

文章编号: 0253-2697(2025)02-0440-16 DOI: 10.7623/syxb202502011

## 综述 非常规天然气中氦资源潜力及富集机制

马 勇<sup>1</sup> 陈践发<sup>1</sup> 辛志源<sup>1</sup> 罗情勇<sup>1</sup> 罗 超<sup>2</sup> 张海鹏<sup>1</sup> 钟可塑<sup>2</sup> 车世琦<sup>1</sup> 马健斌<sup>1</sup> 秦长彩<sup>1</sup>

(1. 油气资源与工程全国重点实验室,中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院 四川成都 610051)

**摘要:** 从含氦、富氦天然气藏中提取氦气是目前工业制氦最重要的途径,评价储量规模巨大的非常规天然气中的氦含量及成因机制对于丰富氦资源来源具有重要意义。基于全球450个含氦页岩气和煤层气样品的地球化学特征分析表明,页岩气中的氦含量为 $6 \times 10^{-8} \sim 0.0114$ (平均为0.057%),煤层气中的氦含量为 $5 \times 10^{-7} \sim 0.0228$ (平均为0.115%),超过24%的非常规天然气样品中的氦含量达到0.05%。非常规天然气整体具有较低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(0.002~0.930,平均为0.071),表明壳源氦为其主要来源。U、Th含量及放射性衰变模拟计算表明,页岩气的源内氦含量与其现今实测氦含量的分布特征一致,富氦页岩气中的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值与同期源岩累积产生的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值相同,且富氦页岩气藏中往往不发育与深部幔源或基底连通的大型断裂,这表明页岩气中的氦主要来自页岩源内富U、Th矿物的放射性衰变。氦气具有比甲烷更强的吸附能力,且页岩气藏中较低的氦浓度可形成毛细管阻力,二者共同作用是页岩气中的氦气能够保存的主要原因。煤层气的源内氦含量通常较小( $< 120 \times 10^{-6}$ ),远低于现今气藏实测的氦含量。富氦煤层气中的氦主要来自基底岩石的放射性衰变。生氦潜力、储层渗透性和水动力作用是导致页岩气和煤层气中氦气富集机制差异的主要原因。U含量在 $10 \times 10^{-6}$ 以上且具有一定含气量( $> 1 \text{ m}^3/\text{t}$ )的石炭纪之前古老页岩,以及成藏年代较晚、底部有充足氦源(包括壳源氦和幔源氦)供给的煤层是富氦非常规天然气富集的有利区带。中国中—上扬子地区寒武系页岩和鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系煤层是富氦非常规天然气的有利勘探层位。

**关键词:** 氦气; 页岩气; 煤层气; 富氦非常规天然气; 富集成藏机制

中图分类号: TE132.3 文献标识码: A

## Helium resource potential and enrichment mechanism of unconventional gas

Ma Yong<sup>1</sup> Chen Jianfa<sup>1</sup> Xin Zhiyuan<sup>1</sup> Luo Qingyong<sup>1</sup> Luo Chao<sup>2</sup> Zhang Haipeng<sup>1</sup>  
Zhong Kesu<sup>2</sup> Che Shiqi<sup>1</sup> Ma Jianbin<sup>1</sup> Qin Changcai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
2. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Chengdu 610051, China)

**Abstract:** At present, it is the most important way for industrial helium production by extracting helium from helium-containing and helium-rich natural gas reservoirs. It is of great significance to evaluate the helium content and formation mechanism of unconventional gas with huge reserves, which can enrich the source of helium resources. The geochemical characteristic analyses of 450 helium-containing shale gas and coalbed methane (CBM) samples taken from the world show that the helium content of shale gas ranges from  $6 \times 10^{-8}$  to 0.0114 (0.057% on the average), that of CBM ranges from  $5 \times 10^{-7}$  to 0.0228 (0.115% on the average), and that of more than 24% of unconventional gas samples can reach 0.05%. Unconventional gas generally has a low  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio (from 0.002 to 0.93, 0.071 on the average), indicating that crust-derived helium is the main source. The radioactive decay calculations of uranium and thorium contents indicate that the helium content generated in shale gas source is consistent with the distribution characteristics of the currently measured helium content. The  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio in helium-rich shale gas is the same as that the accumulative ratio of contemporaneous source rocks. Large faults connected with deep mantle source or basement were usually not developed in helium-rich shale gas reservoirs. All of those indicate that helium in shale gas is mainly resulted from the radioactive decay of uranium and Th-rich minerals in the shale source. Helium has a stronger adsorption capacity than methane, and the lower concentration of helium in shale gas reservoirs may lead to capillary resistance, which are the primary causes for the preservation of helium in shale gas. The content of helium generated in CBM source is usually lower (less than  $20 \times 10^{-6}$ ) than that currently measured in gas reservoir, and the helium in helium-rich CBM is primarily originated from the radioactive decay of basement rocks. Helium-producing potential, reservoir permeability and hydrodynamics are the main reasons for the differences in helium enrichment mechanism of shale

**基金项目:** 国家重点研发计划项目“富氦天然气成藏机制及氦资源分布预测技术”(2021YFA0719000)和国家自然科学基金项目“碎屑岩地层天然气运移过程中烃-岩石相互作用机理”(No.42173030)资助。

**第一作者:** 马 勇 男,1988年7月生,2016年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院副教授,主要从事油气地质和地球化学研究工作。Email: mayong@cup.edu.cn

**通信作者:** 陈践发 男,1961年7月生,2001年获中国科学院地球化学研究所博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院教授,主要从事天然气地质和地球化学研究工作。Email: jfchen@cup.edu.cn

gas and CBM. The favorable zones for the enrichment of helium-rich unconventional gas include the pre-Carboniferous shale with certain gas content above  $1\text{ m}^3/\text{t}$  and uranium content above  $10\times10^{-6}$ , and the coal seam with late accumulation and sufficient helium source supply (including crust source helium and mantle source helium) at the bottom of the reservoir. In addition, the Cambrian shale in the Middle and Upper Yangtze areas and the Carboniferous-Permian coal seam in Ordos Basin are considered as the favorable exploration horizons for unconventional helium-rich gas in China.

**Key words:** helium; shale gas; coalbed methane; helium-rich unconventional gas; enrichment and accumulation mechanism

引用:马勇 陈践发,辛志源,罗情勇,罗超,张海鹏,钟可塑,车世琦,马健斌,秦长彩.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):440-455,482.

**Cite:** MA Yong, CHEN Jianfa, XIN Zhiyuan, LUO Qingyong, LUO Chao, ZHANG Haipeng, ZHONG Kesu, CHE Shiqi, MA Jianbin, QIN Changcai. Helium resource potential and enrichment mechanism of unconventional gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(2): 440-455, 482.

