

9-25-2024

Accumulation mechanisms and resource potential of helium in coal measures: A case study of the eastern margin of the Ordos Basin

LIU Xiangbai

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China, xiangbai_liu@163.com

TAO Shizhen

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China, tsz@petrochina.com.cn

YANG Xiuchun

PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, et al. (2024) "Accumulation mechanisms and resource potential of helium in coal measures: A case study of the eastern margin of the Ordos Basin," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 9, Article 7.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.07.0443

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss9/7>

This Coal Geology, Mine Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Accumulation mechanisms and resource potential of helium in coal measures: A case study of the eastern margin of the Ordos Basin

Authors

LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, ZHAO Qun, CHEN Yanyan, LIU Ziyang, PEI Xiangbing, WANG Longfei, YI Wei, FENG Jianqiu, ZHANG Tan, GAO Jianrong, TAO Xiaowan, LIU Zhuangxiaoxue, LI Chaozheng, YANG Yiqing, and CHEN Yue



移动阅读

刘祥柏, 陶士振, 杨秀春, 等. 煤系氦气富集机理与资源潜力——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 49–66. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.07.0443

LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, et al. Accumulation mechanisms and resource potential of helium in coal measures: A case study of the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 49–66. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.07.0443

煤系氦气富集机理与资源潜力

——以鄂尔多斯盆地东缘为例

刘祥柏¹, 陶士振^{1,*}, 杨秀春², 赵群¹, 陈燕燕¹, 刘自扬², 裴向兵², 王龙飞², 伊伟²,
冯建秋², 张谭², 高建荣¹, 陶小晚¹, 柳庄小雪¹, 李超正¹, 杨怡青¹, 陈悦¹
(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 【背景】氦气因其化学性质稳定、导热性能好等优势, 被广泛应用于国防、军工、航空、航天等高科技领域, 具有不可替代的作用。目前我国氦气主要源于进口, 对外依存度高, 氦气资源安全问题突出。前人对氦气的研究主要集中在常规天然气, 对煤系氦气的关注较少。【目的和方法】为了明确煤系中氦气资源分布及资源潜力, 对鄂尔多斯盆地东缘(鄂东缘)煤系气进行取样分析, 系统研究氦气分布规律及其控制因素。并结合沁水盆地煤层气中氦气测试结果, 对比这两大盆地煤系中氦气富集机理, 深入研究煤系中氦气资源潜力。【结果和结论】结果表明: 鄂东缘韩城和大宁-吉县深部煤层气中氦气含量高于中浅部煤层气, 其中, 韩城深部和中浅部煤层中氦气平均体积分数分别为 0.042 8% 和 0.013 0%, 大宁-吉县深部和中浅部煤层中氦气平均体积分数分别为 0.030 7% 和 0.012 1%; 煤系致密气和深部煤层气中氦气含量相当, 其中, 韩城和大宁-吉县致密气中氦气平均体积分数分别为 0.046 7% 和 0.035 5%, 但都属于贫氦煤层气; 三交北区块煤系气中氦气含量较高, 平均 0.093 0%, 近一半的井可以达到富氦煤系气标准。鄂东缘煤系中原位自生氦气极少, 主要来源于深部基底岩石、铝土岩和紫金山岩体, 氦源岩的分布决定了煤系中氦气的分布。鄂东缘断裂系统是深部氦源和紫金山岩体中氦气的有利运移通道, 断裂系统的发育强度和位置是氦气运移、聚集的关键, 有效的盖层和封闭的水体环境是氦气保存的必要条件。沁水盆地原位自生氦气较少, 成藏后期剧烈构造抬升是煤层氦气散失近 90% 的主要原因。深部煤层气和煤系致密气中氦气浓度相对较低, 但是资源量巨大, 应加大煤系氦气资源勘查力度。同时, 应加强对贫氦-含氦煤系天然气的提氦技术攻关, 有效利用煤系天然气中的低浓度氦气, 以保障国家的氦气资源安全。

关键词: 煤系气; 氦气; 富集机理; 资源潜力; 鄂尔多斯盆地; 沁水盆地

中图分类号: P618.13; TE122 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)09-0049-18

Accumulation mechanisms and resource potential of helium in coal measures: A case study of the eastern margin of the Ordos Basin

LIU Xiangbai¹, TAO Shizhen^{1,*}, YANG Xiuchun², ZHAO Qun¹, CHEN Yanyan¹, LIU Ziyang², PEI Xiangbing²,
WANG Longfei², YI Wei², FENG Jianqiu², ZHANG Tan², GAO Jianrong¹, TAO Xiaowan¹,
LIU Zhuangxiaoxue¹, LI Chaozheng¹, YANG Yiqing¹, CHEN Yue¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China)

收稿日期: 2024-07-05; 接收日期: 2024-08-27

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术项目(2021ZG13)

第一作者: 刘祥柏, 1991 年生, 男, 江苏连云港人, 博士(后)。E-mail: xiangbai_liu@163.com

*通信作者: 陶士振, 1966 年生, 男, 安徽阜阳人, 博士, 教授级高级工程师。E-mail: tsz@petrochina.com.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: [Background] Helium, with advantages such as stable chemical properties and high thermal conductivity, has been extensively applied in high-tech sectors like national defense, military, aviation, and aerospace, playing an irreplaceable role. Presently, helium in China is primarily imported from other countries, manifesting a high degree of dependence on foreign trade, suggesting a prominent issue concerning helium resource security. Previous studies on helium principally focus on conventional natural gas, rendering helium in coal measures relatively under-studied. [Objective and Methods] To determine the distribution and potential of helium resources in coal measures, this study analyzed the coal-measure gas sampled from the eastern margin of the Ordos Basin, systematically investigating the distribution patterns of helium and its controlling factors. In combination with the helium test results of coalbed methane (CBM) in the Qinshui Basin, this study compared the helium accumulation mechanisms of coal measures in the Ordos and Qinshui basins and delved into the helium resource potential in the coal measures. [Results and Conclusions] The results indicate that deep CBM exhibits higher helium content than moderately shallow CBM in the Hancheng and Daning-Jixian blocks along the eastern margin of the Ordos Basin. Specifically, the helium in deep and moderately shallow coal seams in the Hancheng block exhibits average volumetric fractions of 0.042 8% and 0.013 0%, respectively; the corresponding values of the Daning-Jixian block are 0.030 7% and 0.012 1%, respectively. The tight gas in coal measures and the deep CBM manifest similar helium content. The helium in the tight gas of the Hancheng and Daning-Jixian blocks displays average volumetric fractions of 0.046 7% and 0.035 5%, respectively, suggesting helium-deficient CBM. Contrastingly, the coal-measure gas in the Sanjiaobei block displays relatively high helium content (average volumetric fraction: 0.093 0%), with nearly half of the gas wells reaching the criterion for helium-rich coal-measure gas. The coal measures along the eastern margin of the Ordos Basin bear minimal content of in-situ authigenic helium, which originates primarily from deep basement rocks, bauxites, and the Zijinshan pluton. The distribution of helium source rocks determines the distribution of helium in the coal measures. The fault system along the eastern margin of the Ordos Basin provides favorable migration pathways for helium in the deep helium sources and the Zijinshan pluton. The development intensity and location of the fault system play a crucial role in helium migration and accumulation. Meanwhile, effective cap rocks and the closed water environments are essential for helium preservation. Besides, the Qinshui Basin shows a relatively low content of in-situ authigenic helium, and the significant tectonic uplift in the late stage of helium accumulation is the primary cause of the loss of nearly 90% helium in coal seams. Despite relatively low helium content, tight gas in the coal measures and the deep CBM demonstrate considerable helium resources, thus warranting more endeavors to helium resource exploration in coal measures. Moreover, it is necessary to put more effort into tackling technological challenges in helium recovery from helium-deficient to helium-bearing coal-measure gas. The purpose is to effectively utilize the low-content helium in coal-measure gas in order to ensure China's helium resource security.

Keywords: coal-measure gas; helium; accumulation mechanism; resource potential; Ordos Basin; Qinshui Basin

氦气因其特殊的物理化学性质被广泛应用于国防、军工、航空、航天、医疗、精密制造、低温超导、科研实验等现代高科技领域,是一种无可替代的关键物质,关乎着我国“深空、深海、深地、深蓝”领域的发展^[1-3]。氦气在各高科技领域中的广泛应用和不可替代性、稀缺性使氦气成为重要的战略性资源^[4-7]。截至 2023 年底,我国氦气资源量较少,仅为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占世界资源量的 2.76%^[8], 氦气进口比例仍然在 88% 以上。因此,解决我国氦气资源安全问题受到国家的高度重视,寻找氦气资源已经成为目前面临的紧迫任务之一^[3,5]。

从天然气藏和 LNG 尾气中提取氦气是工业化生产氦气的主要途径。在绝大多数天然气藏中氦的丰度低于 0.05%, 这种低丰度的氦气目前在常规条件下尚未得到有效利用。目前已经发现的氦气资源主要伴生在烃类气藏和以二氧化碳或氮气为主的非烃气藏中,美国 Hugoton-Panhandle 气田,阿尔及利亚 Hassi R'mel 气田,中国威远气田、和田河气田、东胜气田等都直接进

行过或正在进行氦气的商业开采利用,卡塔尔北方气田氦气含量较低,通过天然气液化和闪蒸气等方式也在进行氦气的分离和利用^[6]。根据我国目前实际情况,寻找富氦天然气藏是解决氦气资源紧缺问题的关键。

氦气虽然常和烃类气藏伴生,但其来源、生成、运移、聚集、保存等与天然气有明显不同。氦气有 3 种来源:大气来源、壳源(放射性来源)和幔源。大气中的氦含量很低,通常情况下在水中的溶解度也非常小,所以通过溶解到地表水中并随地下水补给进入盆地地下流体系统中的氦可以忽略不计。因此,通常认为地下流体系统中的氦主要来源是壳源和幔源。近年来,我国已经高度重视氦气资源的研究,在氦源岩评价^[9-10]、氦气运移和富集机制^[11-13]、氦气资源评价^[2,7]、氦气资源分布与预测^[14-15] 方面开展了一系列探索性研究。富含 U、Th 元素的岩石都是潜在氦源岩,年代古老、体积大的基底花岗岩是研究者普遍关心的氦源岩类型。目前世界上的富氦天然气田主要分布在克拉通内部或周边地区,克拉

通时代越古老,富氦气田内氦气丰度越高^[4,9]。U、Th元素含量较高,岩石具备较高的生氦潜力,年代古老让岩石具有很长的生氦时间,体积大保证了岩石能够生成大量的氦气,随着时间的演化,氦气逐渐累积,为后期在盆地内的富集成藏提供了充足的氦源。美国 Panhandle-Hugoton、Cliffside、Riley Ridge 地区以及我国四川威远气田、柴达木盆地东坪气田、秦岭造山带北部渭河盆地等富氦天然气田下部均有巨大的基底花岗岩体,这些花岗岩体可能是氦气的主要来源^[4]。由于氦气生成强度低、释放效率和地层抬升剥蚀等对氦气的补给和逸散均有影响,所以目前对气藏中氦气来源的准确表征仍是一个亟待解决的世界难题。研究发现,氦气生成后溶于孔隙水中并随着孔隙水的流动而运移,美国 Panhandle-Hugoton 气田的氦气含量分布与地下水有密切关系,国内威远气田也有水溶气的证据,渭河盆地的氦气则是直接从地热井中分离出来^[16]。虽然很多证据表明地下水是氦气运移的重要载体,但是氦气在地下岩体和地下水中的循环体系尚不明确。李玉宏等^[11]通过总结前人关于氦气、氮气和甲烷亨利系数和溶解度的研究成果,对渭河盆地进行模拟计算,探讨了亨利定律在氦气运移和成藏中的关键作用。赵栋等^[17]利用本森系数对地层条件下氦溶解度进行了计算,并在此基础上以单位体积花岗岩为例,建立了岩石孔隙水中氦气溶解、脱溶量计算模型,据此对地层温、压条件变化与氦气运聚成藏间的相关性进行了定性定量研究,提出了“抬升脱溶型”和“置换脱溶型”2种壳源富氦天然气藏成藏模式。关于氦气的聚集条件,秦胜飞等^[12-13]通过对中国中西部富氦气藏的解剖,认为古老地层水与游离气藏相遇时受亨利定律的控制,古老地层水中的溶解氦释放到气藏中并形成富氦气藏。前人对于氦气的保存条件观点仍不统一。李玉宏等^[11]研究认为,氦气亨利系数高、溶解度低,盖层中孔隙水的存在不利于氦气以溶解态扩散。盖层一般为亲水岩石,孔喉表面吸附的水膜进一步堵塞通道,降低了氦气以游离态扩散和渗透的可能。另外,伴生在烃类气藏或二氧化碳气藏中的氦气,由于分压低、克服毛细管力的动力不足,载体气浓度高,扩散动力大,较大分子会先堵塞运移通道,从而阻止氦分子的运移,所以载体气能保存,氦气也可以保存^[11]。沁水盆地因晚期地层抬升,氦气大量散失,导致该盆地煤层气中氦气含量极低^[18-19]。以上关于氦气的生成、运移、聚集、保存的相关研究主要集中在常规天然气藏,对于非常规气藏,尤其是煤系中氦气的研究较少。和常规天然气藏相比,煤层气、页岩气是典型的自生自储型气藏,很多时候还会发生排烃作用,是常规气藏、致密砂岩气藏的烃源岩层。由于煤层自身放射性元素含量低,且煤层有

