023)认为鄂尔多斯盆地基底变质岩系为盆地内部的氦气富集提供了气源条件,断裂活动为氦气运移提供了通道。

就目前鄂尔多斯盆地内天然气藏和富氦天然气藏的分布特征而言,下古生界天然气藏主要分布于陕北斜坡中北部一带,多为近源的原生气藏,其中未见氦气富集;上古生界天然气藏分布较广,但距离气源较近的苏里格、靖边气田中氦气含量较低,而距离气源较远的东胜气田、庆阳气田和黄龙气田中氦气较为富集。富氦天然气藏与基底强磁性体分布有较好的

相关性(图 1)。

4 讨论

4.1 烃源岩、氦源矿物与富氦天然气藏的分布特征

鄂尔多斯盆地由于多世代叠合的特征,在不同地质历史时期沉积了多套烃源岩,其中古生界烃源岩是目前天然气藏的主要源岩。这些烃源岩分布较为集中,经过不断地埋深和演化,达到成熟并转化为天然气,进而形成天然气藏。其中下古生界烃源岩形成的天然气藏运移距离较近,主要分布在盆地腹地,上古生界烃源岩形成的成熟煤型气除了分布在近源的盆地腹地以外,还通过同世代层系长距离运移至盆地北部的伊盟隆起等地。

壳源氦气主要来源于地层岩石中的富铀、钍矿物衰变,但地质体中富铀、钍矿物丰度极低,目前鄂尔多斯盆地富铀、钍矿物相对含量高的岩石种类较多,其中基底变质岩和花岗岩由于其极大的体量,被认为是氦气的主要来源,但富铀、钍矿物的分布整体较为分散。目前,已明确的富氦天然气藏主要分布在东胜气田和庆阳气田以及盆地东南部,且含气层位均为上古生界地层。这些气藏距离上古生界烃源岩的沉降中心均较远(图 2),且与磁性基底的分布重合度较高,验证了氦气的“弱源性”和“伴生性”(范立勇等,2023),即氦气主要来源于体量巨大的基底变质岩和花岗岩,需要以天然气作为载体气,且多在天然气源相对较弱、氦气源相对较强的地区(次生气藏)混合成藏。此外,还说明天然气的运移过程对氦气富集也十分重要。

4.2 热演化约束下烃源岩生烃与氦源矿物释放氦气的特征

烃源岩受沉积特征控制,不仅分布较为集中,其生烃期在热演化的控制下也较为集中。任战利等(2021)通过对鄂尔多斯盆地烃源岩热模拟实验以及盆地深部热动力演化史研究认为,早白垩世岩石圈减薄的深部热动力学过程及构造热事件是盆地油气富集的重要原因之一,鄂尔多斯盆地不同层位烃源岩在早白垩世生烃量明显增加,大规模生油、生气并保存成藏。

氦源矿物衰变产生的氦的释放过程(初次运移)是氦气富集的关键之一。目前,普遍认为氦气释放、富集过程可能与 α 衰变、矿物裂隙及重结晶、地层应

力变化及温度等多种因素有关(Ballentine et al., 2002; 韩伟等, 2014, 2020; 李玉宏等, 2018; Zhang et al., 2019a, 2019b), 但有关氦气释放的认识尚有争议, 其中一种认为氦的释放过程是漫长而稳定的(Torgersen et al., 1985a, 1985b; Andrews et al., 1985; Barry et al., 2017; Zwahlen et al., 2017); 另一种认为地温升高会促使壳源氦幕式释放(Torgersen et al., 1985a)。鉴于氦气难以被保存以及“弱源性”和成藏时对载体气的依赖性特征, 笔者认为这两种释放过程兼而有之, 第一种氦气释放过程很难使氦气直接保存并形成富氦天然气藏, 但可使部分氦气溶解于不在开放体系内的地层水中, 在后期构造抬升或构造变动时, 地层水进入循环体系, 也可使部分氦气进入气藏, 这一过程与富氦天然气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值研究(韩伟等, 2020)以及秦胜飞等(2022)对中国中西部地区古老地层水脱氦富集研究成果相符; 而第二种幕式释放过程由于氦气释放与天然气生成基本同步, 二者同时进入运移体系, 更有利于氦气与天然气混合保存成藏。

目前, 鄂尔多斯盆地揭示的盆地基底岩石中的氦源矿物以锆石、磷灰石和独居石为主。通过对烃源岩集中生气的温度条件和鄂尔多斯盆地基底中氦源矿物的氦封闭温度统计, 结合盆地埋藏史研究发现(图3), 在早白垩世之前, 位于沉积盖层及基底中的氦源矿物始终处于漫长的衰变生氦阶段; 在石炭纪—二叠纪时期, 由于不断地埋深, 磷灰石等氦封闭温度较低的氦源矿物已经开始释放氦气, 但其释放氦气的量较小, 部分氦气会溶于地层水, 沿盆地断裂运移、释放至地层中, 这一过程在盆地受到构造改造时或断裂活