氦气作为一种低密度、低沸点和强化学惰性的稀有气体,是航空工业、医疗、核工业以及超导材料等高科技领域不可缺少和无可替代的战略资源。尽管在整个宇宙中氦气的含量仅次于氢气,但地球上的氦气资源依然稀缺<sup>[1]</sup>。从含氦、富氦天然气藏中提取氦气目前依旧是工业化制氦最为经济有效的技术手段。一般认为天然气中的氦含量达到0.05%~0.10%时便具备工业制氦价值<sup>[2]</sup>。

天然气藏中的氦气主要有大气氦、壳源氦和幔源氦3种来源,不同来源氦的同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值( $R$ )具有明显的差异,因此可用 $R$ 对其进行区分判识。大气氦主要来自固体地球脱气作用释放出的氦气,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值( $R_a$ )为 $1.4\times10^{-6}$ ;由于大气氦的含量较低( $5.24\times10^{-6}$ )随地下水循环进入盆地流体系统中的大气氦含量也相对较少,因此大气氦对天然气藏氦的贡献通常可忽略不计。壳源氦由地壳中的U、Th元素放射性衰变而产生,其 $R$ 相对较低(一般量级为 $10^{-9}\sim10^{-8}$ ),富含放射性元素的古老花岗岩通常被认为是壳源氦的主要源岩<sup>[3-4]</sup>。幔源氦主要包括地球形成初期捕获的原始氦,其相对富集 $^3\text{He}$  $R$ 为 $1.1\times10^{-5}$ 或更高,可通过岩浆、深大断裂活动等的脱气作用释放到地球的浅层沉积圈层中,沉积盆地的天然气藏中也有相当数量的幔源氦<sup>[5-6]</sup>。

目前,全球探明的具有工业价值的氦资源以壳源氦为主,主要分布在新元古代—古生代地台背景下的沉积盆地中,这些沉积盆地一般具有前元古宇花岗岩基底<sup>[7]</sup>。富U、Th的古老花岗岩岩体所释放的壳源氦,一般伴随气体载体或以溶解态随地层流体在孔隙层中运移,并在浅层适当条件下从孔隙水中脱溶,与天然气复合成藏,这是当前富氦天然气藏的主要成藏模式<sup>[3,5,8]</sup>,如美国Hugoton-Panhandle气田、中国四川盆地威远气田和鄂尔多斯盆地东胜气田等<sup>[1,8-9]</sup>。此外,在板块构造缝合线、深大断裂带和裂陷盆地(如中国东部郯庐断裂带的含油气盆地,包括松辽盆地、渤海湾

盆地济阳坳陷、苏北盆地和三水盆地等)也发现了以幔源氦为主的富氦天然气藏,这些富氦气藏中幔源氦的贡献比例达70%以上<sup>[5,10]</sup>。

根据氦气来源与储层的关系,一般可将氦气分为内源氦和外源氦<sup>[11]</sup>。内源氦是指氦气由储层岩石中的U、Th元素放射性衰变而成;而外源氦是指氦气来自储层以外,包括基底岩石衰变形成的壳源氦和来自地球深部的幔源氦。与富氦常规天然气中的氦资源主体来自外源氦贡献的成藏特征不同,页岩气藏表现为自生自储,且页岩本身十分致密。Milkov等<sup>[12]</sup>认为来自基底花岗岩衰变形成的壳源氦或来自深部的幔源氦很难进入到页岩气储层中。煤层气中的氦含量普遍较低,以往主要通过检测煤层气中的氦含量及同位素来研究深部的流体活动<sup>[13]</sup>。Nuttall等<sup>[14]</sup>认为在页岩气等非常规天然气中氦气丰度极低,不具备工业开采价值。

近年来,随着非常规天然气勘探开发力度持续加大,油田公司陆续揭示部分页岩气和煤层气中氦含量较高,如湖北西部宜昌地区下寒武统页岩气的氦含量最高达0.31%<sup>[15]</sup>,鄂尔多斯盆地东缘石炭系—二叠系煤层气中的氦含量最高为0.23%<sup>[16]</sup>,均达到工业制氦品位。非常规天然气中的氦资源潜力究竟如何?非常规天然气中的氦气富集机制是否与富氦常规天然气相同?针对以上科学问题,笔者分析和收集了全球主要页岩气和煤层气的地球化学数据,在揭示页岩气和煤层气中氦含量分布特征的基础上,从氦气来源、运聚和保存条件等方面探讨了富氦非常规天然气的富集机制,并对比分析了富氦常规天然气与富氦非常规天然气的成藏条件差异,最后提出富氦非常规天然气的有利勘探方向。

## 1 全球非常规天然气中氦含量的分布特征

全球2466个常规天然气样品的统计结果表明:

常规天然气中的氦含量为 0~7.11%, 平均为 0.13% (中值为 0.02%)<sup>[12]</sup> (图 1)。从全球已发现的富氦天然气藏来看, 氦气基本上以伴生组分赋存于烃类和非烃类天然气藏中。富氦天然气藏按其组分特征可分为 3 类: 高烃类富氦气藏 (如中国鄂尔多斯盆地东胜气田)、高氮富氦气藏 (如美国 Harley Dome 气田) 和高二氧化碳富氦气藏 (如美国 Doe Canyon 气藏)<sup>[1,17]</sup>。

与富氦常规天然气藏不同, 绝大多数富氦非常规气藏为高烃类富氦气藏, 少数为高氮富氦气藏<sup>[15-26]</sup> (图 2)。如中国柴达木盆地东部石炭系及其北缘侏罗系页岩气、波兰 Lower Silesian 盆地石炭系煤层气和美国墨西哥湾盆地北部 North Louisiana 地区古近系煤层气。目前尚未发现高二氧化碳富氦非常规气藏。

非常规天然气同样展现出较好的氦资源潜力, 对全球 450 个含氦页岩气和煤层气样品的地球化学特征分析显示: 162 个含氦煤层气样品的氦含量最高为 2.28%、平均为 0.12% (中值为 0.01%) 288 个含氦

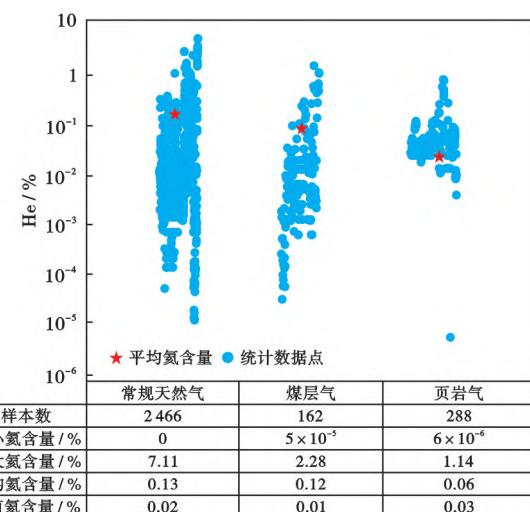


图 1 全球常规天然气、煤层气和页岩气实测氦含量  
(常规天然气中的氦含量数据据文献 [12] )

Fig.1 Measured helium contents in conventional gas, coalbed methane and shale gas worldwide