机质丰度高,生烃强度大,烃类气体会稀释氦气,因此,很多研究者认为煤系很难形成富氦气藏^[20]。但是随着勘探的进一步深入,在四川盆地威远地区发现了氦气含量较高的威 201-H1 和威 201-H3 等页岩气井,基于对氦气成藏理论的认识,认为在有充足的外源氦气补充条件下,煤系是有可能形成富氦气藏的。

鄂尔多斯盆地和沁水盆地是我国重要的煤与煤层气盆地,煤系分布范围广,煤系气资源十分丰富,但是目前对煤系中氦气的关注较少^[20-21],煤系气中氦气分布情况不明,运移和富集成藏机理尚不清楚。为此,笔者以鄂尔多斯盆地东缘(以下简称鄂东缘)煤系氦气为研究对象,结合前人对沁水盆地煤层中氦气的测试结果,系统研究氦气的生成、运移、聚集和保存等条件,并对比两大盆地中氦气富集机理、资源潜力和勘探开发对策,以期为我国煤系中氦气的利用提供支撑。

1 地质背景

鄂东缘和沁水盆地煤系为上古生界石炭-二叠系,形成于华北晚古生代巨型聚煤盆地中带。但是,印支期以来的构造分异导致两个研究区地质条件差异化,造就了现今不同的煤系天然气地质背景。晚古生代以来,鄂东缘和沁水盆地具有相似的地层特征。发育前寒武系、下古生界寒武系和奥陶系、上古生界石炭-二叠系、中生界三叠系和侏罗系以及新生界新近系和第四系^[22-24]。石炭-二叠系是一套海陆交互的含煤地层,与下伏奥陶系上马家沟组、峰峰组呈平行不整合接触,上部地层向三叠系过渡或遭剥蚀后直接被新生代沉积覆盖。石炭系发育上石炭统本溪组 and 石炭-二叠系太原组。本溪组下部地层是含铁铝土岩、铝土岩和铝土质页岩,夹 1~2 层铁矿,上部为页岩、炭质页岩夹煤线和 1~2 层灰岩,总厚度 5~30 m。太原组连续沉积在本溪组之上,主要岩性为砂岩、灰岩、泥岩、砂质泥岩、炭质页岩、铝土质页岩或黏土夹煤线、煤层,形成多个海进海退旋回结构,厚度 50~135 m。二叠系含有山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组。山西组和太原组为主要含煤地层,以砂岩、砂质泥岩、灰岩和煤层为主,山西组和上覆下石盒子组整合接触^[22-24]。

鄂东缘位于晋西挠褶带、渭北隆起东段与伊盟隆起东段,整体呈西倾单斜形态,构造相对简单(图 1)。鄂东缘上古生界石炭-二叠系煤层气资源十分丰富,主力含气层系为山西组 4+5 号、太原组 8+9 号煤层。区域上,煤层厚度、变质程度、煤层埋藏深度变化较大。4+5 号煤层厚度为 1~15 m,一般大于 2.5 m,8+9 号煤层厚度为 2~20 m,一般大于 3.5 m。煤层埋深整体呈“三浅两深”的分布格局,保德、三交、韩城区块埋藏较浅,

为 300~1 200 m; 大宁-吉县、石楼西区块埋藏较深, 为 800~2 600 m; 地形呈南高北低、西高东低变化(图 2)。

随埋深增大, 煤变质程度逐渐变高, 镜质体反射率 0.6%~2.78%^[25]。

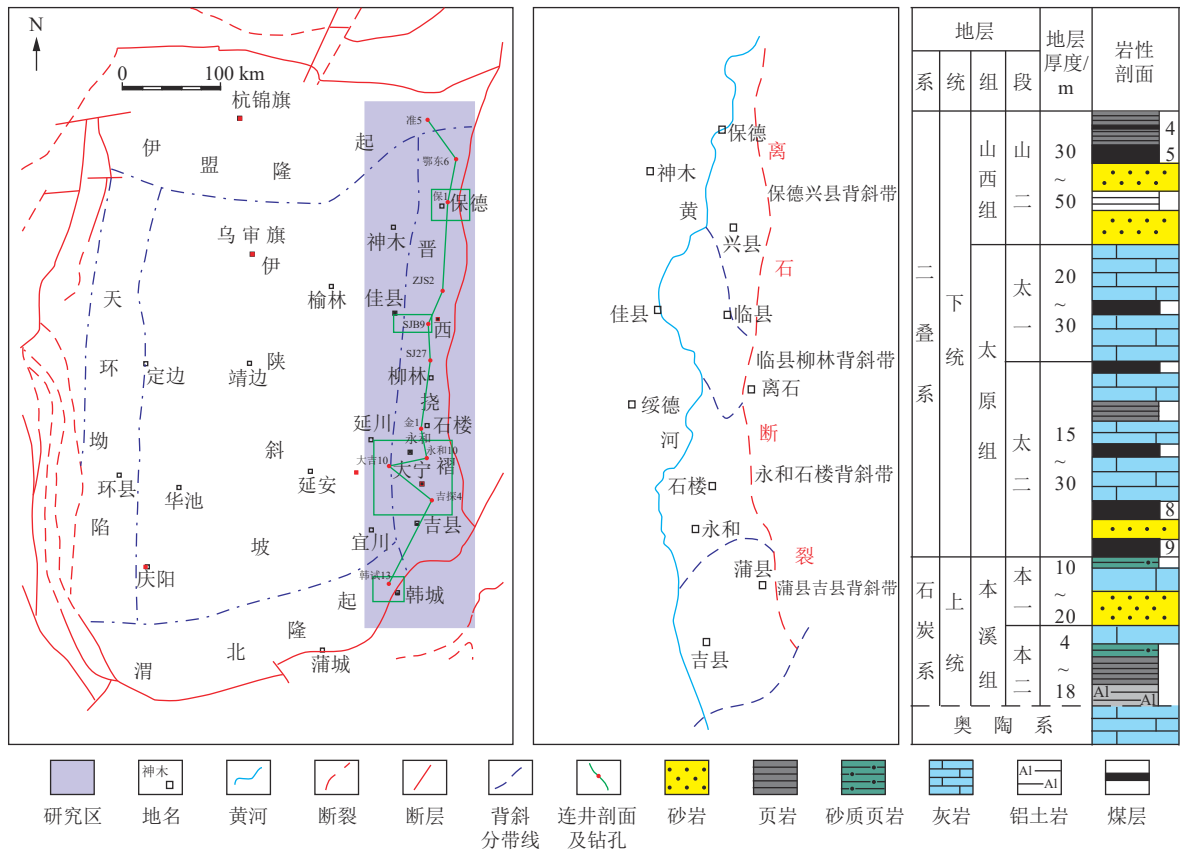


图 1 鄂尔多斯盆地及构造分区
Fig.1 Map showing the Ordos Basin and its structural division

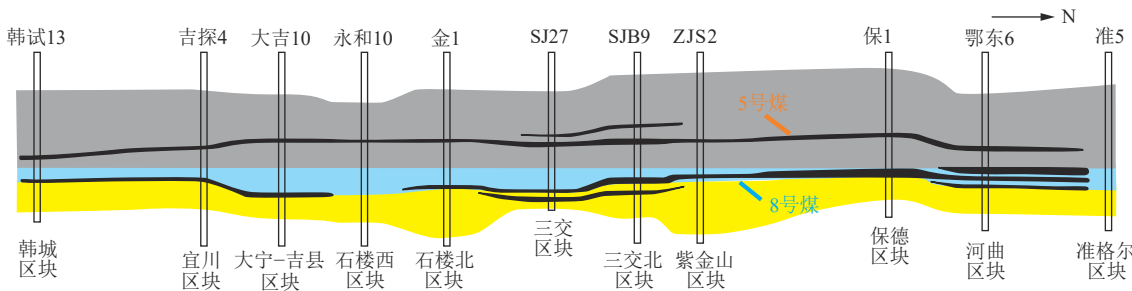


图 2 鄂东缘煤层气连井剖面(剖面位置如图 1 所示)
Fig.2 Well-tie cross-section showing the CBM along the eastern margin of the Ordos Basin (section location shown in Fig.1)

2 样品采集和实验

自南向北, 在鄂东缘系统选取韩城、大宁-吉县、三交北区块中浅部、深部煤层气井和煤系致密气井进行取样, 样品均取自井口。对于井口压力较大的井, 选用了带双阀的耐高压钢瓶, 用井口天然气反复冲洗钢瓶 5 次以上, 对于井口压力较小的井, 选用 500 mL 玻璃盐水瓶用排水法取气, 取气之前用井口天然气连续排出连接管内空气 1 min 以上, 最大限度减少空气污染。本次研究所取的全部天然气样品均送到中国地质科学院进行氦气含量和稀有气体同位素比值的测定。天然气组

分分析使用仪器为 Agilent7890 气相色谱分析仪, 载气为氦气; 氦气含量和稀有气体同位素使用稀有气体质谱仪进行分析。目前关于含-富氦的评价标准较多, 本次研究为了便于读者理解, 根据氦体积分数划分为贫氦 (0.01%~<0.05%)、含氦 (0.05%~<0.10%)、富氦 ($\geq 0.10\%$) 3 个等级。

3 煤系氦气含量与分布

3.1 鄂东缘

为了研究方便和便于读者的理解, 本文将 2 000 m

作为深度界限,将煤层气分为中浅部煤层气(埋深小于 2 000 m)和深部煤层气(埋深大于 2 000 m)。

研究区煤系气中氦气含量测试结果见表 1。总体上,韩城、大宁-吉县和三交北区块,煤系气中氦体积分数分布在 0.000 1%~0.201 9%,其中,三交北区块平均氦气体积分数最大。从埋深和层位来看,3 个区块中,深部>中浅部,致密气中略高于煤层气。

从氦气含量分布特征来看(图 3),韩城和大宁-吉县区块中浅部煤层气中氦气含量整体较低,分别有 75% 和 87% 的样品氦气体积分数小于 0.02%,极少数样品氦气体积分数大于 0.04%。韩城深部煤层气中有 47.62% 的样品氦气体积分数为 0.04%~<0.05%, 23.81% 的样品为 0.03%~<0.04%;大宁-吉县区块深部煤层气中有 60% 的样品介于 0.03%~<0.04%, 30% 的样品为 0.02%~<0.03%。三交北区块煤系气中氦气含量整体较高,氦气分布范围较大,超过 40% 的样品氦气体积分数大于

表 1 鄂东缘煤系气中氦气含量
Table 1 Helium content in coal-measure gas along the eastern margin of the Ordos Basin

区块	样品类型	(最小~最大值/平均值)/%
韩城	中浅部煤层气	0.000 1~0.032 4/0.013 0
	深部煤层气	0.025 1~0.086 5/0.042 8
	煤系致密气	0.030 7~0.086 7/0.046 7
大宁-吉县	中浅部煤层气	0.002 5~0.041 4/0.012 1
	深部煤层气	0.016 8~0.036 4/0.030 7
	煤系致密气	0.023 1~0.042 1/0.035 5
三交北	煤系气	0.037 9~0.201 9/0.093 0

0.1%。致密气中,韩城区块有 33.33% 的样品氦气体积分数为 0.03%~<0.04%, 50% 的样品为 0.04%~<0.05%;大宁-吉县区块 66.67% 的样品氦气体积分数为 0.03%~<0.04%,其他各有 16.67% 的样品为 0.02%~<0.03% 和 0.04%~<0.05%。

