



移动阅读

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. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0098

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. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0098

# 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

马 勇<sup>1</sup>, 辛志源<sup>1</sup>, 陈践发<sup>1</sup>, 李玉宏<sup>2</sup>, 张修涛<sup>1</sup>, 蒋浩杰<sup>1</sup>, 陈泽亚<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:** 【目的】全球富氦气藏以常规天然气为主, 近年来在我国鄂尔多斯盆地及周缘石炭-二叠系煤系中发现含氦天然气, 揭示煤系氦气具有一定的资源潜力。但目前针对煤系氦气扩散运移机制的研究几乎处于空白, 严重制约煤系氦气富集规律的进一步研究。【方法】以沁水盆地北部太原组煤及其顶板泥岩为研究对象, 开展不同含水饱和度及气体含量(体积分数)煤系氦气物理扩散实验, 并结合区域沉积埋藏史及生烃演化史模拟计算煤与泥岩中氦气扩散通量, 揭示煤系氦气富集机制。【结果和结论】(1) 实验温压条件下(20 ℃, 气体压力为 1 MPa), 在 $\leq 13.5$  nm 孔隙中氦气以 Knudsen 扩散为主, 煤与泥岩中氦气的扩散速率相近; 在 $>13.5$  nm 孔隙中氦气转为 Fick 扩散。煤系氦气扩散主要受孔隙结构、含水性和气体含量影响, 孔隙连通性越差、含水饱和度越高、氦气含量越低, 氦气扩散越慢, 封闭能力越强。(2) 煤中割理-裂缝系统发育, 连通性较好, 导致煤中氦气扩散系数( $1.1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s) 高于泥岩( $5.8 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s)。高含水性通过阻塞孔隙通道和改变气-液界面行为降低氦气扩散速率, 而气体含量对扩散速率的影响主要与气体分压和氦气与甲烷物理性质差异有关。(3) 结合物理模拟和数值模拟结果, 建立了地质历史时期氦气扩散通量预测模型, 标准状态下煤和泥岩中的氦气扩散通量分别为 13.24、5.05 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 氦气扩散主要发生在含量较高的烃类生成初期, 后期逸散量可忽略不计。(4) 煤系生氦能力较弱, 煤系氦气的富集成藏是外源补给与保存动态平衡的结果, 深部断裂促进深部氦气向上运移, 而低含量梯度、高含水饱和度及低连通性通过抑制扩散速率而增强氦气的封存能力。煤系氦气勘探需重点关注深部断裂系统沟通能力及盖层封存有效性。

**关键词:** 煤系氦气; 扩散机制; 扩散通量; 预测模型; 富集机理

**中图分类号:** TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)06-0058-12

## Diffusion mechanisms of coal-measure helium and their implications for helium accumulation: A case study of the Taiyuan Formation, northern Qinshui Basin, China

MA Yong<sup>1</sup>, XIN Zhiyuan<sup>1</sup>, CHEN Jianfa<sup>1</sup>, LI Yuhong<sup>2</sup>, ZHANG Xiutao<sup>1</sup>, JIANG Haojie<sup>1</sup>, CHEN Zeya<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

**Abstract:** [Objective] The global helium-rich gas reservoirs are dominated by conventional natural gas reservoirs. In recent years, helium-bearing natural gas has been discovered in the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin and surrounding regions, revealing the resource potential of coal-measure helium. However, there is almost a total

收稿日期: 2025-02-10 接收日期: 2025-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA0719000); 国家自然科学基金项目(42173030)

第一作者: 马勇, 1988 年生, 男, 山东临清人, 博士, 副教授。E-mail: mayong@cup.edu.cn

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

lack of studies on mechanisms underlying the diffusion and migration of coal-measure helium. This severely restricts further research on the accumulation patterns of coal-measure helium. [Methods] This study investigated a coal seam in the Taiyuan Formation in the northern Qinshui Basin and mudstones in the coal seam roof. Using physical diffusion experiments on coal-measure helium under different water saturations and gas concentrations, as well as the simulation of the regional sedimentary, burial, and hydrocarbon generation histories, this study calculated the helium diffusion fluxes in the coals and mudstones. Accordingly, the mechanisms behind the enrichment of coal-measure helium gas were determined. [Results and Conclusions] Under experimental temperature (20 °C) and pressure (1 MPa), helium diffusion was dominated by Knudsen diffusion in pores with sizes less than or equal to 13.5 nm, with similar diffusion rates observed in the coals and mudstones. In contrast, helium diffusion shifted to Fick diffusion in pores with sizes greater than 13.5 nm. The diffusion of coal-measure helium gas was primarily affected by pore structure, water content, and gas concentration. Poorer pore connectivity, higher water saturation, and a lower helium concentration corresponded to slower helium diffusion and a higher sealing capacity. The coals exhibited a developed cleavage-fracture system, which contributed to high connectivity. As a result, the coals had a higher helium diffusion coefficient ( $1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) than the mudstones ( $5.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ). High water content reduced the helium diffusion rate by blocking pore pathways and changing the behavior of the gas-liquid interface. The influence of the gas concentration on the helium diffusion rate was principally related to both the partial pressures of gases and differences in physical properties between helium and methane. In combination with the physical and numerical simulation results, this study established a prediction model for the helium diffusion flux throughout geological history. The prediction results indicate that the helium diffusion fluxes in the coals and mudstones were  $13.24 \text{ cm}^3/\text{m}^2$  and  $5.05 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ , respectively under standard temperature and pressure conditions. Furthermore, the helium diffusion occurred predominantly in the early hydrocarbon generation stage with high gas concentrations, while the amount of helium escaping in the later stage can be ignored. Given the relatively weak helium generation capacity of the coal measures, the enrichment and accumulation of coal-measure helium resulted from the dynamic balance between exogenetic recharge and preservation. Deep faults facilitate the upward migration of deep helium. Meanwhile, the low gas concentration gradient, high water saturation, and low connectivity enhance the helium storage capacity by suppressing diffusion. Therefore, it is necessary to highlight the connectivity of deep fault systems and the sealing performance of cap rocks in the exploration of coal-measure helium.

**Keywords:** coal-measure helium; diffusion mechanism; diffusion flux; enrichment mechanism; prediction model

氦气作为战略性稀有气体,在航天发射、核工业及尖端医疗设备等领域具有不可替代性,而我国氦气资源对外依存度长期高于90%,资源安全形势严峻<sup>[1]</sup>。目前全球探明的具有工业价值的氦气资源主要分布在古老克拉通盆地隆起区及周缘的富氦天然气藏,几乎全部以壳源氦为主,如美国 Hugoton-Panhandle 气田、阿尔及利亚 Hassi R'Mel 气田、我国威远气田和东胜气田等<sup>[2-4]</sup>。随着我国氦气资源勘探力度的加大,近年来相继在鄂尔多斯盆地和沁水盆地石炭-二叠系煤系中报道有含氦、富氦天然气<sup>[5-7]</sup>,特别是鄂尔多斯盆地东缘煤系气中氦气体积分数最高达0.23%<sup>[6]</sup>,显示出煤系氦气具有良好的资源潜力和研究前景。

与富氦天然气藏相比,煤系非常规天然气中氦气富集具有其独特性且目前研究相对薄弱,主要体现在以下3方面。(1) 氦气来源不同:富氦天然气藏中氦气几乎全部来自外源氦(包括古老基底岩石衰变形成的壳源氦和部分深部幔源氦),煤层气及页岩气等储层岩石 U、Th 放射性衰变形成源内氦,且由于煤层中平均 U、Th 含量低于页岩且生烃潜力更高,导致煤层气源内生氦潜力低于页岩气。(2) 氦气运移聚集机制不同:一般认为

富氦天然气藏由基底花岗岩衰变形成的氦气,通过溶解在地层水或氦气中扩散至地壳浅层,由于氦气在地层水和天然气中亨利系数的差异发生解吸并聚集成藏<sup>[8]</sup>,而氦气能否扩散至煤层尤其是泥岩中并聚集成藏目前研究较为薄弱。(3) 氦气保存条件不同:富氦天然气藏普遍发育膏盐岩盖层,其次为泥页岩,地层水径流迟滞,水动力较弱,而煤层一方面本身割理、面理较为发育,另一方面由于煤层气普遍埋藏较浅,整体处于承压区—弱径流区,水动力相对较强,煤系氦气的保存条件尚不清楚。因此,加快开展煤系氦气扩散研究对于明确氦气富集及保存条件具有重要意义。