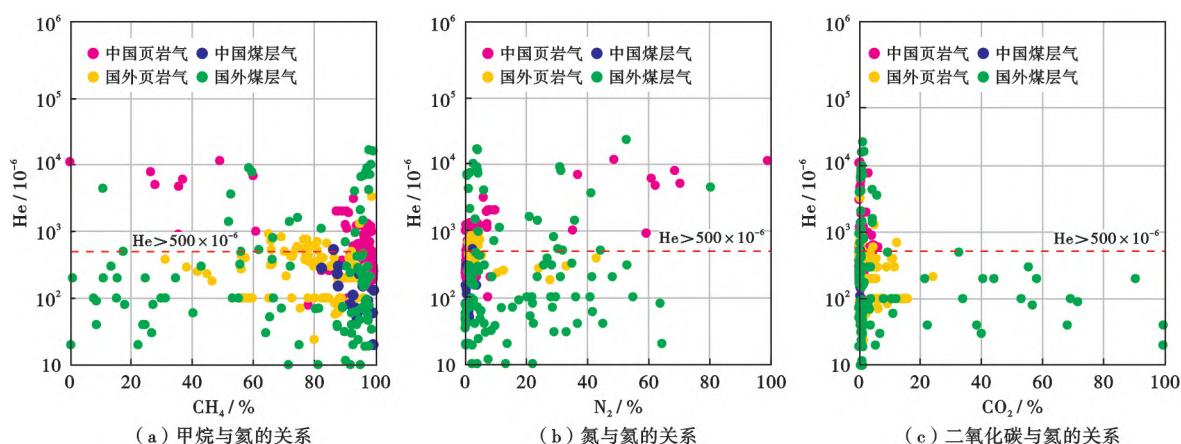


图 2 国内外典型页岩气和煤层气中的氦与主要伴生组分的关系 (数据据文献 [15-26] )

Fig.2 Relationship between helium and major associated components in typical shale gas and coalbed methane at home and abroad

页岩气样品的氦含量最高为 1.14%、平均为 0.06% (中值为 0.03%) (图 1); 超过 24% 的含氦页岩气和煤层气样品中的氦含量在 0.05% 以上, 达到工业制氦品位。与富氦常规天然气相比, 非常规天然气中氦的最高含量相对较低, 其中, 煤层气中的氦最高含量约为常规天然气中氦最高含量的 1/3, 而页岩气中的氦最高含量仅为常规天然气中氦最高含量的 1/6。此外, 煤层气中的氦平均含量略低于含氦常规天然气, 而页岩气中的氦平均含量则不到常规天然气氦平均含量的 1/2。统计表明, 常规天然气的氦含量高于非常规天然气, 该统计结果与 Milkov 等<sup>[12]</sup>对全球 3 300 余个常规天然气、煤层气和页岩气样品中的氦含量统计结果一致。学者们<sup>[5,7-8,10]</sup>一般认为富氦常规天然气藏中的氦来自基底花岗岩放射性衰变形成的壳源氦或深部幔源氦,

而非常规天然气中的氦最高含量和平均含量均远低于富氦常规天然气。这表明外源氦进入到煤层气或页岩气中的量相对较少, 这也进一步证实了非常规天然气藏较为致密的属性<sup>[12]</sup>。由于页岩本身比煤层更为致密, 导致页岩气藏中接收氦等外部气体的量更为稀少。全球主要页岩气和煤层气中的氦含量整体较低, 笔者参照徐永昌等<sup>[2]</sup>提出的天然气工业制氦下限, 将氦含量达到 0.05% 以上的非常规天然气称为富氦非常规天然气。

在石炭系—二叠系、三叠系和古近系中, 含氦煤层气均有分布, 但煤层气中的氦含量分布差异较大<sup>[11,16,20]</sup> (图 3)。以全球主要聚煤期 (石炭纪—二叠纪) 为例, 煤层中的氦含量分布在 (1~16 500)  $\times 10^{-6}$ , 其中, 中国沁水盆地煤层气中的氦含量最低, 仅为 (1~

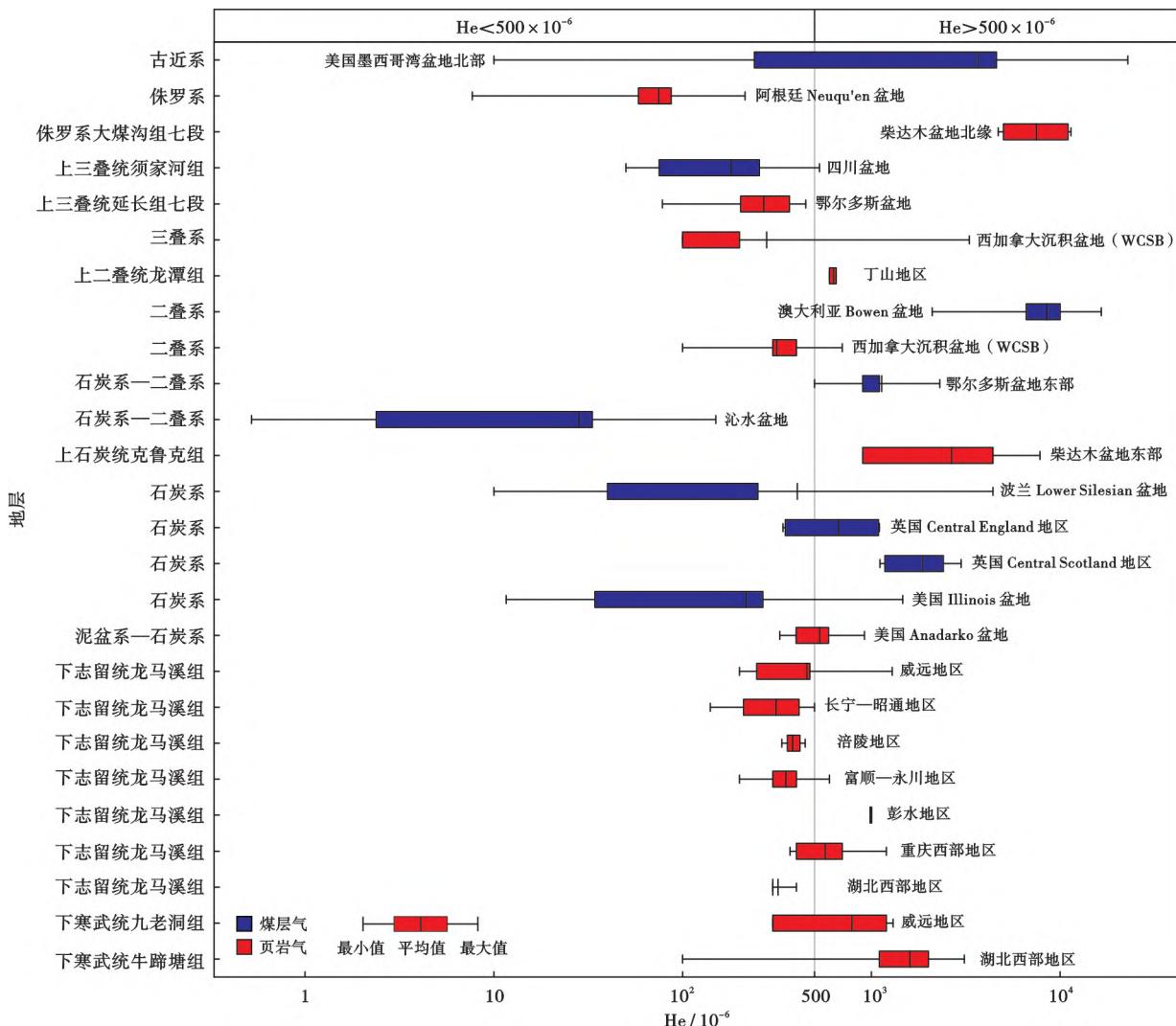


图3 国内外典型页岩气和煤层气中的氦含量分布(数据文献[11,16,20])