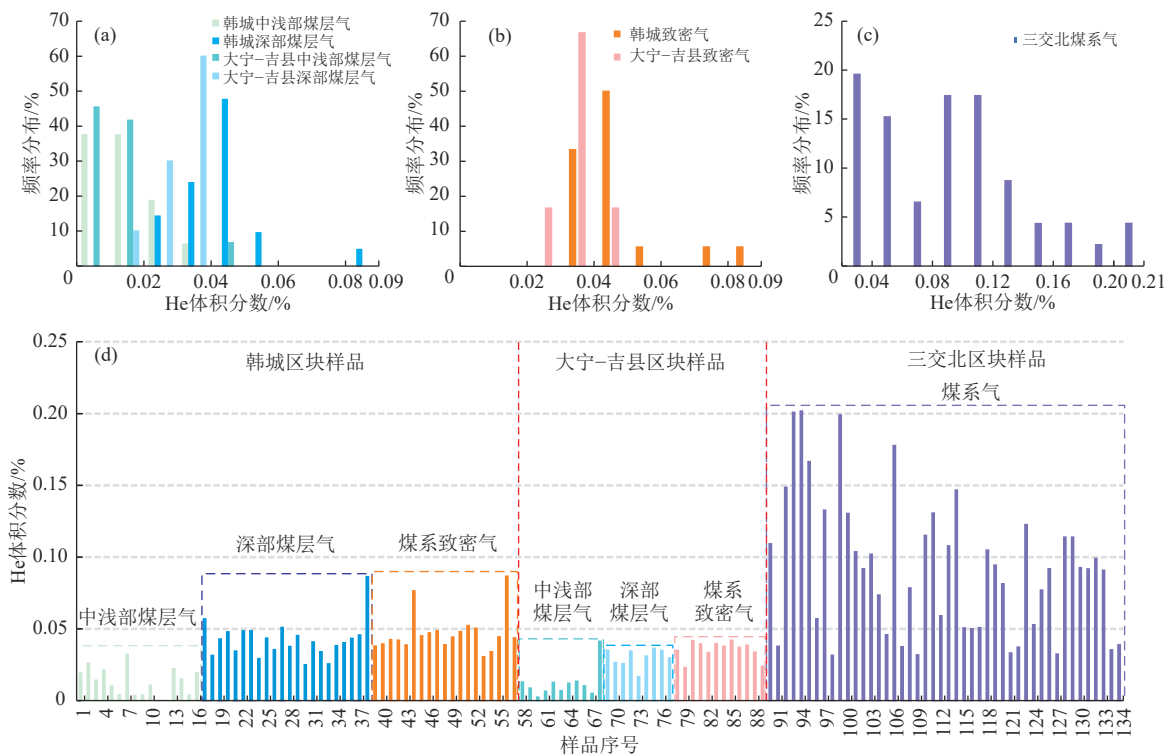


图 3 鄂东缘煤系气中氦气含量分布

Fig.3 Distribution of helium content in coal-measure gas along the eastern margin of the Ordos Basin

3.2 沁水盆地

为了对比鄂尔多斯盆地和沁水盆地氦气分布特征,本次研究收集了 Chen Biying^[19]对沁水盆地潘庄区块煤层气中氦气含量的测试结果(表 2)。由表 2 可知,沁水盆地氦气含量明显较低,所有样品氦气体积分数介于 0.000 052%~0.003 325%,平均仅为 0.000 86%。从氦气含量分布特征来看(图 4),沁水盆地中浅部煤层气中有 57.89% 的样品氦气体积分数分布在 0~0.000 5%,

含量极低,远低于鄂东缘韩城和大宁-吉县区块中浅部煤层气中氦气含量。

3.3 煤系中氦气分布规律

从鄂东缘煤系中氦气含量平面分布(图 5)可以看出,平面上氦气分布具有明显的区域性特征,韩城和大宁-吉县区块氦气分布特征相似,整体上平均体积分数低于 0.05%,属于贫氦煤层气藏,且中浅部氦气含量低于深部,煤系致密气中略高于深部煤层气。三交北区块

表 2 沁水盆地煤层气中氦气含量^[19]
Table 2 Helium content in CBM in the Qinshui Basin^[19]

样品编号	深度/m	到盆地边缘距离/km	⁴ He 体积分数/%
QS1	406	20.2	0.000 415
QS3	567	21.3	0.000 292
QS4	585	21.8	0.000 222
QS5	606	22.5	0.000 827
QS6	390	20.4	0.000 052
QS7	529	13.8	0.000 847
QS9	552	12.0	0.000 310
QS10	638	10.8	0.000 158
QS11	673	10.2	0.000 096
QS12	660	9.9	0.000 127
QS14	487	13.6	0.000 255
QS15	446	17.4	0.001 830
QS17	519	16.8	0.003 325
QS18	394	15.3	0.000 216
QS19	420	14.9	0.000 350
QS20	482	16.5	0.000 638
QS21	375	19.3	0.000 093
QS22	390	18.9	0.000 238
QS23	361	20.0	0.001 414

煤系气中氦气含量明显高于韩城和大宁-吉县区块,在三交北西侧存在明显的氦气特富集区带,氦气体积分数最高可以达到 0.2% 以上。三交北区块东侧氦气分布规律不明显,富氦、含氦、贫氦煤系气井均有分布。从韩城区块煤层气中氦气含量与深度关系(图 5d)可以看出,氦气含量与埋深具有明显的正相关性,埋深越大,氦气含量越高,相关系数可以达到 0.68;但是在中浅部煤层气和深部煤层气内部氦气含量与深度关系不明显。

从沁水盆地氦气含量平面分布及构造剖面图(图 6)

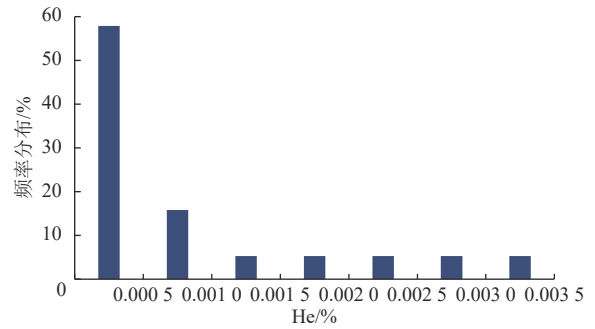


图 4 沁水盆地煤层气中氦气含量分布

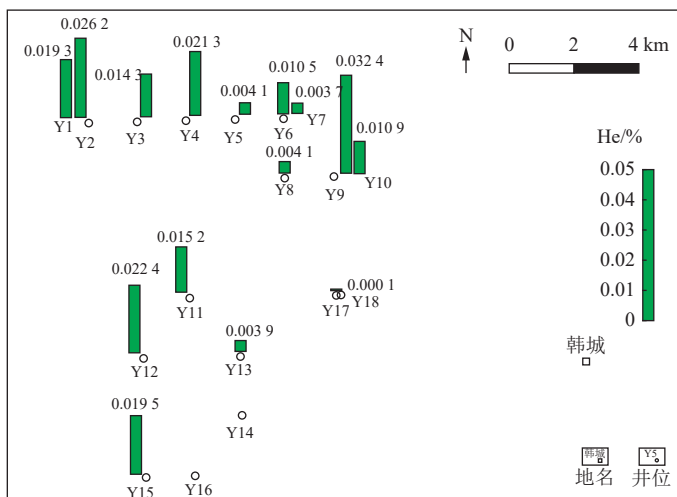
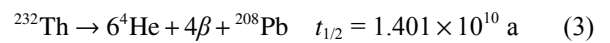
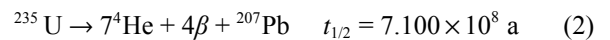
Fig.4 Distribution of helium content in CBM in the Qinshui Basin

可以看出,氦气整体含量特别低,在平面上和纵向上分布无规律。

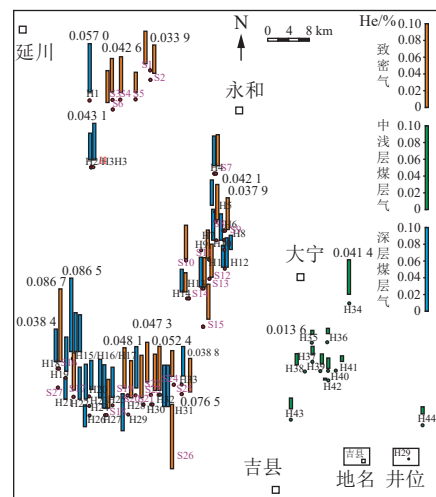
4 煤系天然气中氦气富集机理

4.1 生成机理

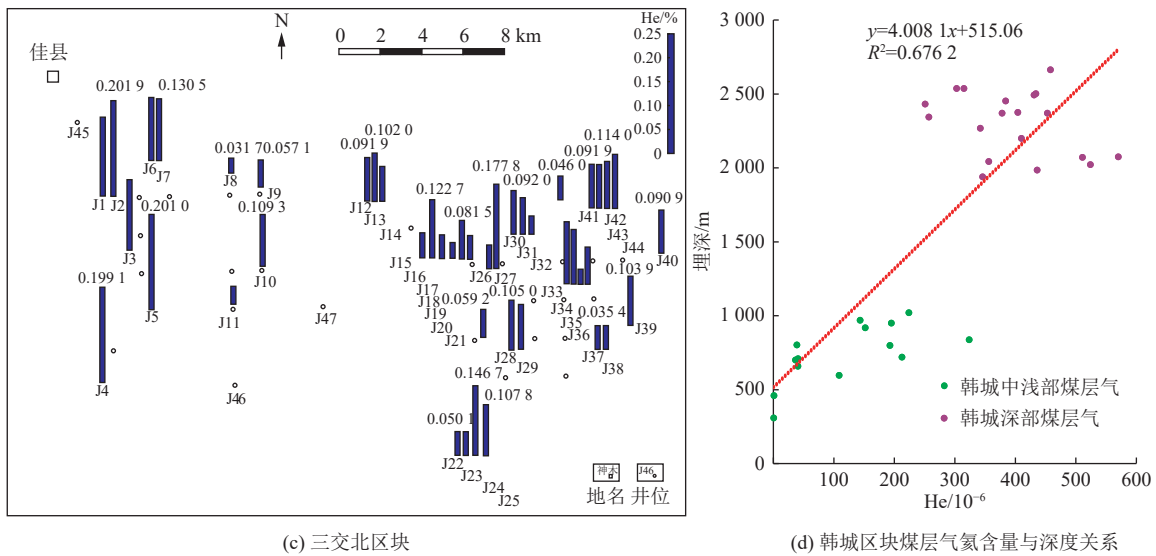
地球上的 He 主要有 ³He 和 ⁴He 两种稳定同位素,其中 ³He 主要是地球形成时捕获的宇宙原始氦, ⁴He 主要为地球形成后经放射性元素 U、Th 衰变形成的。氦主要来源于大气、壳源(放射性来源)和幔源^[26]。3 种来源的氦气具有不同的 ³He/⁴He 比值,大气中的 ³He/⁴He 为 1.4×10⁻⁶,壳源 ³He/⁴He 为 2.0×10⁻⁸,幔源 ³He/⁴He 为 1.1×10⁻⁵,因此, ³He/⁴He 可以作为氦气来源的判定条件。由于大气中 ³He/⁴He 基本是一常数,常用 Ra 表示,典型壳源 ³He/⁴He 约为 0.02 Ra,上地幔的典型代表——大洋中脊玄武岩(MORB)的 ³He/⁴He 约为 8.0 Ra,下地幔的典型代表——洋岛玄武岩(OIB)的 ³He/⁴He 为 10~50 Ra。



(a) 韩城区块中浅部



(b) 韩城区块深部和大宁-吉县区块



(c) 三交北区块

(d) 韩城区块煤层气氦含量与深度关系

图 5 鄂东缘煤系气中氦气含量平面分布及其与深度关系

Fig.5 Distributions of helium content in coal-measure gas along the eastern margin of the Ordos Basin and the relationship between the helium content and depth

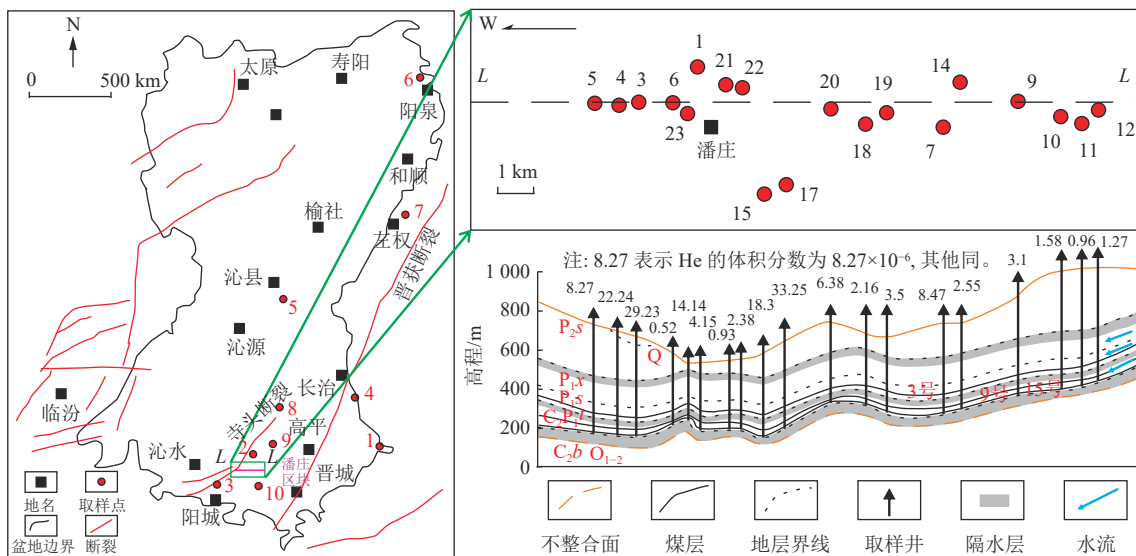


图 6 沁水盆地氦气含量平面分布及构造剖面(据文献 [19], 修改)