气体在岩石孔隙中的扩散是复杂的物理过程,涉及 Fick 扩散、Knudsen 扩散和表面扩散,不同扩散方式影响机理不同。当孔径大于氦气分子平均自由程时为 Fick 扩散,扩散速率由温压条件和孔隙连通性决定<sup>[9-11]</sup>。当孔径小于氦气分子平均自由程时为 Knudsen 扩散,扩散速率由分子与孔壁碰撞频率决定,与压力无关,主要取决于温度和孔隙结构<sup>[12-14]</sup>。表面扩散指吸附在孔壁上气体分子的跳跃式迁移,由于氦气吸附性较弱,一般不考虑氦气在岩石表面的扩散。此外,富氦天然气是

以甲烷为主要组分的混合气体,其扩散行为受多组分竞争扩散与分子间相互作用双重控制。当氦气含量不同时,分子间碰撞频率、能量传递方式等都会发生变化,进而直接影响煤系氦气扩散速率<sup>[15]</sup>。目前仅有少数学者实验测定过盐岩中纯氦气扩散系数( $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )<sup>[16]</sup>,而针对煤和泥岩中氦气尤其是不同含量体积分数氦气扩散行为的实验研究几乎处于空白。

针对上述问题,笔者选取沁水盆地北部太原组煤层及其顶板泥岩为研究对象,通过自主研发的氦气扩散物理模拟系统,基于 Fick 定律建立扩散系数计算模型,系统开展煤和泥岩在不同含水饱和度、氦气含量条件下的扩散物理模拟实验,并结合岩石孔径分布特征探讨煤系氦气的扩散行为及主控因素。在此基础上,综合盆地沉积-埋藏演化历史,构建地质历史时期煤系氦气扩散通量预测模型,为我国煤系氦气资源勘探提供理论支撑。

## 1 地质背景

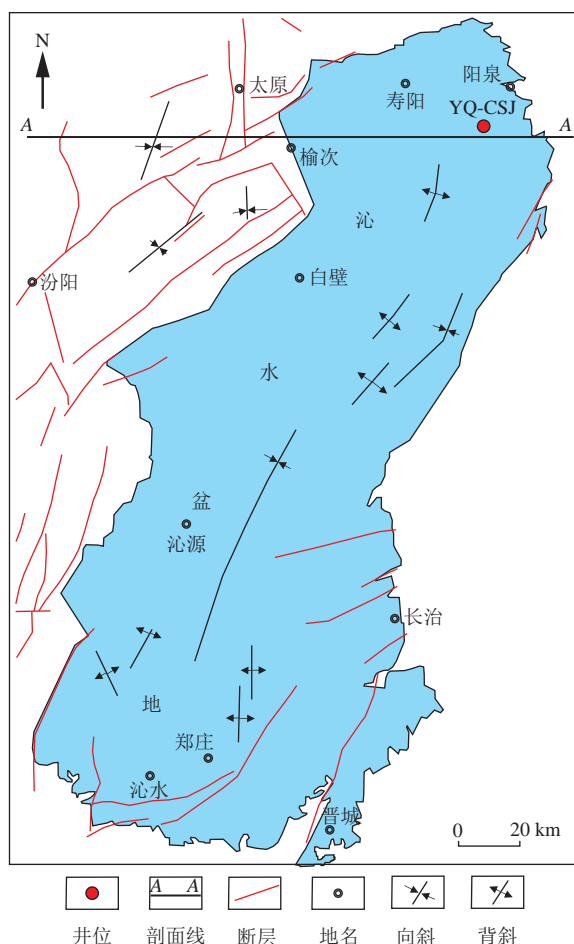
沁水盆地是发育在上太古界—下元古界变质岩基底之上,由古生界和中生界组成的一个蕴含丰富煤系天

然气的沉积盆地(图 1)。沁水盆地的构造演化大致可分为 3 个阶段(图 1c)<sup>[17-19]</sup>。

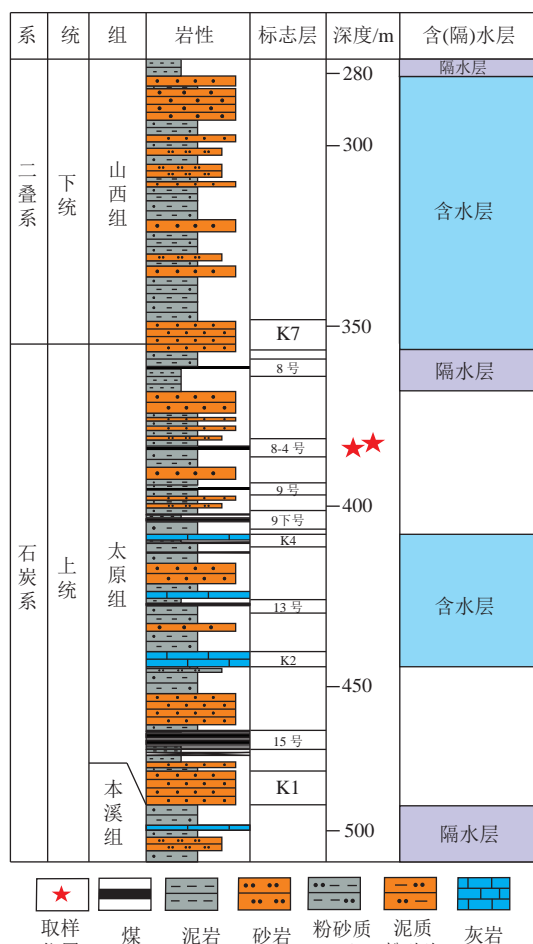
(1) 克拉通演化阶段。中晚元古代周缘洋壳向华北古陆的持续俯冲奠定了克拉通基底雏形,从寒武纪到早奥陶世,沁水盆地所在的华北克拉通盆地构造-沉积环境稳定,以陆表海碳酸盐岩沉积为主。中奥陶世以后,加里东运动造成华北地台的整体抬升引发区域性沉积间断,普遍缺失上奥陶统一石炭统。早石炭世晚期,华北克拉通盆地逐渐下沉,进入了晚石炭世—二叠纪海陆过渡相煤系沉积建造阶段。

(2) 成盆演化阶段。三叠纪末期—早侏罗世开始,由于太平洋板块与印度板块对华北板块的俯冲,在研究区形成 NW-SE 向挤压应力,沁水盆地东部的太行山和西部吕梁山强烈隆起,形成呈复式向斜的沁水盆地雏形。自三叠纪起,沁水盆地快速沉降,沉积了厚达数千米的河湖相碎屑岩。早、中侏罗世沉积仅分布在晋中断陷东侧附近局部区域。

(3) 盆地改造阶段。随着喜马拉雅期多次的拉张—挤压抬升,特别是太行山—霍山隆起的差异隆升与边界断裂构造反转,使早期形成的褶皱进一步被改造,逐渐



(a) 沁水盆地构造纲要



(b) YQ-CSJ1 井地层柱状

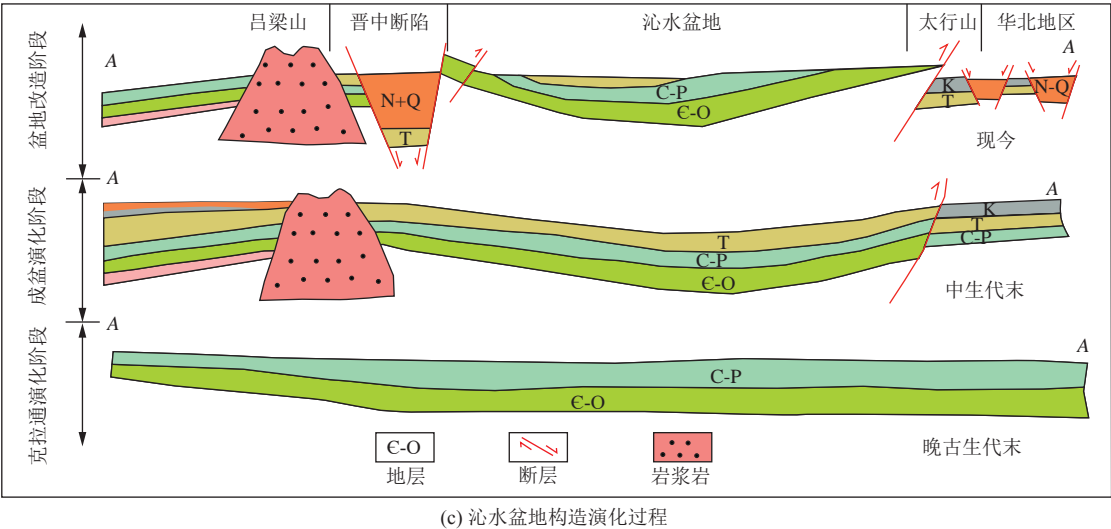


图 1 沁水盆地构造及地层柱状图<sup>[17-19]</sup>

Fig.1 Tectonic evolution and stratigraphic column of the Qinshui Basin<sup>[17-19]</sup>