Fig.3 Helium content distribution in typical shale gas and coalbed methane at home and abroad

$150) \times 10^{-6}$  (平均为  $28 \times 10^{-6}$ ) ,而同期全球其他主要煤层气中的氦含量均有超过  $500 \times 10^{-6}$  的情况; 澳大利亚 Bowen 盆地煤层气中的氦含量最高, 为  $(2100 \sim 16500) \times 10^{-6}$ 、平均为  $8491 \times 10^{-6}$ ; 美国墨西哥湾盆地北部 North Louisiana 地区古近系 Wilcox 群生物成因煤层气中的氦含量为目前报道的煤层中氦含量的最高值, 为  $(10 \sim 22800) \times 10^{-6}$ 、平均为  $3657 \times 10^{-6}$ <sup>[18]</sup>。整体来看, 除中国沁水盆地石炭系—二叠系煤层气中的氦含量普遍小于  $500 \times 10^{-6}$  外, 其余煤层气中均有氦含量超过  $500 \times 10^{-6}$  的情况。

在寒武系、志留系、石炭系—二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系中, 含氦页岩气均有分布, 且不同地层页岩气中的氦含量分布具有较大差异(图3)。中—上扬子地区下古生界页岩气是中国目前海相页岩气勘探开发的主战场, 其页岩气同时展现出较好的氦资源潜力。湖北西部和四川盆地威远地区下寒武统页岩气中的氦含量最高, 分布在  $(100 \sim 3100) \times 10^{-6}$ 、平均为

$1059 \times 10^{-6}$ , 达到工业制氦品位; 四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组页岩气中的氦含量分布在  $(140 \sim 1287) \times 10^{-6}$ 、平均为  $393 \times 10^{-6}$ , 其中, 在重庆西部地区、彭水地区、富顺—永川地区和四川盆地威远地区等地区龙马溪组页岩气中的氦含量达到  $500 \times 10^{-6}$  以上, 是龙马溪组页岩气中氦含量较高的地区; 此外, 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相和盆地北缘侏罗系湖沼相煤系页岩气解吸气中的氦含量分别为  $(900 \sim 7800) \times 10^{-6}$ <sup>[19]</sup> 和  $(4700 \sim 11400) \times 10^{-6}$ , 均达到工业制氦品位, 尤其是柴达木盆地北缘侏罗系页岩气中的氦含量高达  $11400 \times 10^{-6}$ <sup>[20]</sup> 是目前报道的页岩气中氦含量最高的地区。国外含氦页岩气在上古生界和中生界中均有分布, 除美国 Anadarko 盆地泥盆系—石炭系 Woodford 组<sup>[21]</sup> 页岩气、加拿大 Alberta 盆地二叠系和三叠系页岩气<sup>[22]</sup> 中的氦含量达到  $500 \times 10^{-6}$  以上外, 其余大部分地区页岩气中的氦含量均较低。

## 2 非常规天然气中的氦气成因及来源

### 2.1 氦同位素组成及成因

氦有<sup>3</sup>He 和<sup>4</sup>He 两种稳定同位素, <sup>3</sup>He 主要来源于地幔脱气, <sup>4</sup>He 主要来源于  $\alpha$  衰变。不同来源的氦具有不同的  $R$ 。天然气中的氦主要来自地壳和地幔两个端元, 根据壳-幔二元复合模式可计算天然气中不同来源氦的比例<sup>[23]</sup>。 $R/R_a$  比值越大, 幅源氦的占比越大。当  $R/R_a > 3.94$  时, 天然气中幅源氦的占比大于 50.0%; 当  $1.00 < R/R_a \leq 3.94$  时, 天然气中幅源氦的占比大于 12.6%, 一般认为此时有明显幅源氦的贡献; 当  $R/R_a < 0.10$  时, 幅源氦的占比小于 1.1%, 此时天然气中的氦基本来自壳源<sup>[10]</sup>。由于大气氦进入盆地流体系统的量相对较少, 除有明显证据外, 一般认为当  $R/R_a$  比值为 0.10~3.94 时, 非常规天然气中的氦成因为壳源氦与幅源氦的混合。

图 4 展示了国内外典型页岩气和煤层气中的氦含量及其同位素比值<sup>[11, 16, 19-20, 24, 27-35]</sup>。除阿根廷 Neuquén 盆地上侏罗统一下白垩统 Vaca Muerta 组页岩气中的  $R/R_a$  比值为 3.42~3.95 且具有明显幅源氦贡献外<sup>[23-24]</sup>(据壳-幔二元复合模式计算, 其幅源氦比例为 43%~50%) 其余页岩气和煤层气中的  $R/R_a$  比值均小于 1.00, 相应幅源氦的贡献不超过 12.6%。这表明非常规天然气中的氦总体为壳源成因。

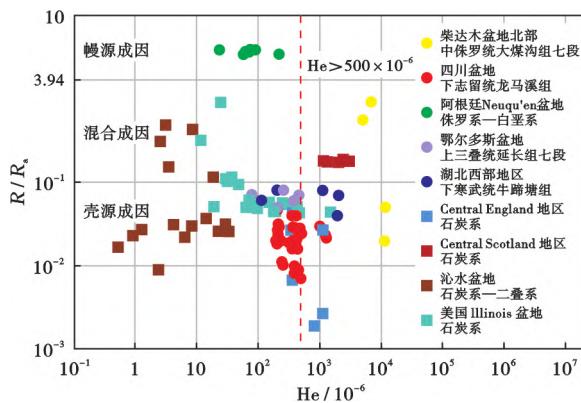


图 4 国内外典型页岩气和煤层气中的氦含量及同位素比值  
(数据据文献[11, 16, 19-20, 24, 27-35])

Fig.4 Helium contents and isotope ratios in typical shale gas and coalbed methane at home and abroad

美国 Illinois 盆地宾夕法尼亚系生物成因的煤层气和中国柴达木盆地北缘侏罗系页岩气具有相对较高的氦同位素比值, 其  $R/R_a$  比值分别为 0.043~0.901 和 0.020~0.930, 表明个别样品有不超过 12% 的幅源氦的混入<sup>[25-30, 36]</sup>。此外, 煤层气中也会混入一定数量的大气氦, 如中国沁水盆地石炭系一二叠系煤层气中