Fig.6 Map showing the distribution of helium content and structural section of the Qinshui Basin (modified after reference [19])

前人研究发现,在不同类型岩石中放射性元素含量具有明显差异(表 3),氦气产率及潜力主要取决于岩石的类型、年代和体积(图 7),页岩和花岗岩的产氦效率明显高于碳酸盐岩和砂岩。

理论研究表明,放射性元素的衰变受核素本身控制,与外界因素无关,所以壳源氦气的生成取决于岩石中放射性元素 U、Th 的含量和岩石年龄,氦气生成量与放射性元素 U、Th 含量和时间相关,因此,富含 U、Th 元素的泥页岩、铝土岩或者年龄古老的基底花岗岩、变质岩都有可能成为有效氦源岩[38]。氦气标准状态生成量与 U、Th 含量和时间函数关系如下:

$$He = (1.22 \times 10^{-13}[U] + 2.92 \times 10^{-14}[Th])t \quad (4)$$

要惠芳[23]研究了鄂东缘大宁-吉县区块不同地层

表 3 不同类型岩石中放射性铀、钍元素含量
Table 3 Contents of radioactive elements U and Th in different types of rocks

岩石类型	U、Th 平均体积分数/ 10^{-6}		数据来源
	U	Th	
热页岩	50.00	12.00	
页岩	3.70	12.00	
花岗岩	3.00	13.00	文献[27]
灰岩	2.20	1.70	
砂岩	0.45	1.70	
花岗岩	6.96	31.04	文献[28-30]
泥页岩	16.23	11.66	文献[9,31-32]
片麻岩	1.75	16.50	文献[33]
铝土岩	25.00	56.00	文献[34-37]

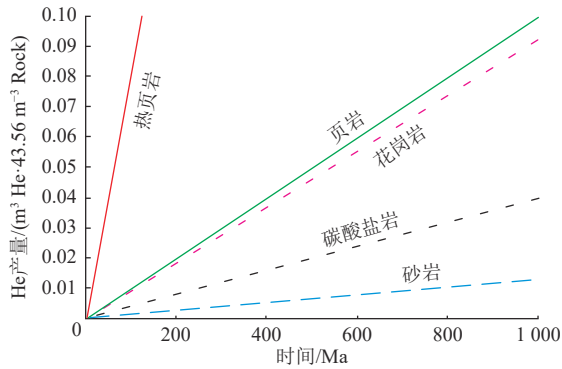


图 7 不同类型岩石生氦效率(据文献 [27], 修改)

Fig.7 Helium-generating efficiency of different types of rocks (modified after reference [27])

中放射性元素含量, 结果表明本溪组和太原组泥岩中 U 元素含量较高、二叠系山西组泥岩中 U 元素含量较低; 本溪组和山西组 Th 元素含量较高、太原组 Th 元素含量较低; 本溪组和太原组 K 元素含量较低, 山西组 K 元素含量较高(图 8)。

据孙彩蓉^[39]、秦胜飞^[20]、王慧玲^[40]、潘博^[41]等测试结果(表 4), 鄂尔多斯盆地不同地区不同岩石中 U、Th 元素含量具有一定差异, 铝土岩系中 U、Th 元素含量明显高于煤层和煤系泥页岩, 陇东地区铝土岩系 U、Th 元素含量高于神木-米脂地区。沁水盆地山西组煤系中(煤层、顶板、底板、夹矸)U、Th 放射性元素含量^[24]略低于鄂尔多斯盆地(表 4、图 9)。

前人通过航磁异常研究发现, 在山西中北部北纬 38°带附近存在局部正磁异常带, 兴县附近的异常高值区与出露的紫金山岩体相对应, 推测兴县地区高磁力异常可能与深部燕山期隐伏岩浆岩体或磁性基底相关^[43-45]。紫金山岩体是多阶段、多期次、不同岩性的碱性杂岩体, U 含量(0.50~8.88)×10⁻⁶, 平均 2.595×10⁻⁶, Th 含量(1.13~26.30)×10⁻⁶, 平均 7.034×10⁻⁶(表 5)^[42]。

通过对比不同地区煤系岩石中 U、Th 元素含量, 可以发现鄂尔多斯盆地和沁水盆地煤层中 U、Th 元素丰度相差不大, 鄂尔多斯盆地煤系页岩中 U、Th 元素含量略大于煤, 铝土岩系地层中 U、Th 元素含量整体最高。通过对原位自生氮气的计算, 鄂东缘煤系天然气中原位自生氮气含量远低于实测值, 沁水盆地煤层气中原位自生氮气和实测氮气含量大体相当(表 6), 由此可见鄂东缘煤系天然气中必定存在外源氮气的补充。

前人根据航磁异常数据及鄂尔多斯盆地周缘地区露头资料, 确定了鄂尔多斯盆地基底岩性及时代属性。鄂尔多斯盆地基底结构整体受控于 4 条基底一级断裂, 结合露头资料, 鄂尔多斯盆地基底主要由涑水—中条群、界河口群、恒山—吕梁群、上集宁群、下乌拉山群等组成^[46-48](图 10)。基底岩性包括太古代混合花岗岩、

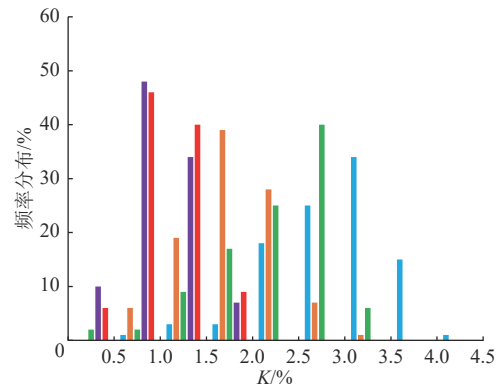
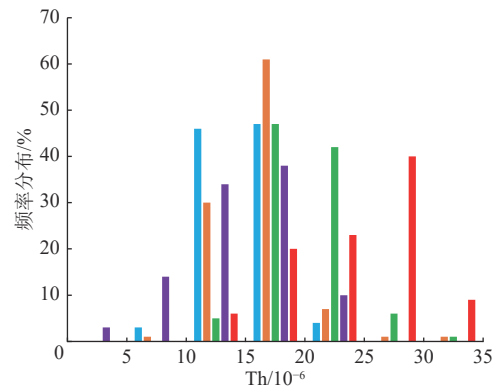
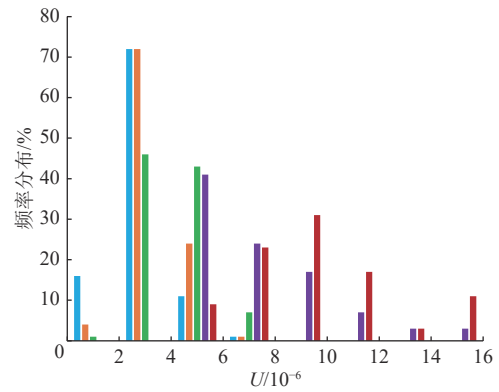


图 8 鄂东缘大宁-吉县地区不同地层泥岩中 U、Th、K 元素含量分布^[23]

Fig.8 Distributions of the U, Th, and K contents in mudstones of different formations in the Daning-Jixian block along the eastern margin of the Ordos Basin^[23]

片麻状花岗岩、麻粒岩和早元古代大理岩、千枚岩、绿片岩等。根据国内外目前对氦源岩研究的共同认识, 结合鄂东缘煤系气中氦气含量分布, 可以推测鄂尔多斯盆地基底广泛发育的花岗岩和变质岩应为鄂东缘氦气的主要来源, 这也是中南部韩城、大宁-吉县区块深部煤层气中氦气含量相较于中浅部煤层气氦气含量较高的原因。同时, 紫金山岩体虽然整体 U、Th 元素含量略低于煤系, 但由于紫金山岩体体积大、时代老, 累计生氦量较高, 是三交北区块煤系氦气的主力来源, 也是三交北区块煤系气中氦气含量较高的原因。

根据不同地层、不同岩石中 U、Th 元素含量的对

表 4 不同地区岩石中放射性铀、钍元素含量
Table 4 Contents of radioactive elements U and Th in rocks of different areas

盆地	地区	地层	岩性	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	数据来源
沁水盆地		石炭-二叠系	煤系	0.285~17.90/3.26	0.75~58.70/13.58	文献[24]
	哈儿乌素	石炭-二叠系	煤系页岩	2.27~17.5/7.11	14.10~61.50/25.56	
	临县	石炭-二叠系	煤系页岩	1.57~14.1/4.73	9.11~48.50/19.14	文献[39]
	隰县	石炭-二叠系	煤系页岩	2.67~10.9/5.16	11.10~28.10/18.00	
鄂尔多斯盆地	米172、靳25、陇58井区	石炭系	煤	0.83~24.5/4.75	0.17~36.80/10.89	文献[20]
	紫金山岩体		火山岩体	0.50~8.88/2.60	1.13~26.30/7.03	文献[42]
	陇东	石炭-二叠系	铝土岩系	2.9~42.60/20.67	13.00~147.00/60.39	文献[40]
	神木-米脂	石炭-二叠系	铝土岩系	2.13~43.41/23.41	0.48~83.52/35.71	文献[41]

注：表中0.75~58.70/13.58表示最小~最大值/平均值，其他同；用U和Th等元素符号表示其物理量代号，全文同。

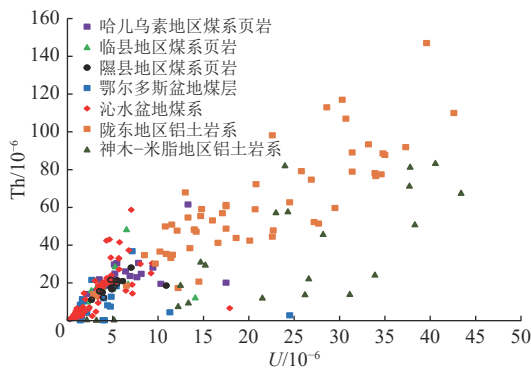


图 9 鄂尔多斯盆地煤层和鄂东缘地区煤系页岩中 U、Th 元素含量分布^[20,24,39-42]

Fig.9 Distributions of U and Th contents in the coal seams of the Ordos Basin and the coal-measure shales along the eastern margin of the basin^[20,24,39-42]

比及煤系生氦潜力的定量计算结果,说明煤系氦气主要为外源氦气,但由于目前的技术手段和评价方法尚不完善,暂时无法精确评价不同岩层在煤系氦气中的贡献,对于氦源岩的定量评价还有待进一步研究。

4.2 氦气来源及定量化表征

大气中的氦体积分数很低,仅为 0.000 524%,且通常情况下在水中的溶解度非常小,所以通过溶解到地表水中并随地下水补给进入盆地地下流体系统中的氦极少,几乎可以忽略不计,因此,通常认为地下流体中的氦主要来源是壳源和幔源。通过壳幔二元模型,可以定量计算幔源氦气的占比。 R/Ra 越大,幔源氦的份额越大(R 为样品的 $^3He/^4He$)。当幔源 He 达到 50% 时, $R/Ra > 3.935 7$; 当 $R/Ra > 1$ 时,幔源氦份额大于 12%; 当 $R/Ra < 0.1$ 时,幔源氦份额小于 1.093%。通过鄂东缘煤系天然

表 5 紫金山岩体不同岩性岩石中 U、Th 元素含量^[42]
Table 5 U and Th contents in rocks with different lithologies from the Zijinshan pluton^[42]