形成现在的构造格局。

在克拉通演化阶段，自晚石炭世本溪期开始受来自 NEE 向海水入侵，发育了障壁岛—潟湖沉积体系，岩性以砂岩、泥岩、透镜状灰岩为主，见少量薄煤层。太原组沉积时期，受阶段性海侵—海退作用，沁水盆地沉积了多个由潟湖或潮坪相泥岩、砂岩、沼泽煤层、碳酸盐台地灰岩组成的旋回性组合。进入下二叠统山西组沉积时期，沉积环境逐渐演变为浅水三角洲，在三角洲平原及前缘沉积多套沼泽煤层。

本次实验岩心样品取自沁水盆地北部寺家庄井田，选取石炭—二叠系煤系气的 1 口参数井，重点针对太原组 8-4 号煤层及其顶板泥岩(图 1a—图 1b) 进行采样与测试。

2 煤系氦气扩散实验

2.1 氦气扩散物理模拟

使用具有自主知识产权的氦气扩散物理模拟装置开展煤及泥岩氦气扩散实验，该装置主要由气体混合模块、压力平衡模块和气体成分检测模块 3 部分组成(图 2)。所有扩散实验采用统一实验条件，其中，温度 20 ℃，围压 5 MPa，气体压力 1 MPa。主要实验流程如下。

(1) 气密性检查：将直径为 2.54 cm、长度为 5 cm 不锈钢柱塞样品装入岩心夹持器内，施加围压至 5 MPa，向扩散室 K1、K2 分别充入 1 MPa 氮气，关闭阀门后静置 2 h，待扩散室压力无衰减则判定装置气密性合格。

(2) 加注扩散气体：气密性检查合格后，重复上述步

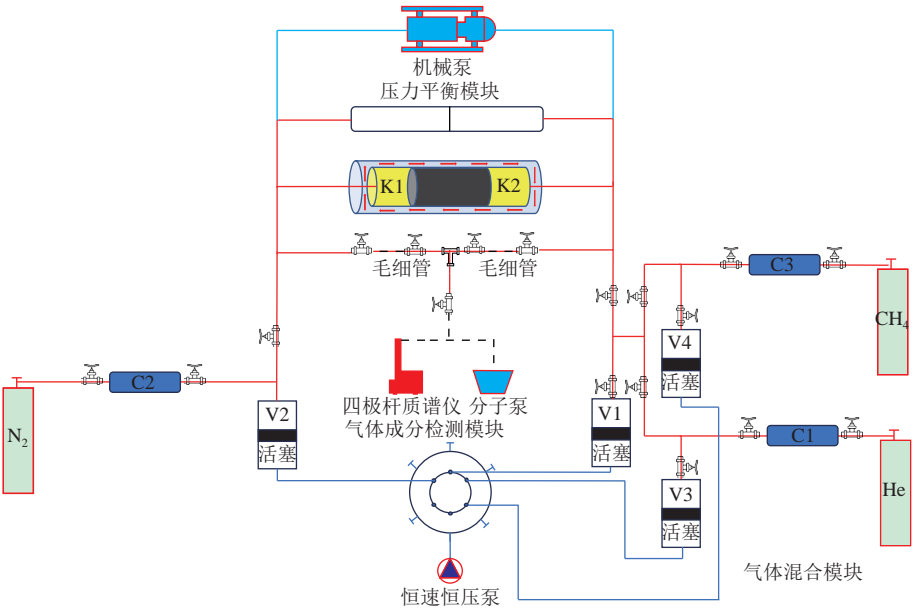


图 2 氦气扩散物理模拟实验装置

Fig.2 Experimental set up for the physical simulation of helium diffusion

骤装载岩心样品。先用机械泵后用分子泵对系统内部抽真空 4~5 h。向 K1 和 K2 两个扩散室同步注入氮气和氦气,达到 1 MPa 实验设定压力时,断开气源。利用气体混合模块开展不同含量(体积分数)氦气扩散实验,通过恒速恒压泵、六通阀连接活塞容器控制气体压力,配比不同含量(体积分数)氦气和甲烷混合气体,并通过四级杆质谱仪进行实验测定。配比好的不同体积分数氦气同样注入扩散室 K2,与扩散室 K1 氮气进行扩散实验。实验通过活塞容器实现 K1 和 K2 两个扩散室之间气体压力平衡,确保岩心两侧气体完全是在相同压力下开展的扩散实验。

(3) 气体成分检测:实验前用标准气样对四级杆质谱仪进行标定,成分检测采用毛细管取样器,每次检测后对四级杆质谱仪及进样系统进行抽真空处理,确认进样系统无杂质后再测另一侧扩散室气体成分。每间隔 8~10 h 检测扩散室 K1、K2 气体成分,从而获得不同时间两个扩散室的气体含量。

煤和泥岩新鲜样的含水饱和度分别为 38% 和 6%,由于煤层中通常含水,本次实验还设计了不同含水饱和度和煤的氦气扩散实验,其测试方法同上。

## 2.2 氦气扩散理论计算模型

扩散室 K1 体积为  $V_1$ ,初始充注气体为氮气,初始氦气体积分数为 0;扩散室 K2 体积为  $V_2$ ,初始充注气体为氦气,初始体积分数为  $C_0$ 。扩散室两侧通过多孔介质(2.54 cm 岩心样品,横截面积为  $A$ ,长度为  $L$ )相连。 $t$ 时刻扩散室 K1、K2 体积分数分别为  $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 。多孔介质中的扩散通量遵循 Fick 第一定律,在  $x=0$  和  $x=L$  处,氦气的净通量引起两侧扩散室体积分数变化,氦气分子从高含量区域(扩散室 K2)扩散到低含量区域(扩散室 K1),扩散通量<sup>[20-22]</sup>表达式为

$$J = -D \frac{\partial C_{\text{He}}}{\partial x} \quad (1)$$

扩散室 K1 和扩散室 K2 质量守恒方程为:

$$\frac{dC_1(t)}{dt} = \frac{A}{V_1} J \quad (2)$$

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = -\frac{A}{V_2} J \quad (3)$$

两端体积分数已知条件下,通量  $J$  可通过体积分数梯度表示。

$$J = -D \frac{C_2(t) - C_1(t)}{L} \quad (4)$$

扩散室 K1 和扩散室 K2 扩散通量  $J$  代入质量守恒方程得:

$$\frac{dC_1(t)}{dt} = \frac{AD}{V_1 L} (C_2(t) - C_1(t)) \quad (5)$$

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = -\frac{AD}{V_2 L} (C_2(t) - C_1(t)) \quad (6)$$

引入变量  $\Delta C(t) = C_2(t) - C_1(t)$ , 式(5)、式(6)两式相减得一阶线性微分方程。

$$\frac{d\Delta C(t)}{dt} = -\left(\frac{AD}{L}\right)\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)\Delta C(t) \quad (7)$$

可进一步求得  $C_1(t)$  和  $C_2(t)$  体积分数方程。

$$C_1(t) = C_0 \left(1 - \frac{V_2}{V_1 + V_2} \exp\left(-\frac{AD}{L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)t\right)\right) \quad (8)$$

$$C_2(t) = C_0 \frac{V_1}{V_1 + V_2} \exp\left(-\frac{AD}{L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)t\right) \quad (9)$$