动时更为有利; 到早白垩世, 所有深埋的氦源矿物均进入氦非封闭带, U、Th元素含量更高(生氦量更高)的锆石和独居石等开始集中释放氦气。与此同时, 古生界烃源岩开始大量生气, 天然气在不断运移的过程中裹挟着相对少量而分散的游离氦气进入圈闭, 进而保存成藏。

4.3 天然气成藏与氦气富集的耦合关系

氦气分子直径仅为0.26 nm, 远小于作为泥页岩盖层以30~100 nm为主的孔喉直径, 就已有的天然气储盖组合特征而言, 几乎无法自身保存成藏(邹才能等, 2014; 李玉宏等, 2022a), 因此很难在天然气成藏之前形成独立氦气藏。此外, 米敬奎等(2003)模拟计算了鄂尔多斯盆地上古生界储层中次生包裹体的捕获压力约为21~32 MPa, 虽然远小于气藏形成时的静水压力, 但壳源氦气弱源、分散的特征, 以及与天然气之间巨大的通量差决定其更加难以在天然气藏形成之后进入气藏, 形成局部富集。目前, 虽然没有方法能够确定氦气进入天然气藏的准确时间。但是, 笔者通过对烃源岩生烃与氦源矿物释放氦气的特征研究, 表明烃源岩集中生气期与氦源矿物集中释氦期基本同步, 说明天然气和氦气的成藏过程存在一定的耦合关系, 需要说明的是此处的耦合关系仅指在构造热演化的作用下氦气释放与天然气生成具有一定的同步性, 有利于二者保存成藏(图4)。秦胜飞等(2023)对氦气与氦气富集耦合作用开展了研究, 认为氦气与氦气可能都主要来自于古老基底岩石, 并溶于地层水, 通过地层水的运移而被释放, 二者存在一定耦合关系。这一认识与前文所述氦气缓慢释放过程较为一致。此

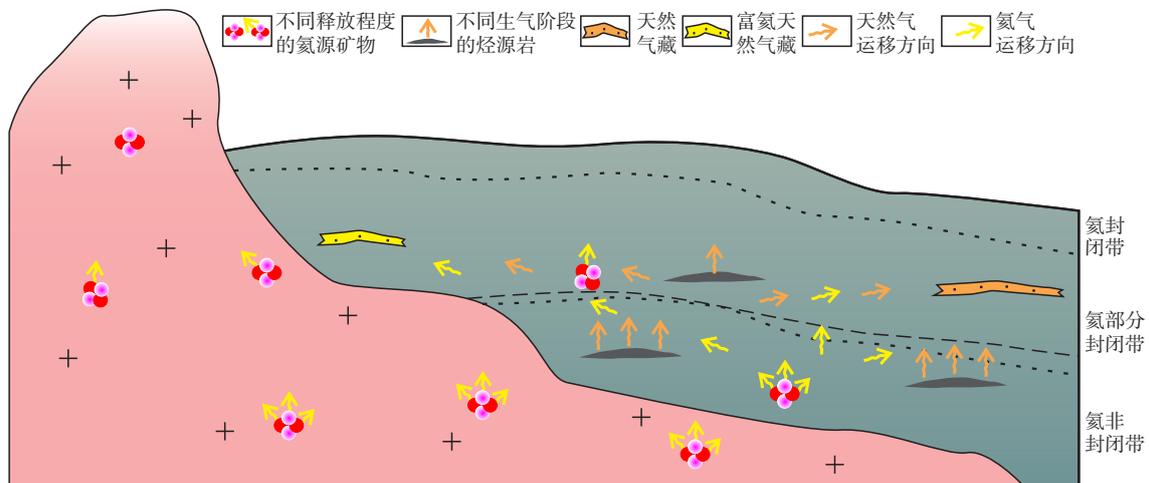


图4 天然气、氦气耦合成藏过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gas and helium coupling reservoir formation process

外,任战利等(2008, 2021)认为鄂尔多斯盆地天然气主要在早白垩世充注、成藏,而晚白垩世—新生代,盆地内部已形成的油气藏存在调整,即次生气藏的形成过程。按照本次研究的认识,这一调整过程也是富氦天然气藏形成的关键时期。