样号	岩性	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶
1	暗霞正长岩	0.50	2.32
2	粗面斑岩	6.10	10.90
3	辉石岩	0.901	2.77
4	辉石岩	2.42	5.65
5	二长岩	3.50	12.6
6	次透辉石云煌岩	1.24	6.27
7	次透辉石正长岩	0.94	4.35
8	含霞次透辉石正长岩	<0.504	2.32
9	霞石正长岩	1.06	2.24
10	霞石正长岩脉	0.565	1.13
11	假白榴石正长岩	1.24	7.42
12	黑榴石正长岩	8.88	1.85
13	粗面质火山角砾岩	0.64	4.81
14	粗面斑岩	6.10	10.90
15	响岩质火山角砾岩	1.63	15.60
16	假白榴石响岩	6.39	26.30
17	中粗粒次透辉石正长岩	2.76	4.38
18	正长岩脉	1.34	4.81

气和沁水盆地煤层气的测试结果和计算结果发现,鄂东缘煤系天然气中的幔源 He 极低,所有样品中幔源氦占比均小于 1%,可以认为鄂东缘煤系天然气中的氦基本上都来自于壳源(图 11)。沁水盆地煤层气中幔源氦占比变化较大,部分样品和鄂东缘煤系天然气中的氦气相近,幔源氦占比小于 1%,但也有 5 个样品幔源氦占比

表 6 不同地区煤系生氦潜力(计算参数依据文献 [23,25])
Table 6 Helium-generating potential of coal measures in different areas (calculation parameters after references[23,25])

盆地	地层	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	地质年代/Ma	原位生氦量占比/%	原位自生氦气体积分数/%
鄂尔多斯盆地	石炭系	4.75	10.89	10~20	354	0.000 318	0.001 589~0.003 180
沁水盆地	石炭-二叠系	3.26	13.58	10~20	354	0.000 281	0.001 409~0.002 812

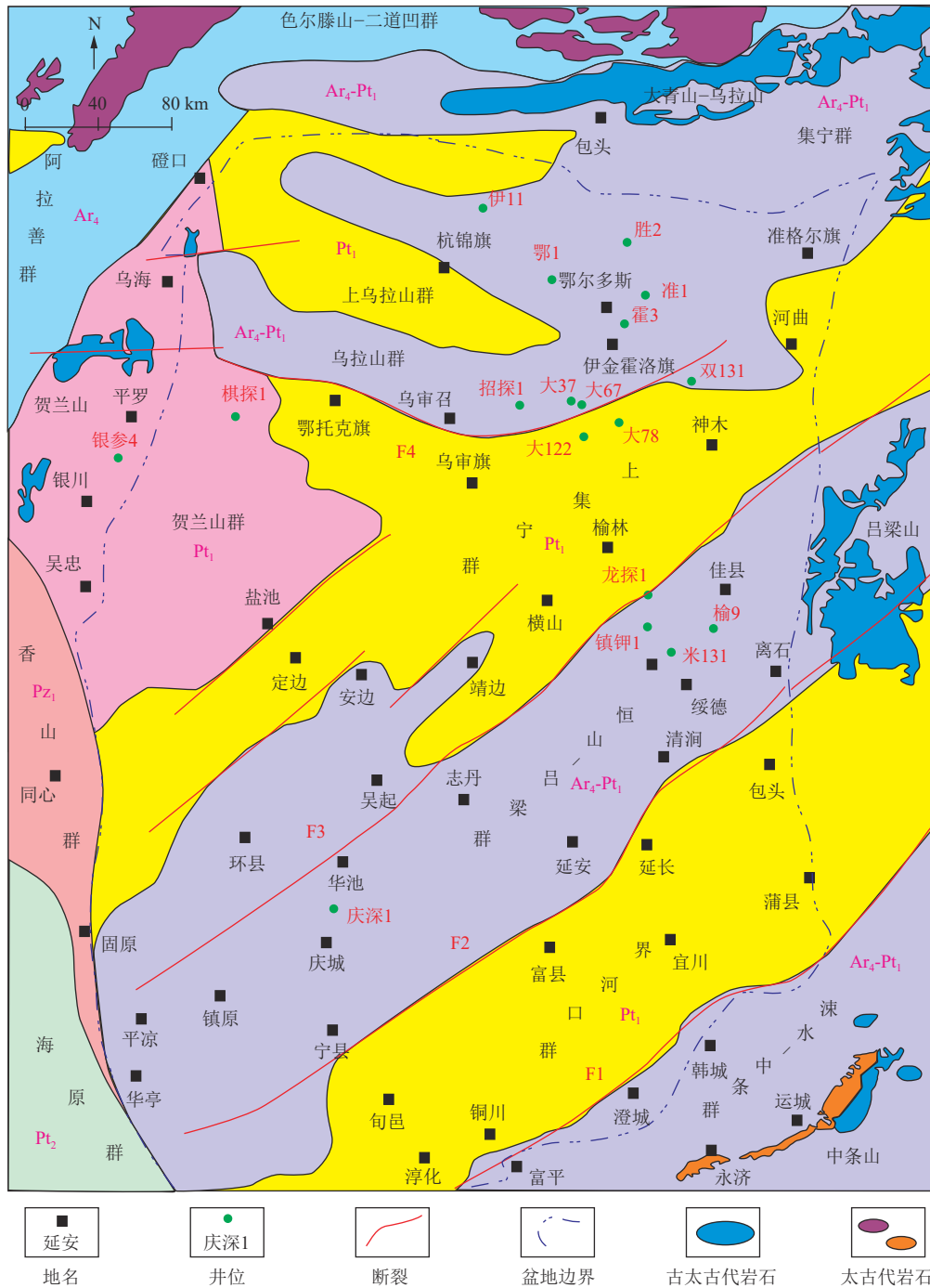


图 10 鄂尔多斯盆地基底结构与时代属性分区(据文献 [46-48], 修改)

Fig.10 Basement structure and epoch attribute zoning of the Ordos Basin (modified after references [46-48])

大于 1%，最大幔源氦比例可以达到 5.7%。虽然沁水盆地煤层气部分样品中幔源氦占比较大，但并不是说明沁水盆地幔源氦气通量的绝对值大于鄂东缘地区，这种结果是由沁水盆地煤层气中壳源氦气通量太小造成的。

壳幔二元模型可以定量计算幔源氦气(He_m) 的占比，如下：

$$He_m = \frac{(^3He/^4He)_s - (^3He/^4He)_c}{(^3He/^4He)_m - (^3He/^4He)_c} \times 100\% \quad (5)$$

氦有 3 种稳定同位素 ³⁶Ar、³⁸Ar 和 ⁴⁰Ar，其天然丰

度分别为 0.337%、0.063% 和 99.60%。⁴⁰Ar 是由 ⁴⁰K 衰变而形成，由于钾在岩石中普遍存在，所以 ⁴⁰Ar 在地下流体中广泛存在，大气中的 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 为稳定值 295.5，地下流体中由于捕获了岩石中钾衰变形成的 ⁴⁰Ar，会导致 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 增大，年代越老，岩石中钾元素含量越高，⁴⁰Ar/³⁶Ar 越大。从鄂东缘煤系天然气和沁水盆地煤层气中 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 和 ³⁸Ar/³⁶Ar 关系(图 12)及 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 与 ³He/⁴He 的关系(图 13)可以看出，³He/⁴He 基本在壳源值(2.0×10⁻⁸) 附近，而三交北区块 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 有明显不同。

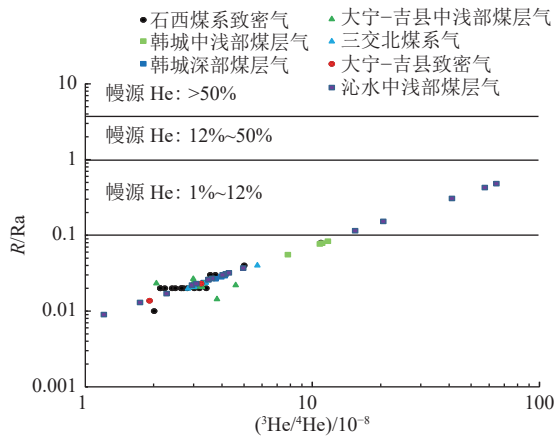


图 11 不同地区煤系气中氦同位素分布特征

Fig.11 Distributions of helium isotopes in coal-measure gas in different areas

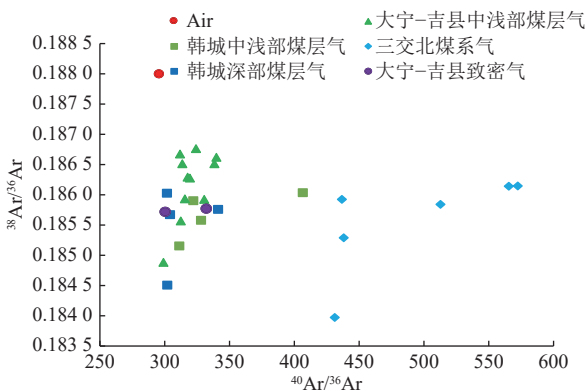


图 12 不同地区煤系气中⁴⁰Ar/³⁶Ar 与³⁸Ar/³⁶Ar 关系

Fig.12 ⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. ³⁸Ar/³⁶Ar of coal-measure gas in different areas

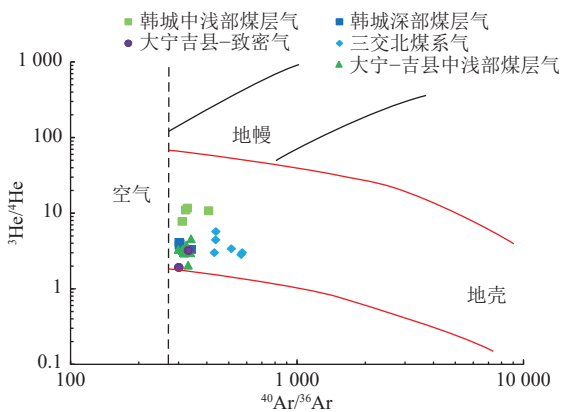


图 13 不同地区煤系气中⁴⁰Ar/³⁶Ar 与³He/⁴He 关系

Fig.13 ⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. ³He/⁴He of coal-measure gas in different areas

韩城和大宁-吉县区块煤系天然气具有相似的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值,三交北区块煤系气中⁴⁰Ar/³⁶Ar 明显大于韩城和大宁-吉县区块,说明三交北区块岩石中钾元素含量较高或地质年代较久。通过前文对鄂东缘 K 元素含量分析,三交北区块煤系并没有明显的 K 元素富集,而紫金山岩体具有明显的富碱、高钾特征(K₂O 高达 12.46%),且锆石 U-Pb 同位素测年结果表明紫金山岩体形成时间

有 120~140、280~300 和 340~360 Ma 三个阶段,分别对应早白垩世、早二叠世、早石炭世。三交北区块煤系气中⁴⁰Ar/³⁶Ar 明显较大,说明稀有气体⁴⁰Ar 是外部来源,这与前文三交北煤系气中氦气是外源的结论一致,⁴⁰Ar/³⁶Ar 和原位氦气生成量计算结果表明,三交北区块煤系气中氦气来源于古老基底岩石层和北部紫金山岩体。

4.3 运移方式和输导体系

从前文对于氦气生成和来源的分析可知,虽然煤层气中烷烃气是自生自储型气藏,但是气藏中的氦气主要是外源生成的,因此,对于煤系来说,氦气的运移是控制氦气富集的重要因素。氦气的运移和常规天然气的运移有明显区别,由于氦气生成周期长、强度较低、无集中生氦期,导致缓慢衰变生成的氦气很难像常规天然气一样以游离态大规模地进入圈闭形成氦气藏。氦气从生成到在天然气藏中聚集需要经过两个主要阶段:一是在富含 U、Th 元素的岩石中生成并释放出来,进入矿物晶格间隙或岩石孔隙中,将这一过程定义为氦气的初次运移;二是从矿物晶格间隙或岩石孔隙中进入到气藏中,这一过程称为二次运移(图 14)。氦气主要以扩散、水溶气、混合气的方式运移,由于分子量小、活动性强,存在分子运动,导致氦气扩散性较强,在富含放射性元素 U、Th 的基底岩浆岩、花岗岩、变质岩、泥页岩、煤、铝土岩等岩石中生成后,会逐渐扩散到矿物间隙或岩石孔隙中,扩散运动让氦气分子最终运动到气藏中并逐渐富集成藏。当岩石孔隙中存在地下水时,氦气可以溶解在地层水中,并随着地层水流动。氦气在水中的溶解度主要受温度、压力等影响,温度、压力越高,氦气溶解度越大,相同温压条件下,氦气在盐水中溶解度较低^[49](图 15)。因此,深部溶解的氦气,在随地层水向上运动