简化式(8)和式(9)得:

$$\ln\left(1 - \frac{C_1(t)}{C_0} \cdot \frac{V_1 + V_2}{V_2}\right) = -\frac{AD}{L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)t \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{C_2(t)(V_1 + V_2)}{C_0 V_1}\right) = -\frac{AD}{L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)t \quad (11)$$

扩散室 K1 和扩散室 K2 不同时间的体积分数  $C_1(t)$  和  $C_2(t)$  可通过实验检测获得,线性拟合式(10)和式(11)便可计算出扩散系数  $D$ 。

## 2.3 煤和泥岩中氦气扩散系数

不同测试条件下煤和泥岩的氦气扩散系数见表 1。从本次实验结果中可以看出,针对原始含水状态下煤和泥岩样品的纯氦气扩散实验,氦气在煤中的扩散系数( $1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ )约是泥岩( $5.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )的两倍。煤和泥岩中氦气的扩散系数均随氦气体积分数降低而减

表 1 不同氦气体积分数和含水饱和度下煤和泥岩中氦气扩散系数

Table 1 Helium diffusion coefficients in coal and mudstone samples under different helium concentrations and water saturations

样品编号	岩性	气体成分		含水饱和度/%	扩散系数/ $10^{-10} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
		He 体积分数/%	CH <sub>4</sub> 体积分数/%		
YQ-CSJ-1	煤	100	0	0	180
		100	0	70	85
		100	0	38	110
		80	20	38	110
		60	40	38	99
		40	60	38	85
		20	80	38	64
YQ-CSJ-2	泥岩	100	0	6	58
		80	20	6	45
		60	40	6	31
		40	60	6	13
		20	80	6	5.2

注:所有实验均在温度 20 ℃、围压 5 MPa、气体压力 1 MPa 条件下进行。煤和泥岩新鲜样的含水饱和度分别为 38% 和 6%。



小,当氦气体积分数从 100% 降低至 20% 时,其氦气扩散系数分别降低了 42% 和 80%。此外,随着煤的含水饱和度从 0 增加至 70% 时,其扩散系数从  $1.8\times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  降低至  $8.5\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ ,降低了 53%。

### 3 煤系氦气扩散影响因素

#### 3.1 孔隙结构

如前所述,氦气在煤和泥岩中扩散主要包括 Fick 扩散和 Knudson 扩散,其主要由岩石孔隙结构和氦气分子平均自由程决定<sup>[23]</sup>。分子平均自由程指气体分子间发生碰撞之前,分子平均能够移动的距离,其与气体分子的直径、气体压力和温度有关,计算公式为

$$\lambda=\frac{k_{\text{B}}T}{\sqrt{2}\pi d^2p}\tag{12}$$

为研究孔隙结构对氦气在煤和泥岩中扩散方式的影响机制,本文联合 CO<sub>2</sub> 吸附、N<sub>2</sub> 吸附、高压压汞和微米 CT 四种测试方法,系统表征煤和泥岩纳米级到微米级孔径的分布特征。图 3 和表 2 展示了 CO<sub>2</sub> 吸附、N<sub>2</sub> 吸附和高压压汞联合表征的煤和泥岩样品纳米级孔隙分布特征,可以看出,煤中微孔和宏孔较泥岩更为发育,

而泥岩中介孔相对更为发育。以本次实验温压条件下计算的氦气分子平均自由程 13.5 nm 为界限,煤和泥岩孔径在 13.5 nm 以下的孔隙体积分别为 0.014 5、0.012 5 cm<sup>3</sup>/g,较为接近;而煤中孔径 13.5 nm 以上的孔隙体积(0.012 7 cm<sup>3</sup>/g)是泥岩(0.005 5 cm<sup>3</sup>/g)的两倍有余(表 2)。

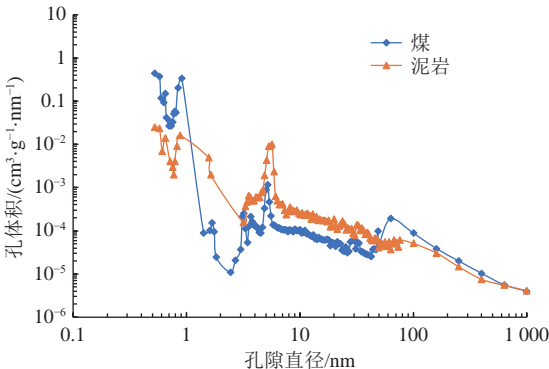


图 3 CO<sub>2</sub> 吸附、N<sub>2</sub> 吸附和高压压汞联合表征煤和泥岩孔径分布曲线

Fig.3 Curves showing the pore size distributions of coal and mudstone samples characterized using CO<sub>2</sub> adsorption, N<sub>2</sub> adsorption, and mercury injection capillary pressure (MICP) techniques

表 2 煤和泥岩孔隙结构特征  
Table 2 Pore structure characteristics of coal and mudstone samples

样品编号	岩性	层位	深度/m	柱塞长度/cm	孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )			孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	
					微孔	介孔	宏孔	≤13.5 nm	>13.5 nm
YQ-CSJ-1	煤	太原组	384.27	5.58	0.013	0.003 2	0.011 0	0.014 5	0.012 7
YQ-CSJ-2	泥岩	太原组	384.57	3.35	0.002	0.015 7	0.000 3	0.012 5	0.005 5

注:微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)、宏孔(>50 nm);微孔数据源自CO<sub>2</sub>吸附实验的DFT模型,介孔数据源自N<sub>2</sub>吸附实验的BJH模型,宏孔数据源自高压压汞实验结果。

此外,针对扩散实验所使用的柱塞样品开展了微米 CT 扫描分析,其三维数据重构展示了煤(图 4)和泥岩(图 5)微米级孔隙和裂缝发育特征。结果显示,煤中微裂缝和割理均较为发育,连通性较好。其中,微裂缝主要顺层理方向发育,等效孔隙直径在 105~1 303 μm。此外,煤中发育两组相互垂直的面割理和断割理,其等效孔隙直径在 54~2 628 μm(图 4)。相较于煤中发育的大量裂缝网络,泥岩微裂缝几乎不发育,主要以粒间孔隙为主,其孔隙直径为 49~308 μm,且彼此间不连通(图 5)。

综前所述,在孔径小于氦气分子平均自由程(13.5 nm)的孔隙中,氦气主要以 Knudsen 扩散方式迁移,其扩散速率与孔径呈正相关关系<sup>[21-23]</sup>。泥岩与煤中 13.5 nm 以下的孔隙分布特征较为接近,因此,Knudsen 扩散在煤和泥岩纳米级孔隙中差异不显著。而在孔径大于氦气分子平均自由程(13.5 nm)的孔隙中,氦气扩散主要遵循 Fick 扩散规律,其扩散速率受温度、气体压力以及

孔隙连通性等因素控制<sup>[21-23]</sup>。煤中不仅 13.5 nm 以上纳米级孔隙为泥岩的 2 倍以上,而且煤中发育的大量微米级微裂缝、割理更是导致煤的连通性远优于泥岩,导致煤中氦气的 Fick 扩散速率要高于泥岩(表 1)。煤和泥岩扩散实验的温度和气体压力条件一致,孔隙连通性是影响煤和泥岩 Fick 扩散差异性最主要的因素。

#### 3.2 气体含量

本次研究针对煤和泥岩样品,分别设置了氦气体积分数为 100%、80%、60%、40% 和 20% 与甲烷混合的气体,探讨气体体积分数对煤系氦气扩散的影响机制。实验结果表明,煤和泥岩的氦气扩散系数均随氦气体积分数降低而减小。当氦气体积分数从 100% 降至 20% 时,煤中氦气扩散系数从  $1.1\times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  降至  $6.4\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ ,下降幅度为 42%;泥岩的氦气扩散系数从  $5.8\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  降至  $5.2\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ ,下降幅度达到 90%,其下降幅度显著高于煤的氦气扩散系数(图 6 和表 1)。