的<sup>4</sup>He 含量为  $(0.52 \sim 33.25) \times 10^{-6}$ ,  $R/R_a$  比值为 0.009~0.482, 综合 Ne 和 Ar 同位素分析证实, 煤层气中的氦为壳源氦与大气氦的混合<sup>[31-32, 37]</sup>。这可能是由于煤层气埋藏较浅且与地表水体联系较为紧密, 从而导致一部分大气氦随地下水径流进入到煤层气藏中。其余煤层气和页岩气的  $R/R_a$  比值主体约为 0.100 或以下, 为典型壳源氦成因的含氦非常规气藏。综上分析表明, 壳源成因的氦是煤层气和页岩气中氦气的主要来源, 并且能够形成氦含量大于  $500 \times 10^{-6}$  的富氦非常规天然气藏(图 4)。

在地壳岩石中, 以花岗岩和富有机质页岩中的 U、Th 含量相对较高, 这 2 类岩石放射性衰变产生的氦通常是壳源氦的主要来源。而在作为常规天然气储层的砂岩和碳酸盐岩中, U、Th 含量相对较低, 且形成时代较晚, 通常对放射性衰变成因的氦贡献较小<sup>[17]</sup>。

与富氦常规天然气藏中的氦全部来自外源(壳源氦或幅源氦)不同<sup>[3, 5, 8]</sup>, 页岩气和煤层气为自生自储气藏, 其页岩或煤层本身具有一定的 U、Th 含量。因此可根据页岩和煤层的地质年龄、U 含量、Th 含量及放射性衰变计算其源内生氦量。

### 2.2 页岩和煤层中的 U、Th 含量

图 5 展示了国内外典型页岩气和煤层气储层岩石中的 U、Th 含量分布<sup>[3, 11, 15, 21, 24, 29-35, 37-58]</sup>。可以看出, 含气页岩中的 U 含量为  $(1.07 \sim 112.10) \times 10^{-6}$ 、平均为  $12.19 \times 10^{-6}$ , 远高于页岩和花岗岩中的 U 平均含量(分别为  $3.70 \times 10^{-6}$  和  $3.00 \times 10^{-6}$ )<sup>[3]</sup>。这可能是由于含气页岩通常为总有机碳(TOC) 含量较高的烃源岩, 而有机质对 U 有吸附作用且沉积时为还原环境, 从而使得富有机质泥页岩通常富集 U, 造成含气页岩中的 U 含量相对较高。湖北西部地区下寒武统页岩中的 U 含量最高, 为  $(13.70 \sim 112.11) \times 10^{-6}$ 、平均为  $62.53 \times 10^{-6}$ <sup>[15, 35, 38]</sup>。此外, 中国四川盆地威远地区下寒武统页岩<sup>[39-43]</sup>和鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩<sup>[44-45]</sup>, 以及美国 Anadarko 盆地泥盆系—石炭系 WoodFord 组页岩的 U 含量相对较高, 平均含量超过  $20 \times 10^{-6}$ , 高于含气页岩中的 U 平均含量( $12.19 \times 10^{-6}$ )<sup>[21, 46-48]</sup>。在国内外典型煤层气盆地的煤层中, U 含量为  $(0.38 \sim 30.52) \times 10^{-6}$ 、平均为  $3.57 \times 10^{-6}$ (图 5), 略高于中国及全球各时期煤层中的 U 平均含量(分别为  $2.43 \times 10^{-6}$  和  $2.40 \times 10^{-6}$ )<sup>[49-50]</sup>, 但远低于含气页岩中的 U 平均含量( $12.19 \times 10^{-6}$ )。全球煤层主要分布于石炭系一二叠系及其之后的年轻地层中, 相较于下古生界页岩年轻<sup>[51-52]</sup>。

国内外典型页岩气储层中的 Th 含量为  $(0.11 \sim 62.93) \times 10^{-6}$ 、平均为  $15.07 \times 10^{-6}$ <sup>[53-55]</sup>; 煤层气储层