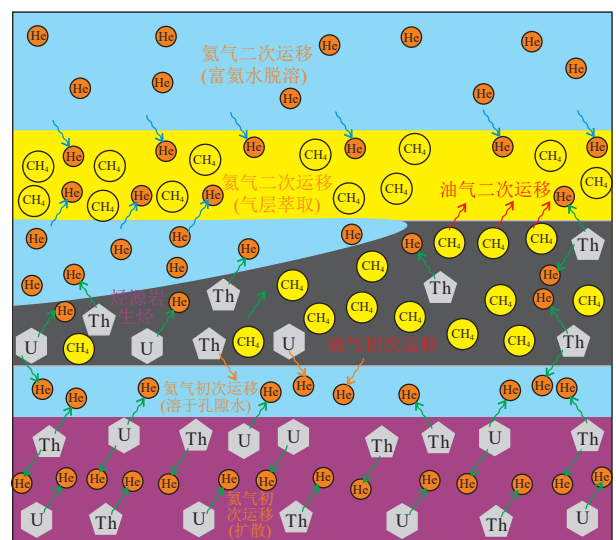


图 14 氦气生成、运移模式

Fig.14 Schematic diagram showing helium generation and migration

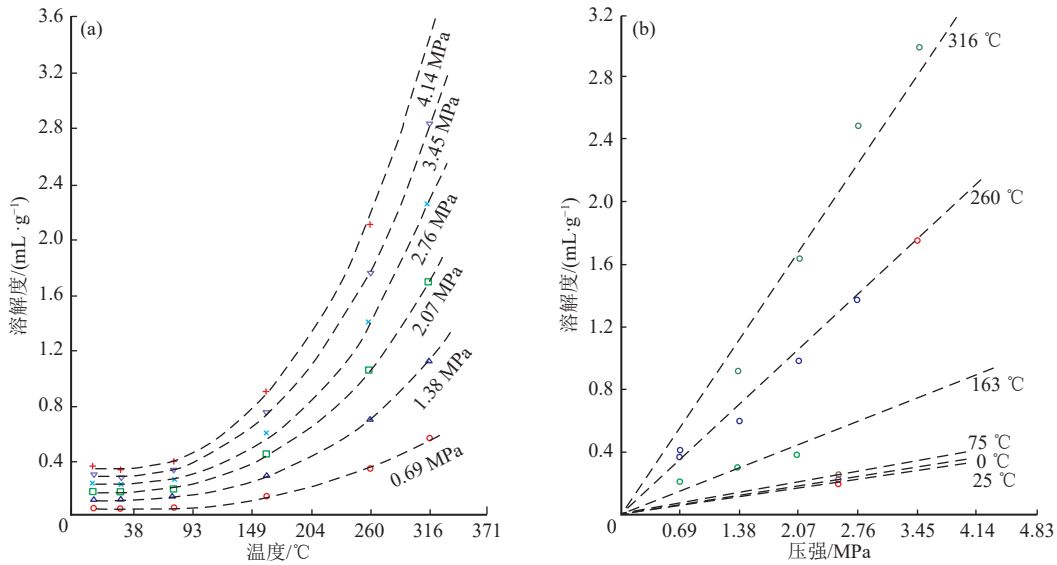


图 15 氦气溶解度与温度、压力关系(据文献 [49], 修改)

Fig.15 Relationships of helium solubility with temperature and pressure (modified after reference [49])

的过程中,由于温度、压力的降低,溶解态氦气脱溶变成游离态,并进入到气藏中逐渐富集成藏。在烃源岩中,有机质进入生烃门限后生成的油气会先充满烃源岩层孔隙,最终由于生烃增压作用,油气排出并沿着连通孔隙、不整合面、断裂系统等疏导体系运移到储集层中聚集成藏,在这一过程中,U、Th 元素一直缓慢衰变生成氦气,生成的氦气进入到油气(或 CO₂、N₂ 等非烃气)中并随着油气运移,在运移经过富氦的地层水时,受亨利定律控制,水中氦气被油气流体萃取出来,地层水中的氦气逐渐在油气流体中聚集成藏。扩散由气体分子本身特性决定,从分压高的地区向分压低的地区进行。水溶气方式需要存在可动的地下水,水体流动方能对富氦气藏的形成提供有利条件。混合气需要存在载体气,载体气为烷烃气体时,其对于烃源岩层中生成的氦气和烃源岩层到储集层路径上的氦气有储集作用;对于深部基底岩浆岩、花岗岩、变质岩、铝土岩等生成的氦气影响作用较小,这类岩石中生成的氦气只能通过扩散方式或者溶于地下水的方式运移到载体气附近,随后被载体气捕获、萃取,最终进入气藏中聚集成藏。非烃类载体气,如 CO₂、N₂ 等,一般处于特殊的构造位置或深大断裂带附近,非烃载体气同样可以捕获、萃取氦气,最终形成非烃富氦气藏。

鄂东缘断裂系统非常发育,从东西向构造剖面(图 16)中可以看到,离石断裂及周围的断裂系统发育至深部基底岩层中,为氦气的向上运移提供了有利的运移通道。鄂东缘整体处于盆地边缘斜坡区,盆地内部生成的氦气可以沿着地层孔隙、不整合面等侧向运移。纵向和侧向有利运移通道的存在为氦气的运移、聚集提供了有利条件。

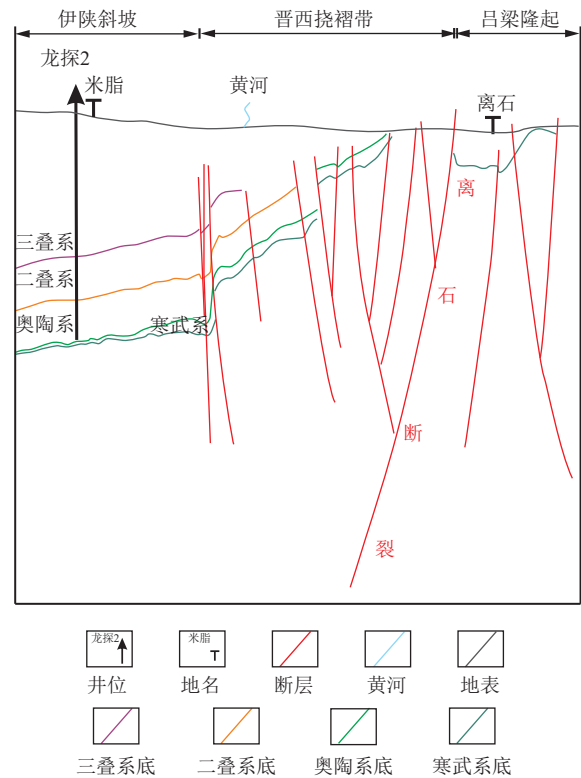


图 16 鄂东缘东西向构造剖面图

Fig.16 WE-trending structural section along the eastern margin of the Ordos Basin

4.4 保存条件

氦气的缓慢生成、特殊运移方式决定了氦气难以独立聚集成藏,通常和烃类气体、CO₂、N₂ 等无机气体、地热水等伴生成藏。天然气藏由于分子运动的存在,对盖层和保存条件要求较高,氦气分子扩散性和烃类气体分子相比同样非常强,氦气成藏期为烃类成藏期或包含之后至今的地质历史时期。因此,生烃期和构造运动的耦合关系以及良好的保存条件是氦气富集成藏的必要条件。

从大宁-吉县区块典型井(JT2井)的生烃埋藏史(图 17)可以看出,二叠纪煤系埋藏较浅、地层温度较低,有机质热演化程度较低,煤系生气量较低且以生物气为主;早-中三叠世地层快速深埋,地层温度逐渐升高,有机质逐渐成熟,煤的镜质体反射率最高可以达到 0.75%,煤系在这一时期进入本区第一次生烃期。晚三叠世,煤系受构造抬升的影响,地层温度逐渐降低;早侏罗世之后,地层埋深逐渐增加,煤系温度略有回升但未达到之前最大埋深时的温度;在燕山早-中期,构造运动再次导致煤系抬升遭受剥蚀,地层温度再次降低;晚三叠世和侏罗纪,有机质热演化处于停滞状态;白垩纪煤系再次深埋并受到燕山中期异常热事件的影响,古地温梯度升高,煤系温度快速上升,这一时期有机质热演化程度迅速增高并开始大量生烃,此为第二次生烃作用。之后,在燕山晚期,煤系受构造抬升作用的影响,地层温度降低,有机质生烃作用逐渐停止;新生代,受喜马拉雅运动影响,煤系进一步抬升,地层温度再次降低,生烃作用停止。烃类气体的逸散自生烃作用开始后一直延续至今。煤系含气量在最大生烃期达到峰值之后,一直处于降低的过程^[23]。煤系顶部岩层(顶板)对煤系天然气的扩散运移影响较大。大宁-吉县区块,5号煤层顶板为泥岩,煤层含气量介于 9.87~20.87 m³/t,平均 15.37 m³/t,顶板为砂岩,煤层含气量介于 9.08~19.19 m³/t,平均 14.13 m³/t;8号煤层顶板为灰岩,煤层含气量介于 1.12~17.22 m³/t,平均 9.16 m³/t,顶板为砂岩,煤层含气量介于 9.20~20.84 m³/t,平均 15.02 m³/t。由此可见,泥岩、砂岩、灰岩盖层均具有封盖能力,有利于煤系天然气的保存,泥岩盖层封盖能力最好。鄂东缘 5号煤层顶板大部分为泥岩,而 8号煤层顶板大部分为灰岩,所以 5号煤层的封盖能力强于 8号煤层,5号煤层的含气量也高于 8号煤层^[23]。根据氦气含量测试结果,5号煤中氦气体积分数为 0.034 5%~0.035 1%,8号煤中氦气体积分数介于 0.016 8%~0.036 4%,平均 0.028 8%,5号煤中氦

气含量高于 8号煤,主要受顶板封盖性的影响。

煤系天然气赋存受地下水的影响,主要包括水力运移逸散及水力封闭/封堵控气^[23]。前者对应地下水活跃区,后者对应地下水半封闭-封闭区。一般情况下,埋深越小,地下水动力越强,煤层气越难保存;埋深越大,地下水一般为原始地层水,水动力条件越弱。地下水化学特征主要受围岩及水动力强弱控制,是地下水水动力条件及封闭性好坏的体现。水动力较弱地区的地层水矿化度明显高于水动力较强的地区。如图 18a 所示,鄂东缘大宁-吉县区块深部煤层水矿化度较高,水型为 CaCl₂型;浅部和其他地区浅部地层水矿化度明显较低,受大气降水和地下水交替影响更强烈。因此,鄂东缘大宁-吉县区块存在两个完全不同的次级水文地质单元,区域内薛关断层是构造分界(图 18b),薛关断层东部为一个完整的水文地质单元,自东向西,包括补给区-径流区-承压区-排泄区;西部地区(自东向西)仅包括补给区-径流区-承压区^[23,50-52]。水文地质单元对含气量有明显的控制作用,总体特征表现为承压区>弱径流区>补给区/径流区。

从鄂东缘煤系氦气含量和地下水文地质单元平面分布(图 19)可知,目前开采的煤系天然气主要处于承压区,不同区域位置煤系氦气分布存在明显差异。靠近薛关断层附近的中浅部煤层气中氦气含量明显较低,而稳定承压区的深部煤层气和致密砂岩气中氦气含量较高,说明封闭的水体环境是氦气富集的又一重要因素。

由前文沁水盆地煤层原位自生氦气含量可知,原位自生氦气含量和现今实测值相当,虽然可以说明原位自生氦气含量较低,但由鄂东缘煤系氦气含量可知,外源氦气是有可能进入煤层的。现今沁水盆地中煤层氦气含量极低有可能是保存条件不好,导致外源氦气进入后没能有效保存。Chen Biying^[18-19]等基于大气来源的稀有气体分馏模型,结合对沁水盆地的构造分析认为,沁水盆地在中新世的快速抬升导致了煤层中氦气损失接近 90%,而甲烷散失约 44%。

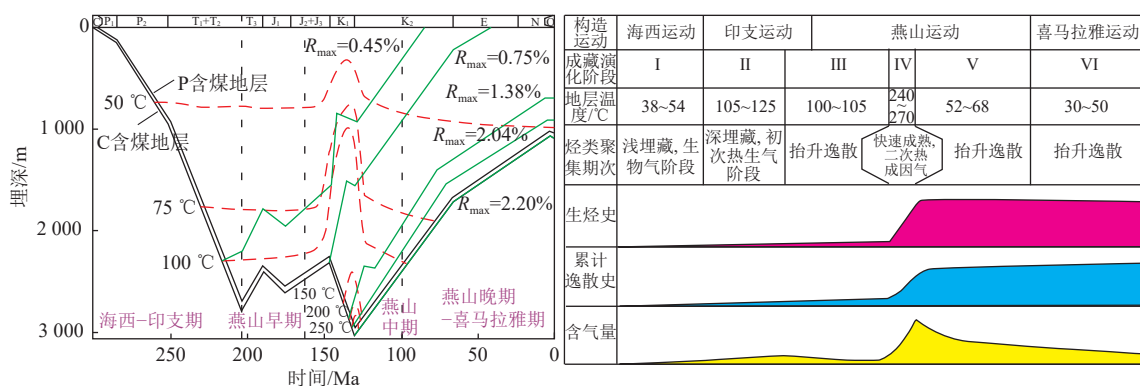


图 17 大宁-吉县区块典型井(JT2井)生烃埋藏史(据文献^[23], 修改)