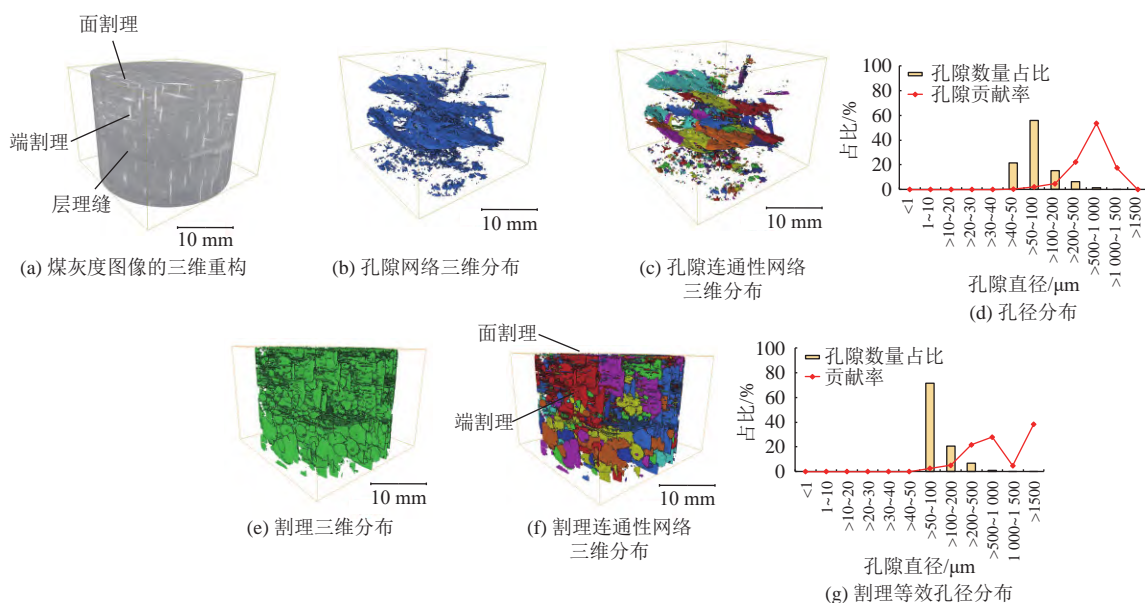


图 4 沁水盆地太原组煤(384.27 m)微米 CT 扫描三维重构孔隙网络及孔径分布

Fig.4 Pore network and pore size distribution of coal samples (depth: 384.27 m) from the Taiyuan Formation, Qinsui Basin derived from micro-CT-based 3D reconstruction

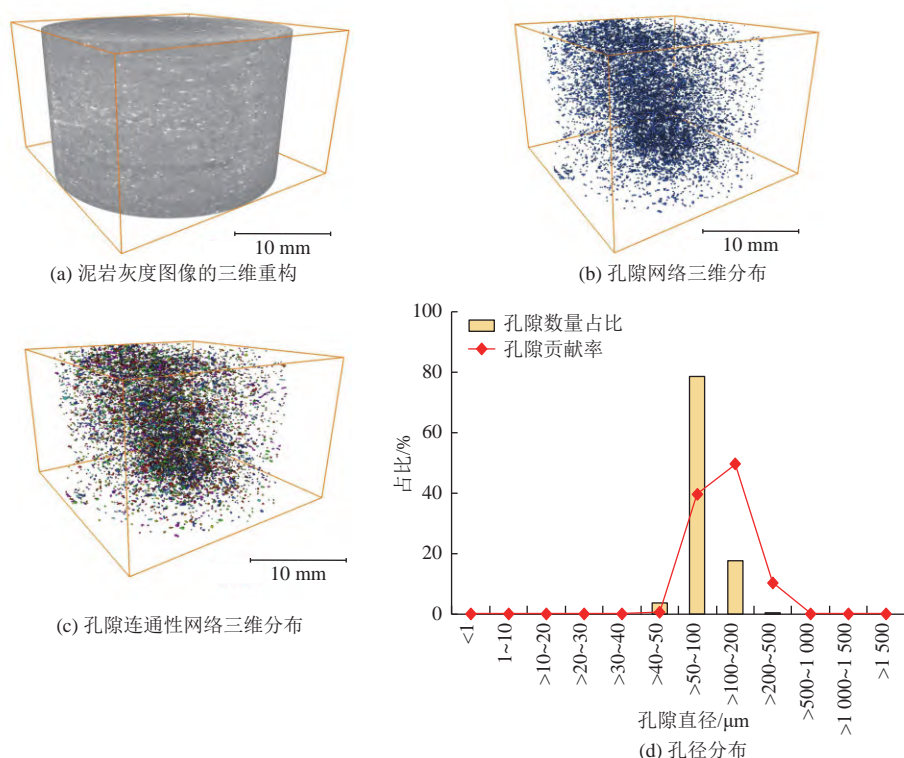


图 5 沁水盆地太原组煤层顶板泥岩(384.57 m)微米 CT 扫描三维重构孔隙网络及孔径分布

Fig.5 Pore network and pore size distribution of mudstone samples (depth: 384.57 m) from the coal seam roof in the Taiyuan Formation, Qinsui Basin derived from micro-CT-based 3D reconstruction

氮气体积分数对煤系氮气扩散系数的影响主要与气体分压和氮气、甲烷物理性质的差异有关。随着煤系孔隙中氮气体积分数降低, 氮气体分压下降, 导致其扩散动力下降, 而甲烷体积分数升高扩散动力增强, 较大分子(甲烷)会优先堵塞运移通道, 从而阻止氮气分子运

移<sup>[24]</sup>。此外, 煤系甲烷吸附能力远高于氮气<sup>[11]</sup>, 吸附态甲烷会占据微孔隙表面, 进一步缩小氮气运移的孔隙通道, 这将导致氮气分子扩散能力随甲烷体积分数升高而迅速下降(图 7)。

而在氮气体积分数从 100% 下降至 20% 时, 泥岩

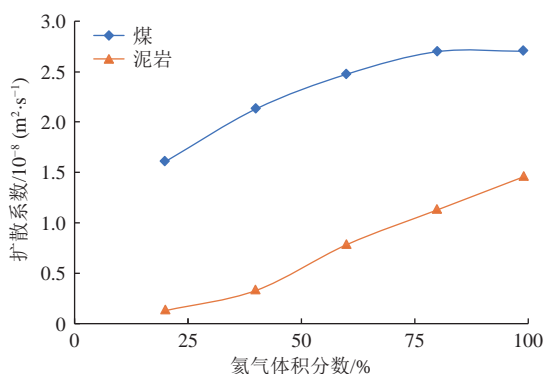


图6 不同氦气体积分数下煤和泥岩中氦气扩散系数对比  
Fig.6 Comparison of helium diffusion coefficients in coal and mudstone samples under varying volumetric fractions of helium

氦气扩散系数的降幅(90%) 远超煤(42%), 这主要与煤的孔隙网络的连通性远好于泥岩有关(图4和图5)。随着氦气体积分数的下降, 氦气的分压降低, 扩散运移动力减弱, 但煤中发育的微米级割理和裂缝系统仍然可作为氦气运移优势通道(图4和图7)。而泥岩样品主要发育孤立孔隙, 孔隙间连通性较差(图5), 氦气主要在基质孔隙中扩散。氦气体积分数降低导致氦气运移孔隙通道变窄, 加上甲烷分子对狭小孔喉的堵塞, 最终导致泥岩的氦气扩散系数随泥岩大幅度降低。

### 3.3 含水饱和度

针对不同含水状态下煤的氦气扩散实验表明, 煤中氦气的扩散系数随煤含水饱和度增加呈规律性下降, 当煤中含水饱和度从0增加至70%时, 氦气扩散系数从 $1.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 下降至 $8.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , 降幅达53%(表1)。

前期研究表明, 地层水的存在会显著改变煤的孔隙

结构、扩散路径以及气体的扩散速率<sup>[18,24-26]</sup>, 针对含水性对于煤中氦气扩散的影响机制, 本文主要从水对煤层孔隙结构的阻塞效应和氦气在气-液界面处的扩散行为展开讨论。当煤的含水饱和度较高时, 水分子在优先占据煤中纳米级孔隙的基础上, 并充满部分微米级裂缝, 这将导致氦气以气态形式扩散的有效路径减少; 随着煤中含水饱和度进一步升高, 当水分子完全充满裂隙后, 氦气将由气态扩散转变为液态中的分子扩散, 氦气扩散系数显著减小。当煤中含水饱和度较低时, 孔隙尤其是裂隙中水分子占据空间极为有限, 水分子的阻塞效应显著降低, 氦气在裂隙中以Fick扩散为主导的扩散能力显著增强<sup>[11,23]</sup>(图7)。此外, 煤中气-液界面的接触面积会随含水饱和度的增加而迅速扩大, 这一方面导致氦气需要通过气-液界面扩散进入水相, 另一方面使得氦气在气-液界面上的吸附与脱附作用大大增强, 而这一过程通常具有滞后性, 两者共同作用同样会降低氦气的扩散速率<sup>[11]</sup>(图7)。