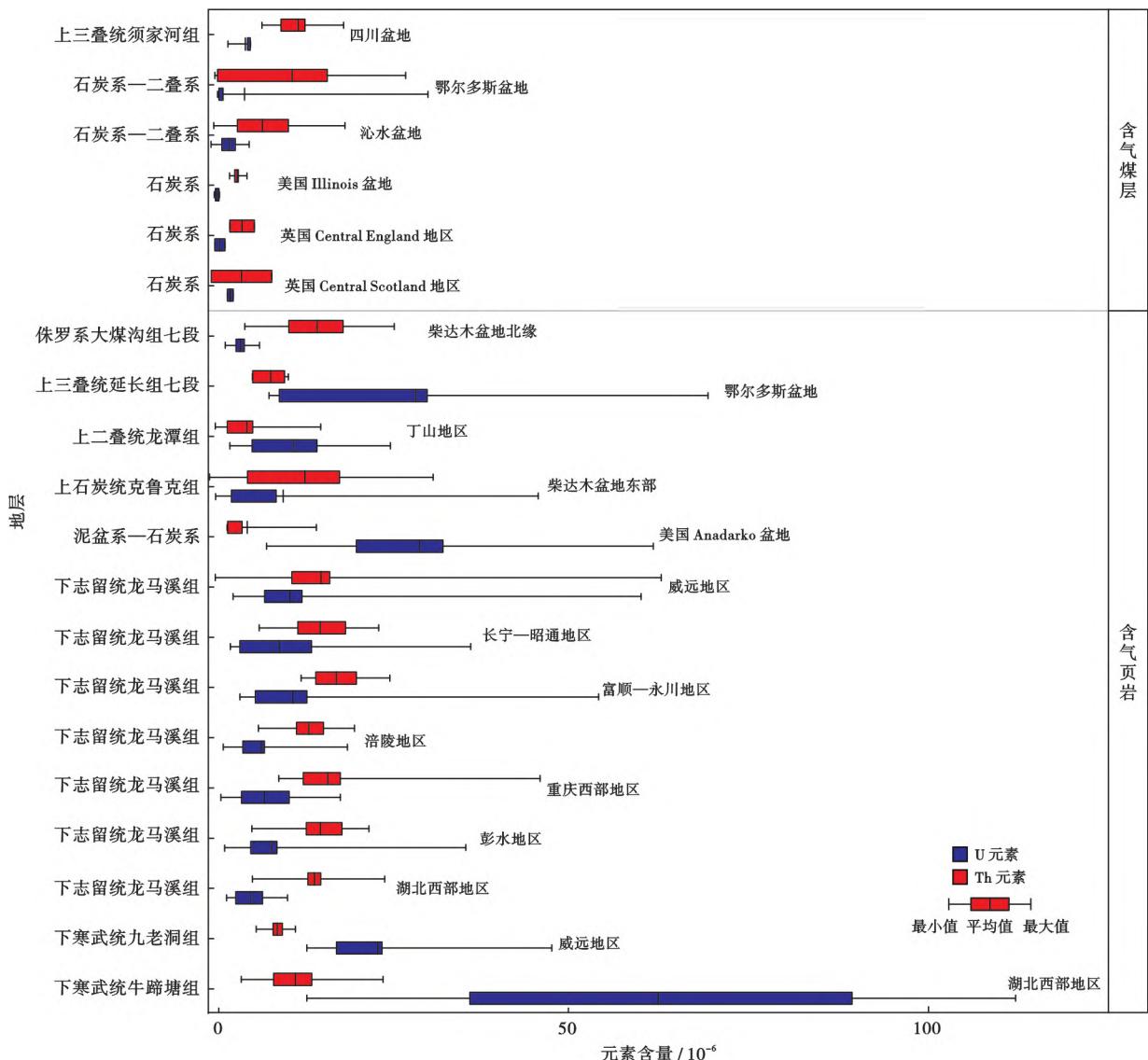


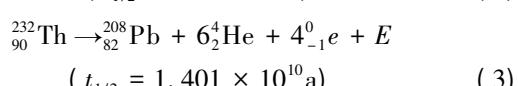
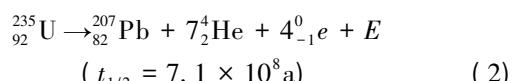
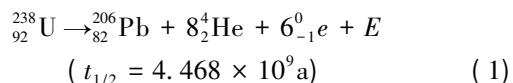
图5 国内外典型页岩和煤中的U、Th含量分布(数据据文献[3,11,15,21,24,29-35,37-58])

Fig.5 U and Th content distribution in typical shale and coal at home and abroad

中的 Th 含量相对较低,为  $(0.74 \sim 27.42) \times 10^{-6}$ 、平均为  $9.46 \times 10^{-6}$ (图5)。整体来看,含气页岩和煤层中的 Th 含量变化相对较小,且与地壳岩石中页岩和花岗岩中的 Th 平均含量(分别为  $12 \times 10^{-6}$  和  $13 \times 10^{-6}$ )较为接近<sup>[56-58]</sup>。

### 2.3 页岩气和煤层气源内 U、Th 衰变生氦量

壳源氦主要由地壳中的放射性元素<sup>238</sup>U(丰度为 99.280%)、<sup>235</sup>U(丰度为 0.710%) 和<sup>232</sup>Th(丰度为 99.995%) 衰变形成的  $\alpha$  粒子捕获电子形成,其反应式为:



放射性衰变原理为:

$$\begin{cases} N^* = N(e^{\lambda t} - 1) \\ t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \end{cases} \quad (4)$$

将 U、Th 含量代入式(4),便可得<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和<sup>232</sup>Th 衰变生成<sup>4</sup>He 的年生成量。Ballentine 等<sup>[50]</sup>计算得到 U、Th 的<sup>4</sup>He 年生成量分别为  $3.32 \times 10^{12} \text{ mol}/(\text{g} \cdot \text{a})$  和  $7.71 \times 10^{11} \text{ mol}/(\text{g} \cdot \text{a})$ ,换算得到氦气量分别为  $1.21 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$  和  $2.89 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ 。U 衰变生成氦的效率约为 Th 的 4.2 倍。

因此,假设已知页岩和煤层的岩石年龄及其 U、Th 含量,便可计算页岩和煤层沉积后单位质量岩石衰变的生氦量。表 1 展示了国内外典型页岩气和煤层气储层的 U、Th 含量、岩石年龄及衰变的生氦量。主要含气页岩沉积后单位质量岩石衰变的生氦量为  $(0.17 \sim 4.21) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ 、平均为  $1.02 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ 。其中,中

表 1 国内外典型页岩气、煤层气中的实测氦含量及源内氦含量

Table 1 Measured and in-source helium contents in typical shale gas/coalbed methane at home and abroad

气藏类型	盆地	气田/区块	地层	地质年龄/Ma	埋深/m	总含气量/(m <sup>3</sup> /t)	U/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	单位质量岩石衰变的生氦量/(10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /t)		页岩气或煤层气中的氦含量/10 <sup>-6</sup>	R/R <sub>a</sub>	文献
									计算	实测			
鄂尔多斯盆地	上三叠统 延长组 7 段	230.0	800~1700	1.52~5.74/ 4.21(35)	8.44~69.40/ 28.82(6)	6.13~11.10/ 8.65(6)	0.28~2.01/ 0.86	65~476/ 204	78~449/ 195	0.050~0.080/ 0.068(6)	[16, 44]		
北缘	侏罗系大 煤沟组 7 段	175.0	100~ 2000	0.30~1.44/ 0.87	2.42~7.11/ 4.41(25)	5.07~25.80/ 15.12(25)	0.08~0.28/ 0.17	88~323/ 174~8481	4700~11400/ 900~7800	0.020~0.030/ 0.390(4)	[20, 27~28, 63]		
柴达木盆地	东部	上石炭统 克鲁克组	328.9	1500~ 3000	0.01~0.76/ 0.25	1.07~45.82/ 10.41(16)	0.10~31.22/ 0.13~41(16)	0.04~2.12/ 0.54	2167	2650(4)	[19, 65~67]		
丁山	上二叠统 龙潭组	260.4	1000~ 2500	0.22~5.34/ 1.57(60)	3.00~25.30/ 11.86(18)	1.06~15.60/ 5.32(18)	0.10~0.91/ 0.41	65~583/ 264	600~650/ 630(3)				
页岩气	威远	下志留统 龙马溪组	457.8	1300~ 3700	2.10~7.30/ 4.11	3.44~60.10/ 11.29(35)	3.64~62.90/ 16.51(34)	0.24~4.16/ 0.84	58~1012/ 205	200~1286/ 455(50)	0.020~0.030/ 0.023(17)	[11, 54~55]	
长宁—昭通	下志留统 龙马溪组	457.8	2300~ 4000	0.60~11.50/ 4.80	3.05~36.43/ 9.63(57)	7.05~23.66/ 15.53(51)	0.26~2.33/ 0.74	55~486/ 154	199~500/ 312(39)	0.010~0.030/ 0.150(22)	[45, 54]		
涪陵	下志留统 龙马溪组	457.8	2100~ 3500	4.70~7.20/ 5.95	4.40~45.20/ 11.74(40)	12.90~25.21/ 17.77(40)	0.41~3.34/ 0.92	70~561/ 149	335~445/ 383(11)	0.010~0.040/ 0.030(10)	[53, 55]		
四川盆地	富顺—永川	下志留统 龙马溪组	457.8	3200~ 4100	3.00~7.00/ 4.20	2.14~19.30/ 7.38(28)	6.94~20.30/ 13.93(28)	0.21~1.34/ 0.59	50~318/ 141	200~600/ 352(25)	0.020~0.050/ 0.290(5)	[53]	
彭水	下志留统 龙马溪组	457.8	1500~ 3500	1.75~2.50/ 1.99	1.82~18.35/ 7.73(39)	9.79~46.08/ 16.58(39)	0.23~1.63/ 0.65	116~817/ 325	986~1000/ 993(2)	0.030	[53]		
重庆西部	下志留统 龙马溪组	457.8	3500~ 4500	0.80~5.25/ 2.56(25)	2.35~35.75/ 8.81(517)	6.07~22.31/ 15.57(517)	0.21~2.28/ 0.69	82~889/ 271	370~1200/ 570(7)	[64]			
威远	下寒武统 九老洞组	541.0	2600~ 3300	0.27~6.02/ 1.90(49)	13.70~47.70/ 23.55(9)	6.64~12.10/ 9.55(17)	0.10~3.31/ 1.69	527~1743/ 890	300~1300/ 789(18)	0.020	[11, 55]		
中扬子地区	湖北西部	下志留统 龙马溪组	457.8	1490~ 1530	0.41~1.93/ 1.08	2.53~11.00/ 5.92(40)	6.11~24.50/ 14.75(40)	0.22~0.93/ 0.52	205~864/ 484	300~400/ 320(50)	[11]		
	湖北西部	下寒武统 牛蹄塘组	541.0	1894~ 2113	0.62~4.83/ 2.72(10)	13.70~112.10/ 62.50(38)	4.60~24.26/ 12.10(38)	0.20~7.72/ 4.28	356~2838/ 1574	100~3100/ 1600(9)	0.010~0.080/ 0.040(12)	[15, 35]	
美国 Anadarko 盆地	泥盆系—石炭系	358.9	2621~ 3901	2.80~5.30/ 4.05	8.10~61.80/ 29.36(36)	2.60~15.00/ 5.40	0.38~2.84/ 1.33	94~701/ 329	327~917/ 531(21)	[21, 46]			
四川盆地	上三叠统 须家河组	227.0	2265~ 4496	10.00	2.74~5.85/ 5.14(5)	7.46~18.80/ 12.49(5)	0.12~0.28/ 0.22	12~28/ 22	50~530/ 181(12)	[34]			
沁水盆地	南部	石炭系—二叠系	323.0	361~ 819	10.00~37.00/ 15.00	0.38~5.68/ 2.89(25)	0.74~25.80/ 7.51(25)	0.02~0.46/ 0.18	1~31/ 12	1~150/ 28(26)	0.010~0.480/ 0.105(17)	[31~32]	
煤层气	鄂尔多斯盆地	石西	323.0	1650~ 2000	9.14~20.11/ 12.41	1.29~30.5/ 5.02(19)	0.92~27.40/ 11.63(35)	0.06~1.45/ 0.30	5~117/ 25	500~2300/ 1133(6)	0.010~0.080/ 0.025(17)	[16, 51~52]	
英国 Central Scotland 盆地	石炭系	320.0	892~ 1059	8.00~10.00	1.60±0.40	4.60±4.20	0.05~0.16/ 0.10	6~20/13	1180~2980/ 1866(7)	0.172~0.187/ 0.178(7)	[24]		
英国 Central England 盆地	石炭系	308.5	222~ 700	3.80~ 4.10	1.60±0.70	4.70±1.70	0.06~0.14/ 0.10	16~38/27	340~1100/ 672(6)	0.002~0.043/ 0.018(6)	[24]		
美国 Illinois 盆地	石炭系	315.2	73~ 213	0.10~3.10/ 1.91(54)	0.85~1.54/ 1.19(6)	2.95~5.35/ 4.01(6)	0.06~0.11/ 0.08	31~56/ 43	19~1465/ 216(20)	0.043~0.901/ 0.118(20)	[29~30]		