Fig.17 Hydrocarbon generation and burial histories revealed by typical well JT2 in the Daning-Jixian block (modified after reference^[23])

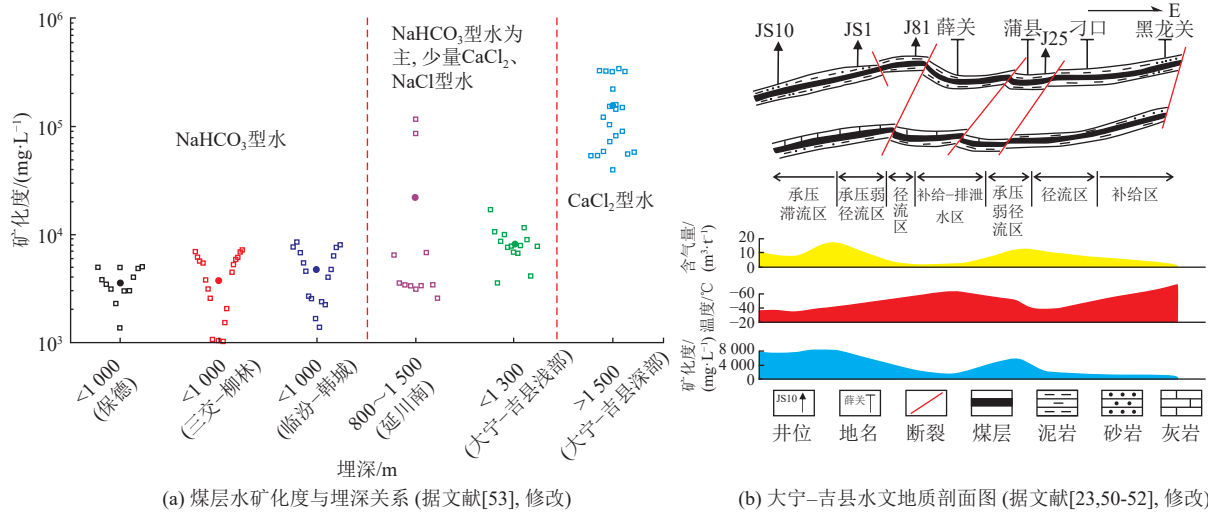


图 18 鄂东缘煤层水矿化度与水文地质剖面图

Fig.18 Water salinity and hydrogeological profile of coal seams along the eastern margin of the Ordos Basin

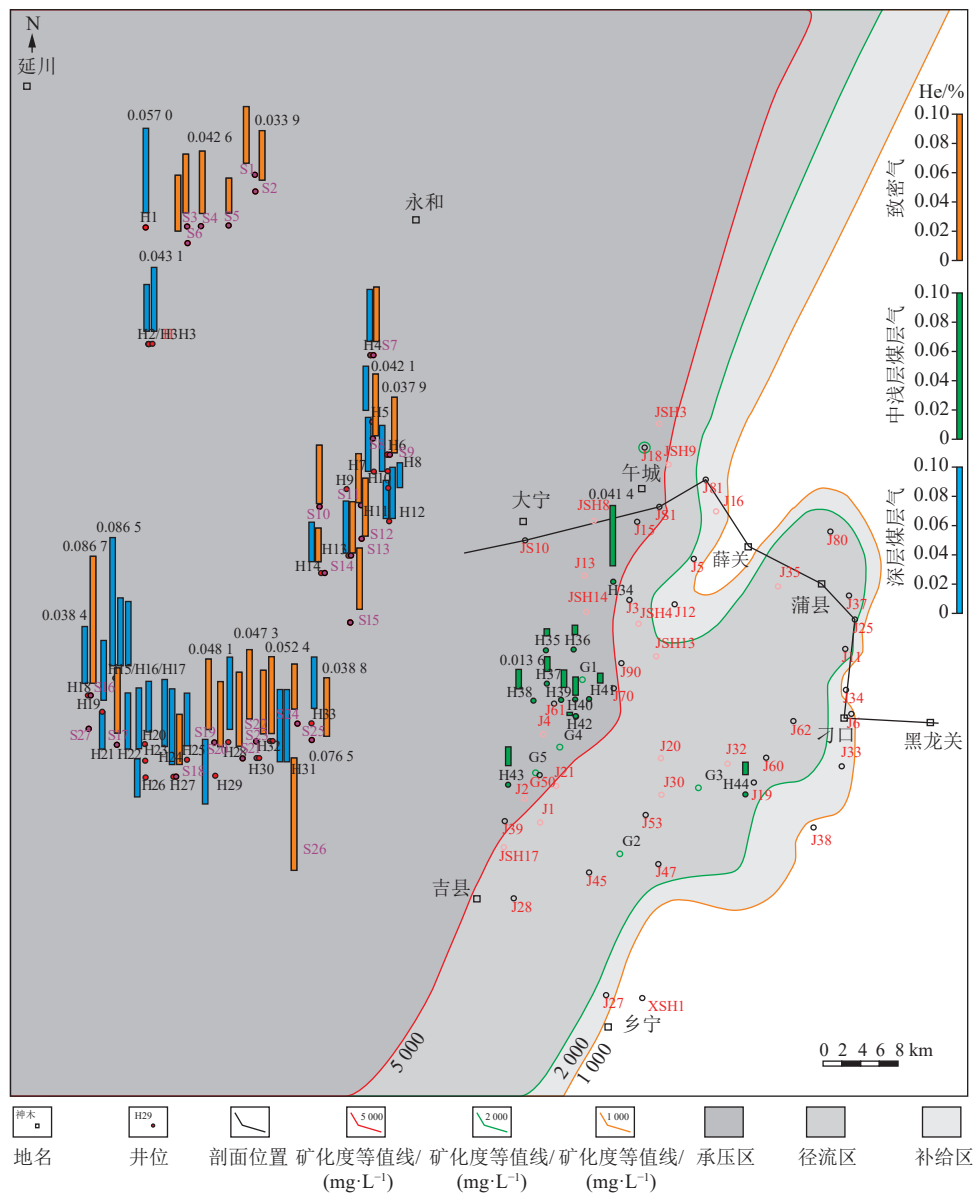


图 19 大宁-吉县区块水文地质单元与氦气分布
Fig.19 Hydrogeologic units and helium distribution in the Daning-Jixian block

综上所述,氦气保存条件对氦气的富集至关重要。从 Chen Biying^[18-19] 等对沁水盆地氦气和甲烷散失量的计算结果可以发现,氦气和甲烷保存条件有差异,同等条件下,氦气散失更多。对于这一结果,后期还需要进一步研究氦气和甲烷的保存条件的差异性。

4.5 富集主控因素

煤系氦气富集成藏是氦气生成、运移、聚集、保存、散失的动态平衡。因此,有效及主力氦源的分布是决定煤系氦气能否富集成藏的根本因素。同时,有效的运移输导体系统是煤系氦气在哪里聚集成藏的关键,良好的保存条件是煤系氦气富集成藏的重要因素。对于鄂东缘和沁水盆地,由于煤系中 U、Th 含量较低,所以原位自

生氦气较少,在没有外源氦气补充的情况下很难形成富氦煤层气;同时,当保存条件较差、煤层气藏形成后发生剧烈构造变化时,不利于氦气的保存,如沁水盆地(图 20a)。除了煤系氦源外,若存在古老的基底岩浆岩、花岗岩、变质岩、铝土岩等氦源,在距离基底较近或有断裂系统沟通的地区,深部氦气向上运移进入煤系(如三交北区块),多源供氦为富氦煤系气的形成奠定了基础(图 20b)。韩城和大宁-吉县区块中浅部煤层气距地表较近,水动力条件较强,不利于氦气的保存,所以煤层气中氦气浓度较低;与之相反,深部煤系水体处于相对封闭的体系中,地层水对氦气形成了很好的封堵作用,导致深部煤层气和煤系致密气中氦气含量相对较高。

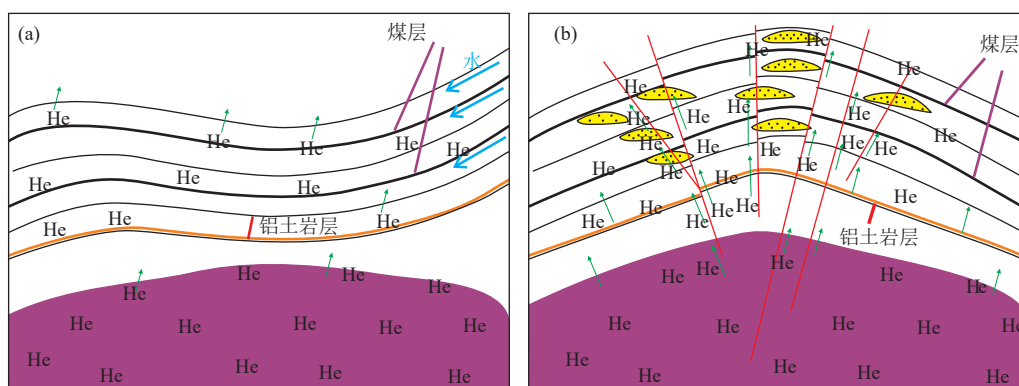


图 20 煤系天然气中氦气成藏模式

Fig.20 Helium accumulation mode of coal-measure gas in the Daning-Jixian block

5 氦气资源潜力和勘探开发建议

虽然很大部分煤系天然气中氦气浓度很难达到 0.1% 的富氦天然气标准,但是,煤系分布面积广,煤系天然气和氦气资源开发潜力巨大,深部煤层气和致密气资源量大,其中的氦气浓度相对稳定。根据前人研究结果^[54],鄂东缘大宁-吉县区块深部煤层气探明地质储量为 $762.08 \times 10^8 \text{ m}^3$,以 0.03% 的氦气含量测算,氦气储量可达 $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

目前,我国已经攻克了多组分煤层气变压吸附脱碳、浓缩、提氦一体化分离关键技术以及膜分离和高效精制纯化耦合关键技术,并在甘肃窑街海石湾煤矿承建全球首套 $3.6 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 含氦煤层气提取高纯氦气装置,并顺利产出 99.9999% 以上的高纯氦气,标志着我国已经解决了从含-富氦煤层气中提取高纯度氦气的技术难题^[55]。应加大对氦气资源勘探开发的重视程度,尤其要重视深部煤层气以及致密气中的低浓度氦气和三交北区块富氦煤系气的提氦潜力,避免这部分氦气资源浪费。同时,为了降低成本,应继续加强对贫氦-含氦煤系天然气和常规天然气的提氦技术攻关,为有效利用煤系天然气及常规天然气中的低浓度氦气提供技术支撑,以

保障我国氦气资源安全。结合目前国内对深部煤系气的勘探契机,建议在全国各大煤层气、煤系气研究区开展煤层气中氦气资源系统调查与评价,加大煤层气中天然气组分检测、分析力度,将煤系氦气资源勘查与油气风险勘探充分融合,加强全国深部煤层中富氦区带风险勘探力度,推动煤系氦气储量规模的快速发现,对具备提氦的煤层气田/区建设提氦工程。在寻找氦气资源的同时,继续深化煤层气中氦气富集机理的研究,揭示我国氦气富集规律,加快研发氦气探测技术和装备,建立氦气资源评价方法和勘探流程,实现氦气有利富集区带的优选、预测并开展应用示范研究,为富氦煤层气田/区勘探提供理论依据和技术、装备支撑。

6 结论

(1) 鄂东缘煤系天然气中原位自生氦气极少,主要是外源氦气,深部基底岩石、铝土岩、和紫金山岩体是煤系中氦气的主力来源,氦源岩的分布决定了煤系中氦气的分布。其中,大宁-吉县区块煤系致密气和深部煤层气中氦气含量高于中浅部煤层气,但都属于贫氦煤系气;三交北区块煤系气中氦气含量较高,相当一部分并可以达到富氦煤系气标准。沁水盆地煤层气中氦气含

量极低,平均值小于 0.001%。

(2) 鄂东缘断裂系统是深部氦源和紫金山岩体中氦气的有利运移通道,断裂系统的发育强度和位置是鄂东缘氦气运移、聚集的关键;有效的盖层和封闭的水体环境是氦气的有利保存条件。相比之下,沁水盆地水动力条件较强,不利于氦气保存,加之后期构造抬升是氦气散失的主要原因。