### 4 煤系氦气扩散通量及成藏机理

煤系天然气中的氦气主要有内源氦和外源氦两种来源<sup>[27]</sup>, 其中内源氦主要为煤和泥岩中U、Th放射性衰变产生, 而外源氦指来自深部基底岩石中的放射性成因氦或来自深部的幔源氦。氦气分子小、扩散能力强, 煤系氦气的富集取决于外源氦的扩散至煤系内部的通量以及煤系内部氦(包括内源氦)的保存。下面结合沁水盆地生烃及盆地演化历史, 数值模拟地质历史时期氦气扩散通量并探讨及其对氦气富集和保存机制。由于

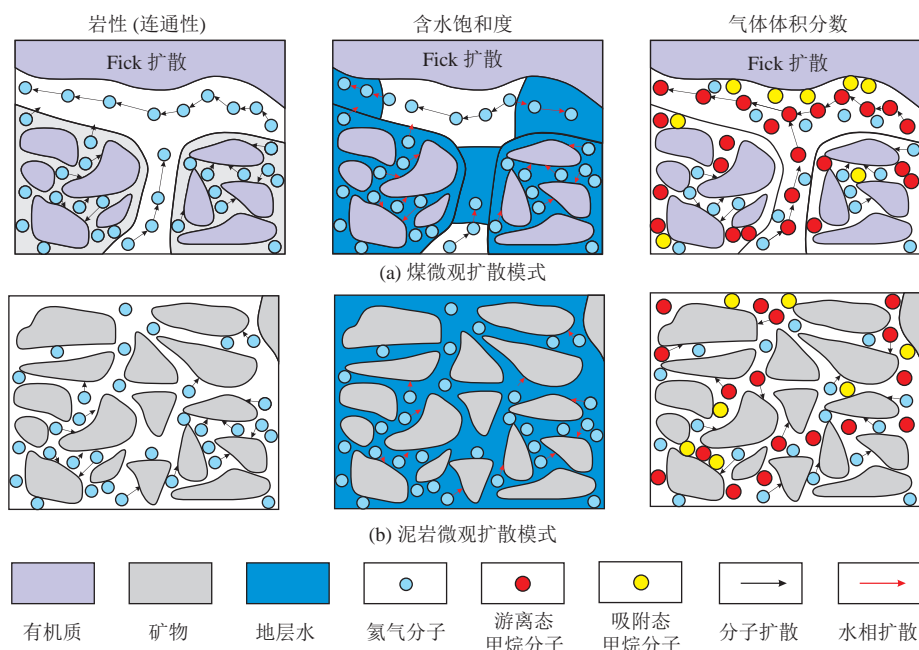


图7 煤和泥岩微观扩散模式

Fig.7 Microscopic diffusion patterns of coal and mudstone samples



鄂尔多斯盆地和沁水盆地煤系气中的氦气均以壳源成因氦为主<sup>[5]</sup>,此次模拟暂不考虑幔源氦的贡献。

#### 4.1 不同体积分数下氦气扩散通量预测模型

根据 U、Th 放射性衰变方程和衰变原理,氦气生成量与岩石 U、Th 含量及时间函数关系为

$$Q_{\text{He}} = (1.22 \times 10^{-13} U + 2.92 \times 10^{-14} \text{Th}) t_j \quad (13)$$

根据前人对沁水盆地太原组煤生烃动力学研究<sup>[28]</sup>,结合煤的生烃演化模式,建立不同地质历史时期煤层气生成量的预测模型:

$$Q_{\text{CBM}} = \frac{X(t) \times \text{TOC} \times 10^{-3} \times C_{\text{CH}_4}}{\rho_c} \quad (14)$$

结合沁水盆地构造演化特征(图 1c),沁水盆地石炭系-二叠系在燕山运动时期(晚白垩世)持续构造抬升,构造抬升过程中氦气和甲烷的逸散量参照 B. Chen 等<sup>[7]</sup>基于大气来源稀有气体分馏模型的计算结果,即煤层中氦气损失接近 90%,甲烷散失约 44%。

在晚白垩世地层抬升后,煤层气生成量( $Q_{\text{CBM1}}$ )和氦气生成量( $Q_{\text{He1}}$ )的计算公式为:

$$Q_{\text{CBM1}} = \frac{X(t) \times \text{TOC} \times 10^{-3} \times C_{\text{CH}_4}}{\rho_c} \times 54\% \quad (15)$$

$$Q_{\text{He1}} = (1.22 \times 10^{-13} U + 2.92 \times 10^{-14} \text{Th}) t_j \times 10\% \quad (16)$$

不同地质历史时期煤层气中氦气体积分数( $C_{\text{He1}}$ )为:

$$C_{\text{He}} = \frac{Q_{\text{He}}}{Q_{\text{CH}_4} Q_{\text{He}}} = \frac{5.7 \times 10^{-19} t_j}{5.7 \times 10^{-19} t_j + 4.9 \times 10^{-4} X(t)} \quad (17)$$

$$C_{\text{He1}} = \frac{Q_{\text{He1}}}{Q_{\text{CH}_4} Q_{\text{He1}}} = \frac{5.7 \times 10^{-20} t_j}{5.7 \times 10^{-20} t_j + 2.6 \times 10^{-4} X(t)} \quad (18)$$

采用本研究测定的煤层气中不同氦气含量下氦气的扩散系数进行多项式回归,其相关系数高达 0.97,建立不同氦气含量下的氦气扩散系数预测模型:

$$D = -2 \times 10^{-12} C_{\text{He}}^2 + 3 \times 10^{-10} C_{\text{He}} \quad (19)$$

结合地质历史时期的理论生氦量、理论生烃量、外源氦通量及逸散量,可建立不同地质历史时期煤系氦气扩散通量模型。

由 Fick 第一定律可以得出地层中氦气的扩散通量为

$$J = -\phi \tau D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (20)$$

结合地层实际储集条件可得氦气扩散通量公式为

$$Q = JA^{-1} t_j = -\phi \tau DA^{-1} t_j \frac{\partial C}{\partial x} \quad (21)$$

据此公式可计算不同地质历史时期煤和泥岩中氦气的扩散通量,如图 8 所示。在晚侏罗世—早白垩世地层抬升之前,煤中氦气含量始终低于泥岩,这主要由于一方面煤的生气量大于泥岩,稀释作用强烈;另一方面,泥岩生氦量高于煤,造成含量差异。