注 “/”后为平均值; 括号内为样品数; ①、②、③—井场解吸气样检测所得的 He 含量或同位素比值, 而表中其他 He 含量及同位素比值均为工业气井取样分析得到; ④—致密砂岩气的 R/R<sub>a</sub> 比值据文献[16]。

国湖北西部地区和四川盆地威远地区下寒武统页岩、美国 Anadarko 盆地泥盆系—石炭系 WoodFord 组页岩衰变的生氦量较高, 均在  $1.32 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$  以上, 其原因主要在于这些页岩的地层年代较老, U 含量较高。主要煤层气储层中单位质量岩石 U、Th 衰变的生氦量为  $(0.08 \sim 0.31) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ 、平均为  $0.17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ 。煤层放射性衰变的生氦量远低于含气页岩, 这主要是由于与含气页岩相比, 煤层的 U、Th 含量较低, 地层年代更为年轻。

岩石 U、Th 放射性衰变形成的氦气需要脱离宿主矿物进入孔隙空间。Ballentine 等<sup>[50]</sup>研究认为主要有 4 种方式, 分别为:  $\alpha$  离子反冲脱离矿物、从矿物中扩散运移、矿物破裂和矿物转换释放出氦气。氦气能否从产氦矿物中释放与该矿物的封闭温度有关, 只有温度超过矿物对氦气的封闭温度, 氦气才能从矿物中释放到孔隙中。上扬子地区寒武系、志留系页岩中的富 U、Th 矿物主要为独居石和锆石, 其氦气封闭温度分别为  $182 \sim 299^\circ\text{C}$ 、 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ <sup>[59]</sup>。而中—上扬子地区寒武系、志留系的最大埋深达  $7000 \sim 12000 \text{ m}$ , 对应的地层温度达到  $210 \sim 360^\circ\text{C}$ , 且在喜马拉雅期(古近纪—

新近纪) 开始大幅隆升<sup>[60]</sup>。Zhang 等<sup>[61]</sup>研究认为, 当温度达到花岗岩对氦气的封闭温度时, 超过 90% 的氦气能够释放出来。因此, 中—上扬子地区寒武系和志留系页岩经历的地层温度超过了独居石和锆石对氦气的封闭温度, 大部分矿物晶格中封闭的氦气已充分释放。以年代较为古老的鄂尔多斯盆地东部石炭系—二叠系煤层气为例, 其所经历的地层最大埋深小于 4 km, 对应的地层温度小于  $170^\circ\text{C}$ <sup>[51~52, 62]</sup>, 超过碳酸盐岩、磷灰石、铌钛铀矿和萤石等矿物对氦气的封闭温度, 而小于锆石和独居石等矿物对氦气的封闭温度<sup>[63]</sup>, 由此分析, 该地区煤层放射性衰变生成氦气的释放效率小于中—上扬子地区下古生界页岩。

假设页岩和煤层源内 U、Th 放射性衰变产生的氦气全部从矿物晶格中逃逸, 并全部保存在气藏内且没有向外运移和散失, 将页岩和煤层单位质量岩石放射性衰变的生氦量除以页岩气和煤层气现今的含气量, 便可得到页岩气和煤层气源内氦含量<sup>[24]</sup>。该假设与中—上扬子地区下古生界页岩放射性衰变释放氦的效率相对接近, 且高于煤层放射性衰变释放氦气的效率。国内外典型页岩气的含气量为  $0.01 \sim 11.50 \text{ m}^3/\text{t}$ ; 典型煤层气的含气量为

0.1~37.0 m<sup>3</sup>/t<sup>[11,15-16,19-21,24,27-32,34-35,44-46,51-55,63-67]</sup>(表1)。为了保证含气量数据具有代表性,选用与Wang等<sup>[64]</sup>研究相同的典型页岩气和煤层气的平均含气量。据此计算得国内外典型页岩气和煤层气源内氦含量分别为(50~8481)×10<sup>-6</sup>和(1~117)×10<sup>-6</sup>(表1)。