这一认识很好地解释了天然气藏中富含氦气的原因,即地质体中分散的氦源矿物在漫长的地质时期中不断地生成氦气,除重结晶及矿物晶体受破坏释放部分氦气以外,生成的氦气被保存在矿物晶格之中,总体而言位于沉积盖层下部的基底花岗岩等中氦气量更大;分布较为集中的烃源岩在盆地热演化的作用下,温度不断升高,达到最大热演化程度并进入主生气期,这一温度区间与锆石、独居石等氦源岩对氦的封闭温度基本一致。因此,可以认为烃源岩的主生气期与氦源矿物的主释放期基本同步。此外,大量天然气在运移时,可裹挟着散布在运移通道中的游离氦气一起进入运移系统,受天然气和氦气的通量影响,在距离烃源岩沉降中心较近的原生气藏中,氦气含量极低,而在距离烃源岩沉降中心较远的次生气藏中,氦气含量通常较高。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地富氦天然气藏均位于距离气源岩较远的次生气田,与氦源矿物富集的磁性基底有良好的相关性,氦气富集与天然气运移过程密切相关。

(2)鄂尔多斯盆地基底中氦源矿物以锆石、磷灰石和独居石为主,其中生氦量更高的独居石和锆石的氦封闭温度与古生界烃源岩大量生气的门限温度区间重合度高。根据多个含有富氦天然气的盆地中主要氦源矿物对氦封闭温度及氦气成藏的特性,划分出氦封闭带($<60\text{ }^{\circ}\text{C}$)、部分封闭带($60\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$)和非封闭带($>220\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

(3)在构造热演化控制下,天然气成藏与氦气富集均主要发生在早白垩世,且具耦合关系,推测鄂尔多斯盆地富氦天然气成藏期为早白垩世天然气主成藏期以及晚白垩世—新生代天然气藏调整期。

参考文献(References):

常洋梅,刘超,孙蓓蕾.鄂尔多斯盆地东缘石西区块氦源岩有效性评价及空间展布特征[J].煤田地质与勘探,2025,53(6):

129-142.

CHANG Yangmei, LIU Chao, SUN Beilei. Effectiveness assessment and spatial distribution characteristics of helium source rocks in the Shixi Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 129-142.

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 Changan, LI Jinbu, et al. Distribution of helium resources in Ordos Basin based on magnetic data[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1780-1789.

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.

冯旭亮,汪啸东,罗姣,等.鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景:来自居里面深度的证据[J].西北地质,2025,58(3):22-32.

FENG Xuliang, WANG Xiaodong, LUO Jiao, et al. Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 22-32.

韩伟,李玉宏,卢进才,等.陕西渭河盆地富氦天然气异常的影响因素[J].地质通报,2014,33(11):1836-1841.

HAN Wei, LI Yuhong, LU Jincai, et al. The factors responsible for the unusual content of helium-rich natural gas in the Weihe Basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(11): 1836-1841.

韩伟,刘文进,李玉宏,等.柴达木盆地北缘稀有气体同位素特征及氦气富集主控因素[J].天然气地球科学,2020,31(3):385-392.

HAN Wei, LIU Wenjin, LI Yuhong, et al. Characteristics of rare gas isotopes and main controlling factors of radon enrichment in the northern margin of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(3): 385-392.

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.

李玉宏,周俊林,张文,等.渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M].北京:地质出版社,2018,1-289.

李玉宏,李济远,周俊林,等.氦气资源评价相关问题认识与进展[J].地球科学与环境学报,2022,44(2):1-11.

LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Research progress and new views on evaluation of helium resources[J]. Journal of

- Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 1–11.
- 李玉宏, 张国伟, 周俊林, 等. 氦气资源调查理论与技术研究现状及建议[J]. 西北地质, 2022a, 55(4): 1–10.
- LI Yuhong, ZHANG Guowei, ZHOU Junlin, et al. Research Status and Suggestions on Helium Resource Investigation Theory and Technology[J]. Northwestern Geology, 2022a, 55(4): 1–10.
- 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.
- 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.
- 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.
- 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等. 利用包裹体信息研究鄂尔多斯盆地上古生界深盆气的运移规律[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 46–51.
- MI Jingkui, XIAO Xianming, LIU Dehan, et al. Study on Upper-Paleozoic deep basin gas migration in Ordos using inclusion information[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5): 46–51.
- 马勇, 辛志源, 陈践发, 等. 煤系氦气扩散机制及其对氦气富集的启示—以沁水盆地北部太原组为例[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 58–69.
- MA Yong, XIN Zhiyuan, CHEN Jianfa, et al. Diffusion mechanisms of coal-measure helium and their implications for helium accumulation: A case study of the Taiyuan Formation, northern Qinshui Basin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 58–69.
- 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.
- 秦胜飞, 周国晓, 李济远, 等. 氦气与氮气富集耦合作用及其重要意义[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1981–1992.
- QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Jiyuan, et al. The coupling effect of helium and nitrogen enrichment and its significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1981–1992.
- 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 502–506.
- REN Zhanli, LIU Li, CUI Junping, et al. Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 502–506.
- 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.
- 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.
- 司庆红, 曾威, 刘行, 等. 临汾—运城盆地氦气富集要素及成藏条件[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 129–141.
- SI Qinghong, ZENG Wei, LIU Xing, et al. Analysis of Helium Enrichment Factors and Reservoir Forming Conditions in Linfen–Yuncheng Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 129–141.
- 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 中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, 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.
- 王君贤, 李子颖, 贺锋, 等. 鄂尔多斯盆地南部烃源岩分布与铀成矿关系研究[J]. 铀矿地质, 2023, 39(6): 933–949.
- WANG Junxian, LI Ziyang, HE Feng, et al. Study on the Relationship of Hydrocarbon Source Rock Distribution to Uranium Mineralization in the Southern Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 2023, 39(6): 933–949.
- 魏泽坤, 冯旭亮, 马佳月, 等. 鄂尔多斯盆地东南部重磁场特征及其氦气勘探意义[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 98–110.
- WEI Zekun, FENG Xuliang, MA Jiayue, et al. Characteristics of Gravity and Magnetic Field and their Significance of Helium Resources Exploration in the Southeastern Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 98–110.
- 张乔, 周俊林, 李玉宏, 等. 渭河盆地南缘花岗岩中生氦元素(U、Th)赋存状态及制约因素研究—以华山复式岩体为例[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 241–256.
- ZHANG Qiao, ZHOU Junlin, LI Yuhong, et al. The Occurrence State and Restraint Factors of Helium-produced Elements (U, Th) in

- the Granites from the Southern Margin of Weihe Basin: Evidences from Huashan Complex[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 241–256.
- 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&Technology-Beijing, 2019.
- 张成立, 苟龙龙, 白海峰, 等. 鄂尔多斯地块基底研究新的思考与认识[J]. *岩石学报*, 2021, 37(1): 162–184.
- ZHANG Chengli, GOU Longlong, BAI Haifeng, et al. New thinking and understanding for the researches on the basement of Ordos Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(1): 162–184.
- 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 石油工业出版社, 1999.
- 邹才能, 陶士振, 侯莲花, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- Andrews J N. The isotopic composition of radiogenic helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers[J]. *Chemical Geology*, 1985, 49(1–3): 339–351.
- 邹易, 罗情勇, 陈践发, 等. 含氦-富氦气藏氦气竞争溶解物理模拟实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 96–108.
- ZOU Yi, LUO Qingyong, CHEN Jianfa, et al. Physical simulation experiments on competitive dissolution of helium in helium-containing to helium-rich gas reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 96–108.
- 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.
- Barry P H, Lawson M, Meurer W P, et al. Determining fluid migration and isolation times in multiphase crustal domains using noble gases[J]. *Geology*, 2017, 45(9): 775–778.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[C]. AAPG Conference, 2010: 11–14.
- Delaporte-Mathurin R, Ialovega M, Hodillee A, et al. Influence of exposure conditions on helium transport and bubble growth in tungsten[J]. *Scientific Reports*, 2011, 11(1): 14681.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson C G, et al. New High-Grade Helium Discoveries in Tanzania[J]. V. M. Goldschmidt Conference-Program and Abstracts, 2016, 26: 595.
- Danabalan D. Helium: Exploration Methodology for a Strategic Resource[D]. England Durham, Durham University, 2017.
- Danabalan D, Gluyas LG, Macpherson C G, et al. The Principles of Helium Exploration[J]. *Petroleum Geoscience*, 2022, 28(2): 1–13.
- Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 40(3): 259–274.
- Farley K A. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2000, 105(B2): 2903–2914.
- Halford D T, Karolytè R, Barry P H, et al. High Helium Reservoirs in the Four Corners Area of the Colorado Plateau, USA[J]. *Chemical Geology*, 2022, 596: 120790.
- Mitchell D J, Patrick R C. Temperature dependence of helium release from erbium tritide films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1981, 19(2): 236–242.
- 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*, 1985a, 49(5): 1211–1218.
- Torgersen T, Ivey G N. Helium accumulation in groundwater. II: A model for the accumulation of the crustal 4He degassing flux[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985b, 49(11): 2445–2452.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019a, 251: 229–246.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Quantifying the helium and hydrocarbon accumulation processes using noble gases in the North Qaidam Basin, China[J]. *Chemical Geology*, 2019b, 525: 368–379.
- 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*, 2020, 94(1): 114–125.
- Zwahlen C A, Kampman N, Dennis P, et al. Estimating carbon dioxide residence time scales through noble gas and stable isotope diffusion profiles[J]. *Geology*, 2017, 45(11): 995–998.