中侏罗世之前,虽然泥岩中氦气含量高于煤系氦气,

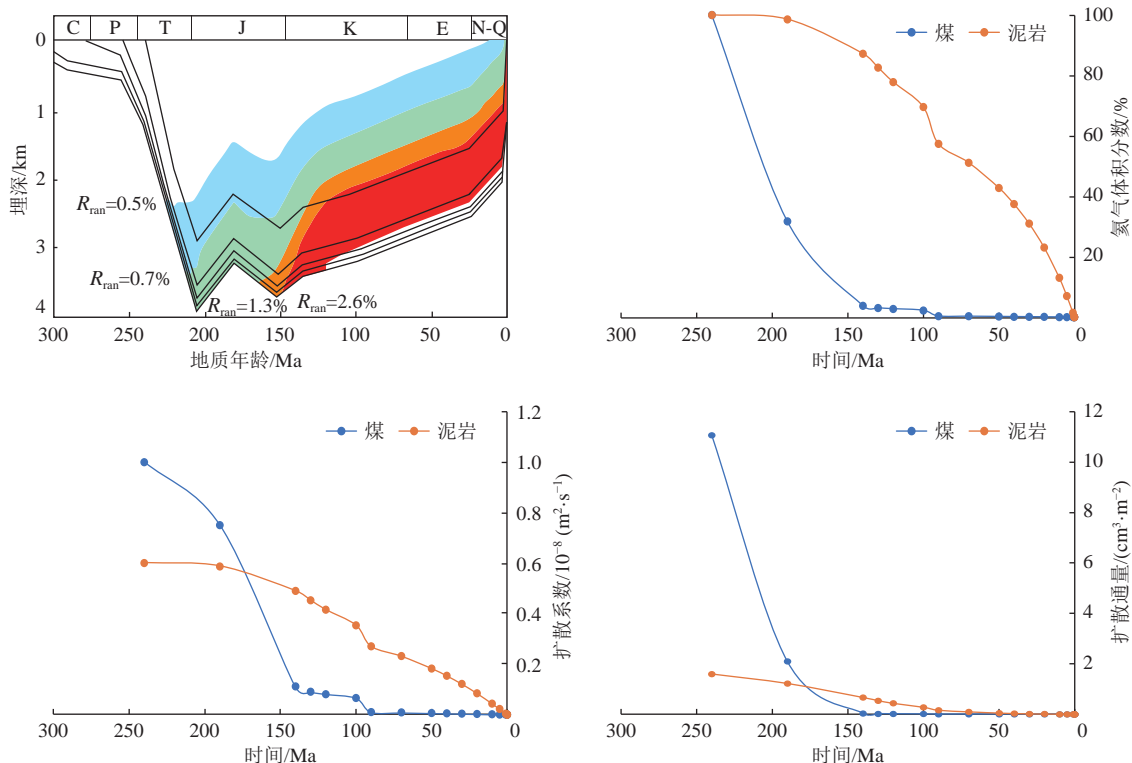


图 8 研究区生烃史与氦气扩散预测结果

Fig.8 Predicted hydrocarbon generation history and helium diffusion in the study area

但扩散系数却呈现煤系氦气高于泥岩的现象,这主要因为此时煤和泥岩尚处在成熟阶段,未大量生气,虽然煤和泥岩氦气含量有差异,但煤中氦气体积分数均在10%以上,其扩散仍以Fick扩散为主,煤中高连通性的孔隙结构有利于氦气的扩散运移。

中侏罗世之后,进入大量生气阶段,煤和泥岩中氦气含量大幅下降,尤其煤中因生气量巨大而生氦量较小,氦气体积分数迅速降至1%以下。泥岩由于生气量较小和生氦量较大,氦气含量下降较慢,氦气含量的显著差异导致了中侏罗世之后煤中氦气扩散系数低于泥岩。

自晚白垩世以来,持续的构造抬升最终导致烃源岩生烃作用完全停止,在后续的构造抬升过程中,甲烷和氦气均发生了大量逸散,其中甲烷逸散率为90%,氦气逸散量为44%<sup>[7]</sup>。现今赋存状态下,无论是煤系氦气还是泥页岩中氦气扩散速率极低,其扩散系数分别为 $1.2 \times 10^{-15}$ 、 $4.5 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/s,扩散影响可忽略不计。氦气的扩散逸散主要还是发生在氦气含量较高的烃类刚开始生成时期,而后期构造抬升过程中,甲烷和氦气的大量逸散主要还是通过渗流方式进行,标准状态下,整个地质历史过程中煤系氦气和泥岩的总计扩散通量分别为13.24、5.05 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>,煤中氦气扩散总量要高于泥岩。

#### 4.2 煤系氦气成藏机理的启示

从煤和泥岩中扩散通量模拟结果可以外推煤层气与页岩气中氦气的差异富集机制,主要体现在氦源、储集和保存条件等方面。煤中放射性元素U、Th的平均含量分别仅为 $3.57 \times 10^{-6}$ 和 $9.46 \times 10^{-6}$ ,远低于部分富铀页岩,如北美Haynesville页岩铀含量可达 $(20 \sim 50) \times 10^{-6}$ ,导致其自生氦气量仅为页岩的1/5~1/3<sup>[27,29-31]</sup>。这种贫放射性元素的特性决定了煤系氦气的来源高度依赖外源供给,包括基底含氦流体的垂向迁移、深部古老地层的构造疏导或相邻富氦气岩层的侧向渗透<sup>[32-34]</sup>。相比之下,页岩气中氦气则具备“内源补给”优势,其封闭系统中的放射性元素可通过 $\alpha$ 衰变持续生成氦气,形成局部富集效应。除此之外,煤中生气量远大于泥页岩,稀释作用强烈,在无外源供给的条件下,更难形成煤系氦气的富集。

从储层孔隙结构来看,页岩以纳米级孤立孔隙为主导,狭窄的孔喉与复杂的连通路程显著阻碍气体运移,氦气的扩散过程以Knudsen扩散机制为主<sup>[23]</sup>。该机制下,气体分子与孔壁碰撞频率远高于分子间相互作用,导致扩散系数普遍低于 $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s,氦气扩散效率受到严重制约。而煤则以大孔(>50 nm)和天然裂隙网络为特征,孔隙系统的开放性使氦气运移更符合Fick扩散规律,扩散系数可达页岩的1~2个数量级,显著提升了氦气的纵向迁移能力。然而,这种高渗透性储层也意味着

更强的逸散风险,需依赖泥岩盖层封闭与区域弱水动力条件的协同作用,方能实现氦气的动态滞留。

埋藏环境与水文地质条件的差异进一步放大了两类氦气藏的保存能力。页岩气藏通常赋存于埋深超过2 000 m的高压封闭系统,地层压力与低渗透性共同抑制了流体的垂向运移,加之水文地质活动微弱,氦气得以在放射性生氦与扩散逸散的平衡中长期原位富集。反观煤层气藏,其赋存深度较浅,地层压力较低且易受地表水循环影响,水文驱动下的径流作用加速氦气散失。因此,煤系氦气的保存不仅依赖于盖层的静态封闭能力,更需构造-水文耦合的动态平衡——深部断裂系统为外源氦气提供运移通道,而浅层弱径流环境与高含水饱和度则通过降低含量梯度、增大扩散阻力来延缓氦气逃逸<sup>[35-37]</sup>。

相较于页岩气藏自生自储的静态保存模式,煤系氦气的勘探更需关注基底断裂活化程度、盖层封闭性及水力封存的匹配关系。通过物理模拟实验和预测模型探究这一认识为煤系氦气富集成藏提供了新的理论和研究视角,尤其在煤系氦气广泛发育、深部煤系气勘探热潮的背景下,更具有重要战略价值。

#### 5 结论

(1)  $\leq 13.5$  nm的微孔和中孔中,氦气以Knudsen扩散为主,其扩散速率主要与温度及孔径分布有关,煤和泥岩无明显差距; $>13.5$  nm的中孔和大孔中,氦气以Fick扩散为主。煤因发育割理与裂缝网络形成高效扩散通道,其扩散速率高于泥岩。

(2) 煤系氦气的扩散与富集成藏受岩性、含水饱和度及气体体积分数的协同控制,煤的高渗透孔隙-裂隙网络(扩散系数达 $1.1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s)显著优于泥岩( $5.8 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s),含水性通过占据孔隙空间、改变气-液界面行为抑制扩散效率,气体体积分数对扩散速率的影响主要体现在气体分压和氦气与甲烷物理性质的差异。

(3) 从不同地质历史时期的扩散通量模拟来看,氦气的扩散逸散主要还是发生在氦气含量较高的烃类刚开始生成的时期,而后期构造抬升过程中,甲烷和氦气的大量逸散主要是通过渗流方式进行,标准状态下,整个地质历史过程中煤系氦气和泥岩的总扩散通量分别为13.24、5.05 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>,前者高于后者。

(4) 煤系氦气的富集成藏是外源迁移与局部保存动态平衡的结果:高扩散性孔隙网络促进深部氦气向上运移,而低含量梯度、高含水饱和度及泥岩盖层则通过抑制扩散速率增强封存能力,其勘探需重点关注深部断裂系统沟通能力及盖层有效性。

(5) 氦气分子小,具有极强的扩散性,目前针对煤系

氦气扩散机制研究较少,尚未形成明确的煤系氦气密封性评价指标,未来攻关方向应侧重于建立密封评价指标,形成煤系氦气密封性评价图版,划分封存失效区、动态平衡区与高效富集区。