(3) 鄂东缘深部煤层气和煤系致密气中氦气浓度相对较低,但是资源量巨大,应加强对贫氦-含氦煤系天然气的提氦技术攻关,以高效利用低浓度氦气;同时,应加强全国煤层气/煤系气区块氦气资源勘查力度,将煤系氦气资源勘查与油气风险勘探充分融合,加强全国深部煤层中富氦区带风险勘探力度,推动煤系氦气储量规模的快速发现。深化氦气富集机理研究,揭示我国氦气富集规律,研发氦气探测技术和装备,实现氦气有利富集区带的优选、预测并开展应用示范研究,对具备提氦条件的煤层气田/区建设提氦工程,为保障国家氦气资源安全提供理论和技术支撑。

符号注释:

$(^3\text{He}^4\text{He})_s$ 为样品 $^3\text{He}^4\text{He}$ 比值; $(^3\text{He}^4\text{He})_m$ 为幔源 $^3\text{He}^4\text{He}$ 比值; $(^3\text{He}^4\text{He})_c$ 为壳源 $^3\text{He}^4\text{He}$ 比值; STP 表示标准温度和压力,即 0 °C 和 0.1 MPa; t 为岩石形成时间, a ; $t_{1/2}$ 为半衰期, a ; $[U]$ 、 $[\text{Th}]$ 为放射性元素 U、Th 的质量分数, 10^{-6} 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 陶士振, 杨怡青, 陈悦, 等. 氦气资源形成地质条件、成因机理与富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 436-452.
TAO Shizhen, YANG Yiqing, CHEN Yue, et al. Geological conditions, genetic mechanisms and accumulation patterns of helium resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 436-452.
- [2] 李剑, 王晓波, 徐朱松, 等. 中国氦气资源成藏规律与开发前景[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(5): 851-868.
LI Jian, WANG Xiaobo, XU Zhusong, et al. Helium resources accumulation regulations and their development prospects in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(5): 851-868.
- [3] 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, 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.
- [4] 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.
- [5] 贾凌霄, 马冰, 王欢, 等. 全球氦气勘探开发进展与利用现状[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1427-1437.
JIA Lingxiao, MA Bing, WANG Huan, et al. Progress and utilization status of global helium exploration and development[J]. *Geology in China*, 2022, 49(5): 1427-1437.
- [6] 张宇轩, 吕鹏瑞, 牛亚卓, 等. 全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 11-32.
ZHANG Yuxuan, LÜ Pengrui, NIU Yazhuo, et al. Preliminary study on the geological characteristics, resource potential and production capacity pattern of global helium resources[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 11-32.
- [7] 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, 2022, 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*, 2022, 55(4): 1-10.
- [8] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2024[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2023: 88-89.
- [9] 尤兵, 陈践发, 肖洪, 等. 富氦天然气藏氦源岩特征及关键评价参数[J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 141-154.
YOU Bing, CHEN Jianfa, XIAO Hong, et al. Characteristics and key evaluation parameters of helium source rocks in helium-rich natural gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(11): 141-154.
- [10] 刘军, 王波, 周飞, 等. 柴达木盆地东坪气田氦源岩成因及其对天然气藏中氦气的影响[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 601-617.
LIU Jun, WANG Bo, ZHOU Fei, et al. Genesis of helium source rock in Dongping Gas Field, Qaidam Basin and its influence on helium in natural gas reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 601-617.
- [11] 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.
- [12] 秦胜飞, 李济远, 王佳美, 等. 中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 125-134.
QIN Shengfei, LI Jiyuan, WANG Jiamei, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 125-134.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 贺政阳, 杨国军, 周俊林, 等. 柴达木盆地北缘天然气中氦气富集规律与远景区预测[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 45–60.
- HE Zhengyang, YANG Guojun, ZHOU Junlin, et al. Helium enrichment law and predication of prospective areas of the North Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 45–60.
- [16] 李玉宏, 王行运, 韩伟. 陕西渭盆地氦气资源赋存状态及其意义[J]. *地质通报*, 2016, 35(2/3): 372–378.
- LI Yuhong, WANG Yunxing, HAN Wei, et al. Mode of occurrence of helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2/3): 372–378.
- [17] 赵栋, 王晓锋, 刘文汇, 等. 孔隙水中氦气溶解与脱溶量估算方法及其地质意义[J]. *天然气工业*, 2023, 43(2): 155–164.
- ZHAO Dong, WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, et al. Calculation method and geological significance of dissolved and exsolved helium in pore water[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(2): 155–164.
- [18] CHEN Biying, STUART F M, XU Sheng, et al. Evolution of coalbed methane in Southeast Qinshui Basin, China: Insights from stable and noble gas isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2019, 529: 119298.
- [19] CHEN Biying. Evolution of coalbed methane in southeast Qinshui Basin, China: Insights from stable and noble gas isotopes[D]. Glasgow: University of Glasgow, 2021.
- [20] 秦胜飞, 赵姿卓, 吴伟, 等. 煤层气与页岩气含氮性及氦气富集条件[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(5): 890–901.
- QIN Shengfei, ZHAO Zizhuo, WU Wei, et al. Helium content and helium enrichment conditions of coalbed methane and shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(5): 890–901.
- [21] 陈燕燕, 陶士振, 杨秀春, 等. 页岩气和煤层气中氦气的地球化学特征和富集规律[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 684–696.
- CHEN Yanyan, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, et al. The geochemical characteristics and enrichment of helium in shale gas and coalbed methane[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 684–696.
- [22] 秦勇, 傅雪海, 韦重韬, 等. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] 要惠芳. 鄂尔多斯盆地东缘大吉地区煤系气地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [24] 汪小妹, 王小明, 潘思东, 等. 沁水盆地二叠纪煤的元素地球化学特征[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020.
- [25] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 30–41.
- YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 30–41.
- [26] MAMYRIN B A, TOLSTIKHIN L N. Helium isotopes in the earth's mantle[M]. Amsterdam: Elsevier science publishers B. V., 1984.
- [27] BROWN A A. Formation of high helium gases: A guide for explorationists[C]. AAPG Convention, New Orleans Louisiana, 2010.
- [28] 张雪. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHANG Xue. Accumulation conditions and resource prediction of nature gas and helium gas in Weihe Basin[D]. Xi'an: Changan University, 2015.
- [29] WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. Radiogenic helium concentration and isotope variations in crustal gas pools from Sichuan Basin, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 117: 104586.
- [30] 肖玉峰, 石强, 陈鹏, 等. 花岗岩储层测井解释方法研究及应用[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 2120–2125.
- XIAO Yufeng, SHI Qiang, CHEN Peng, et al. Research and application of logging interpretation method for granite reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(5): 2120–2125.
- [31] 严伟, 王建波, 刘帅, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组泥页岩储层测井识别[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 30–36.
- YAN Wei, WANG Jianbo, LIU Shuai, et al. Logging identification for the Longmaxi mud shale reservoir in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 30–36.
- [32] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 499–510.
- ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 499–510.
- [33] 时毓, 于津海, 徐夕生, 等. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2651–2670.
- SHI Yu, YU Jinhai, XU Xisheng, et al. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the Eastern Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2651–2670.
- [34] 刘蝶, 张海涛, 杨小明, 等. 鄂尔多斯盆地铝土岩储集层测井评价[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(3): 261–270.
- LIU Die, ZHANG Haitao, YANG Xiaoming, et al. Well logging evaluation of bauxite reservoirs in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(3): 261–270.
- [35] 李济远, 李玉宏, 胡少华, 等. “山西式”氦气成藏模式及其意义[J]. *西安科技大学报*, 2022, 42(3): 529–536.
- LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi-type” helium accumulation model and its essentiality[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(3): 529–536.
- [36] 南珺祥, 柳娜, 王邢颖, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩储层特征及形成机理[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(2): 288–296.
- NAN Junxiang, LIU Na, WANG Xingying, et al. Characteristics and formation mechanism of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(2): 288–296.
- [37] 张文雅, 张春阳, 刘治恒, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩储层录井评价[J]. *录井工程*, 2022, 33(3): 41–48.
- ZHANG Wenya, ZHANG Chunyang, LIU Zhiheng, et al. Mud logging evaluation of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin[J]. *Mud Logging Engineering*, 2022, 33(3): 41–48.
- [38] 赵栋, 王晓锋, 刘文汇, 等. 壳源富氦天然气藏潜在氦源岩主要特征及有效性分析[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(3): 507–517.
- ZHAO Dong, WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, et al. Main charac-

- teristics and effectiveness analysis of potential helium source rock in crustal source helium-rich gas reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(3): 507–517.
- [39] 孙彩蓉. 鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠系页岩沉积相及微量元素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- SUN Cairong. Study on sedimentary facies and geochemistry of trace elements of Carboniferous-Permian Shale in the Eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [40] 王慧玲, 姚泾利, 石小虎, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系地球化学特征及其地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(8): 1502–1517.
- WANG Huiling, YAO Jingli, SHI Xiaohu, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Taiyuan Formation bauxite series in the Longdong area of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8): 1502–1517.
- [41] 潘博, 赵伟波, 刘蝶, 等. 鄂尔多斯盆地神木—米脂地区本溪组含铝岩系地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(6): 1072–1089.
- PAN Bo, ZHAO Weibo, LIU Die, et al. Geochemical characteristics of bauxite deposits of Benxi Formation in Shenmu-Mizhi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(6): 1072–1089.
- [42] 黄锦江. 山西临县紫金山碱性环状杂岩体岩石学特征与成因研究[J]. *现代地质*, 1991, 5(1): 24–40.
- HUANG Jinjiang. A study on the petrological features and the origin of alkaline rocks of Zijinshan Ring complex in Lin Country, Shanxi Province[J]. *Geoscience*, 1991, 5(1): 24–40.
- [43] 刘超, 孙蓓蓓, 曾凡桂, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石西区块含氦天然气的发现及成因初探[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1280–1287.
- LIU Chao, SUN Beilei, ZENG Fangui, et al. Discovery and origin of helium-rich gas on the Shixi area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1280–1287.
- [44] 刘金兰. 重磁位场新技术与山西断陷盆地构造识别划分研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- LIU Jinlan. Development new technologies for potential field processing and research on the tectonic recognition & division of Shanxi Fault Basin[D]. Xi'an: Changan University, 2008.
- [45] 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 181–191.
- XIE Yinggang, QIN Yong, YE Jianping, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 181–191.
- [46] 田刚, 汶小岗, 薛海军, 等. 鄂尔多斯盆地北部重磁场及其基底断裂特征研究[J]. *地球学报*, 2024, 45(3): 279–290.
- TIAN Gang, WEN Xiaogang, XUE Haijun, et al. Study on gravity and magnetic fields and characteristics of basement faults in the Northern Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2024, 45(3): 279–290.
- [47] 田刚, 杨明慧, 宋立军, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及演化过程新认识[J]. *地球科学*, 2024, 49(1): 123–139.
- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al. New understanding of basement structural characteristics and its evolution process in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2024, 49(1): 123–139.
- [48] 田刚. 鄂尔多斯地块北部基底断裂特征及其构造意义[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- TIAN Gang. Characteristics of basement faults and its tectonic significance in the Northern Ordos Block[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [49] PRAY H A, SCHWEICKERT C E, MINNICH B H. Solubility of hydrogen, oxygen, nitrogen, and helium in water at elevated temperatures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, 44(5): 1146–1151.
- [50] 王丹. 临汾区块煤层气富集及产能影响因素研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- WANG Dan. The Research of Affective Facts of Production and Enrichment of CBM in Linfen Block[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2016.
- [51] 张凯. 临汾区块煤层气地质条件分析及开发对策研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- ZHANG Kai. Analysis of coalbed methane geological conditions and development countermeasures in Linfen Block[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [52] 牛海青. 鄂尔多斯盆地煤层气富集成藏规律研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2010.
- NIU Haiqing. The enriching and reservoiring laws of the coal bed methane in Ordos Basin[D]. Shandong: China University of Petroleum (EastChina), 2010.
- [53] 孙粉锦, 周国晓, 田文广, 等. 煤层气系统的定义、内涵、形成及应用: 以鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系煤层为例[J]. *天然气工业*, 2024, 44(7): 42–53.
- SUN Fenjin, ZHOU Guoxiao, TIAN Wenguang, et al. Definition, connotation, formation and application of coalbed methane system: A case study on the Carboniferous-Permian coal seams in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(7): 42–53.
- [54] 徐凤银, 侯伟, 熊先钺, 等. 中国煤层气产业现状与发展战略[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 669–682.
- XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 669–682.
- [55] 刘园园. 我国首套煤层气提取高纯氮气装置成功应用[N]. *科技日报*, 2024-01-05(8).

(责任编辑 范章群)