### 符号注释:

$A$  为岩心横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_0$  为初始气体体积分数, %;  $C_1(t)$  为  $t$  时刻扩散室 1 气体体积分数, %;  $C_2(t)$  为  $t$  时刻扩散室 2 气体体积分数, %;  $C_{\text{CH}_4}$  为甲烷体积分数, 取平均值 97%;  $C_{\text{He}}$  为氦气体积分数, %;  $\frac{\partial C}{\partial x}$  为含量梯度;  $d$  为气体分子的有效直径,  $2.6 \times 10^{-10} \text{ m}$ ;  $D$  为扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $J$  为扩散通量,  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $L$  为岩心长度,  $\text{m}$ ;  $p$  为气体压力,  $\text{Pa}$ ;  $R_{\text{ran}}$  为有机质干酪根随机反射率, %;  $t$  为扩散时间,  $\text{s}$ ;  $t_i$  为放射性元素衰变时间,  $\text{a}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $\text{TOC}$  为总有机碳含量, %, 取平均值 65.3%;  $V_1$  为扩散室 1 体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_2$  为扩散室 2 体积,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{\text{CBM}}$  为理论煤层气生成量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $Q_{\text{He}}$  为理论氦气生成量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $Q$  为标准状态下氦气扩散通量,  $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ;  $U$ 、 $\text{Th}$  为岩石中铀、钍体质量分数,  $10^{-6}$ ;  $x$  为扩散距离,  $\text{m}$ ;  $X(t)$  为生气率与时间的函数;  $\rho_c$  为煤的密度,  $1.3 \text{ t/m}^3$ ;  $Q$  为标注状况下氦气扩散通量,  $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ;  $\phi$  为孔隙率, 取值 3.2%;  $\tau$  为弯曲因子, 取经验值 1.5;  $\lambda$  为平均自由程,  $\text{m}$ , 氦气分子平均自由程取值  $13.5 \text{ nm}$ 。

### 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] 陈践发, 刘凯旋, 董勃伟, 等. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1436–1449.  
CHEN Jianfa, LIU Kaixuan, DONG Qingwei, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436–1449.
- [2] 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 Dongsheng gas field, Ordos Basin, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(6): 1078–1085.
- [3] BALLENTINE C J, LOLLAR B S. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton–Panhandle giant gas field, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(14): 2483–2497.
- [4] 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.
- [5] 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.  
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.
- [6] 刘超, 孙蓓蕾, 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.
- [7] CHEN Biying, STUART F M, XU Sheng, et al. Evolution of coal-bed methane in southeast Qinshui Basin, China: Insights from stable and noble gas isotopes[J]. Chemical Geology, 2019, 529: 119298.
- [8] CHENG Anran, LOLLAR B S, GLUYAS J G, et al. Primary  $\text{N}_2$ – $\text{He}$  gas field formation in intracratonic sedimentary basins[J]. Nature, 2023, 615(7950): 94–99.
- [9] KRISHNA R, WESSELINGH J A. The Maxwell–Stefan approach to mass transfer[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(6): 861–911.
- [10] 刘晓强, 尤兵, 陈践发, 等. 石英纳米孔中氦气与甲烷竞争扩散的分子模拟[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 86–94.  
LIU Xiaoqiang, YOU Bing, CHEN Jianfa, et al. The competitive diffusion mechanism of helium and methane in quartz nanopore by molecular simulation[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2024, 21(3): 86–94.
- [11] 宋丹丹, 关平, 任嘉豪, 等. 含氦气藏盖层孔喉密封性的分子模拟研究[J/OL]. 天然气地球科学, 2025: 1–29 [2025-02-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20250210.1337.004.html>.  
SONG Dandan, GUAN Ping, REN Jiahao, et al. Molecular simulation study on the sealing effect of caprock pore throats on helium[J/OL]. Natural Gas Geoscience, 2025: 1–29 [2025-02-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20250210.1337.004.html>.
- [12] QIAN Jianhao, WU Heng'an, WANG Fengchao. A generalized Knudsen theory for gas transport with specular and diffuse reflections[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 7386.
- [13] GRUENER S, HUBER P. Knudsen diffusion in silicon nanochannels[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(6): 064502.
- [14] KEERTHI A, GEIM A K, JANARDANAN A, et al. Ballistic molecular transport through two-dimensional channels[J]. Nature, 2018, 558(7710): 420–424.
- [15] TISON S A. Experimental data and theoretical modeling of gas flows through metal capillary leaks[J]. Vacuum, 1993, 44(11/12): 1171–1175.
- [16] YUAN Lin, STANLEY A, DEHGHANPOUR H, et al. Measurement of helium diffusion in Lotsberg Salt cores: A proxy to evaluate hydrogen diffusion[J]. International Journal of Hydrogen En-

- ergy, 2024, 52: 686–702.
- [17] 宋岩, 马行陟, 柳少波, 等. 沁水煤层气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 621–634.  
SONG Yan, MA Xingzhi, LIU Shaobo, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Qinshui coalbed methane field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 621–634.
- [18] 陈凤杰, 张小东, 刘润斌, 等. 沁水盆地东北部上古生界深部煤系致密砂岩孔隙结构特征及其储层地质意义[J/OL]. 煤炭科学技术, 2024: 1–16 [2024-11-12]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20241111.1527.007.html>.  
CHEN Fengjie, ZHANG Xiaodong, LIU Runbin, et al. Pore structure characteristics of deep Upper Paleozoic coal measure tight sandstone reservoirs in northeast Qinshui Basin and its reservoir geological significance[J/OL]. Coal Science and Technology, 2024: 1–16 [2024-11-12]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20241111.1527.007.html>.
- [19] 梁建设, 王存武, 柳迎红, 等. 沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1509–1519.  
LIANG Jianshe, WANG Cunwu, LIU Yinghong, et al. Study on the tight gas accumulation conditions and exploration potential in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1509–1519.
- [20] ZHANG Tongwei, KROOSS B M. Experimental investigation on the carbon isotope fractionation of methane during gas migration by diffusion through sedimentary rocks at elevated temperature and pressure[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(16): 2723–2742.
- [21] KROOSS B M, SCHAEFER R G. Experimental measurements of the diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rocks: I. A new experimental procedure[J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(3): 193–199.
- [22] KROOSS B M, LEYTHAEUSER D. Experimental measurements of the diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rocks: II. Results and geochemical significance[J]. Organic Geochemistry, 1988, 12(2): 91–108.
- [23] ZHONG Ying, SHE Jiping, ZHANG Hao, et al. Experimental and numerical analyses of apparent gas diffusion coefficient in gas shales[J]. Fuel, 2019, 258: 116123.
- [24] 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.
- [25] 李相臣, 康毅力, 周来诚, 等. 水饱和煤岩储层甲烷运移动态特征[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 876–881.  
LI Xiangchen, KANG Yili, ZHOU Laicheng, et al. Dynamic characteristics of methane transport in water saturated coal[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 876–881.
- [26] SI Leilei, ZHANG Hongtu, WEI Jianping, et al. Modeling and experiment for effective diffusion coefficient of gas in water-saturated coal[J]. Fuel, 2021, 284: 118887.
- [27] 马勇, 陈践发, 辛志源, 等. 非常规天然气中氦资源潜力及富集机制[J]. 石油学报, 2025, 46(2): 440–455.  
MA Yong, CHEN Jianfa, XIN Zhiyuan, et al. Helium resource potential and enrichment mechanism of unconventional gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(2): 440–455.
- [28] 段毅, 吴保祥, 郑朝阳, 等. 山西沁水盆地煤生烃动力学研究[J]. 科学通报, 2005, 50(13): 1405–1411.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 39–49.  
HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 39–49.
- [32] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94: 3–21.
- [33] 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, LYU 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.
- [34] MARDON S M, EBLE C F, HOWER J C, et al. Organic petrology, geochemistry, gas content and gas composition of Middle Pennsylvanian age coal beds in the eastern Interior (Illinois) Basin: Implications for CBM development and carbon sequestration[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 127: 56–74.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 张云鹏, 李玉宏, 卢进才, 等. 柴达木盆地北缘富氦天然气的发现: 兼议成藏地质条件[J]. 地质通报, 2016, 35(2/3): 364–371.  
ZHANG Yunpeng, LI Yuhong, LU Jincan, et al. The discovery and origin of helium-rich gas on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2/3): 364–371.

(责任编辑 范章群)