图6展示了国内外典型页岩气和煤层气实测氦含量与理论计算的源内氦含量分布。可以看出,除中国柴达木盆地北缘侏罗系页岩气源内氦含量远小于现今

页岩气外<sup>[65-67]</sup>,其余13个页岩气田的实测氦含量与源内氦含量分布区间非常吻合。这表明现今页岩气中的氦很有可能来自源内U、Th放射性衰变。柴达木盆地北缘侏罗系页岩气的R/R<sub>a</sub>比值为0.02~0.93。张云鹏等<sup>[20]</sup>基于区域发育的多条深切至基底甚至地幔的深大断裂以及页岩气藏上覆发育的多套封闭性较好的盖层组合推断认为,氦气除来源于基底富U、Th花岗岩体的放射性衰变外,个别样品有少量幔源氦的混入。

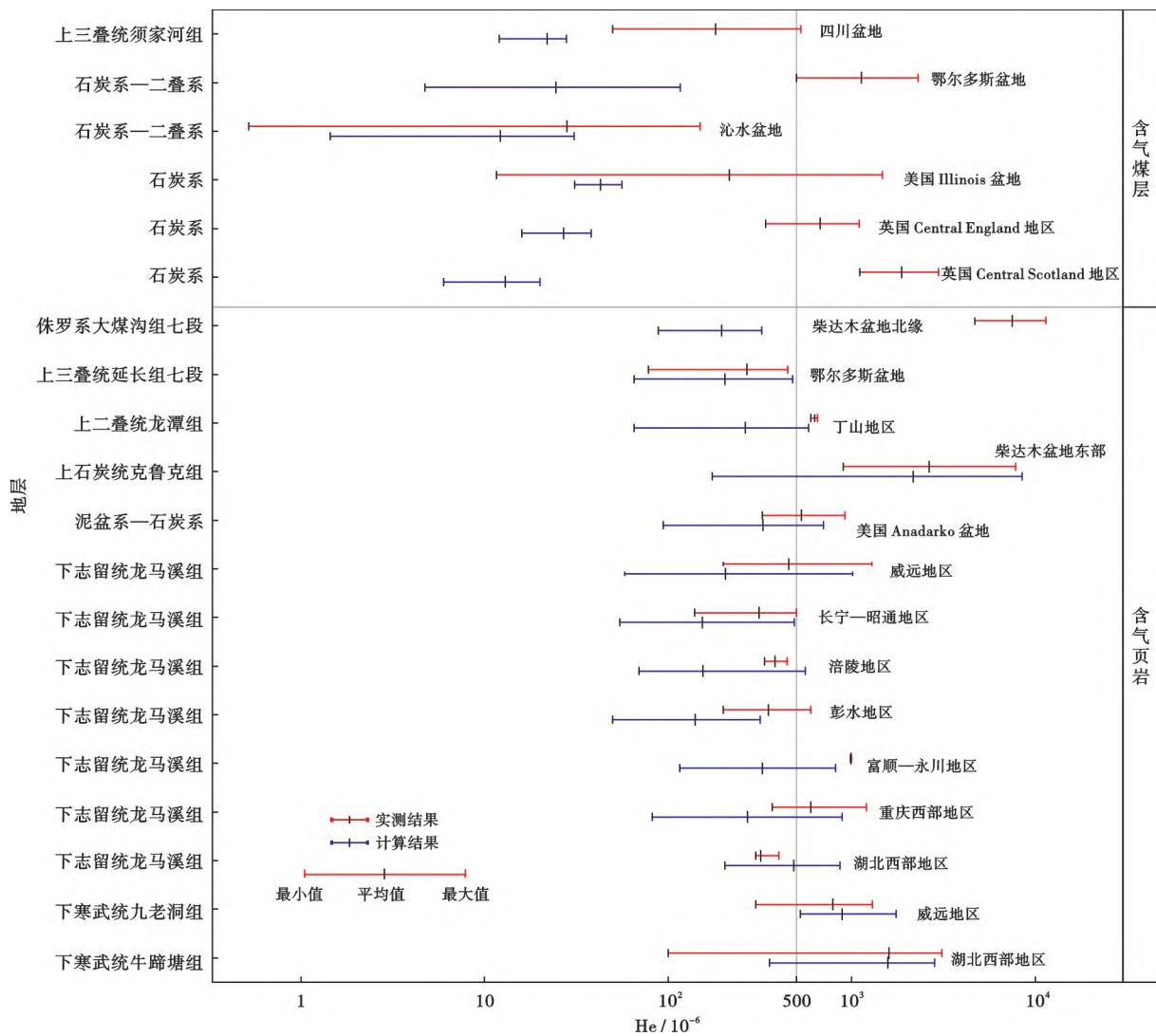


图6 国内外典型页岩气和煤层气的实测氦含量及源内氦含量分布

Fig.6 Distribution of measured and in-source helium contents in typical shale gas and coalbed methane at home and abroad

自石炭纪以来,煤层气源内氦含量通常小于120×10<sup>-6</sup>,远低于煤层气中的实际氦含量(图6)。尽管沁水盆地石炭系一二叠系煤层气源内氦含量与实测氦含量比较接近,但Chen等<sup>[31]</sup>基于<sup>4</sup>He/<sup>40</sup>Ar研究认为,沁水盆地石炭系一二叠系煤层气已有超过90%的氦气在中生代快速抬升时逸散,所以煤层气源内氦含量同样远低于实际煤层气中的氦含量。这表明煤层气源内氦含量十分有限,富氦煤层气藏的形成必须要有源外氦的贡献。

### 3 非常规天然气中的氦气富集机制

#### 3.1 富氦页岩气成藏机制

中国中—上扬子地区寒武系和志留系页岩气、柴达木盆地东部石炭系与北缘侏罗系页岩气、美国Anadarko盆地Woodford组页岩气以及加拿大西加拿大盆地二叠系与三叠系页岩气均展现良好的氦资源前景。除中国柴达木盆地北缘侏罗系页岩气源内氦含量远低

于实测氦含量(图 6)、页岩气中的氦主要来自基底花岗岩放射性衰变外<sup>[20]</sup>,其余主要富氦页岩气源内 U、Th 放射性衰变产生的累积氦含量与现今气藏内实测的氦含量一致(图 6),这表明富氦页岩气中的氦很大概率来自内源氦的供给,这与页岩气本身具有较高的生氦潜力和气藏封闭性好有关。

页岩气为典型的自生自储型气藏,页岩基质的渗透率极低,通常只有几纳达西到几十微达西<sup>[68-71]</sup>,页岩本身也是常规天然气藏的优质盖层。Milkov 等<sup>[12]</sup>基于全球 2617 个页岩气样品组分及 C、H 同位素数据分析发现,绝大部分页岩气在烃源岩热演化过程中产生,且与成熟度具有较好的相关性,这表明页岩气中混入其他成因气体的量十分有限。四川盆地焦石坝、威远—富顺—永川—长宁等区块的页岩气富集模式表明,页岩气的富集同样需要良好的构造保存条件,页岩气层内部稳定、分布连续,不发育与基底连通的深大断裂<sup>[72-75]</sup>。全球页岩气中的氦含量远低于常规天然气及煤层气(图 1),而常规天然气和煤层气储层源内氦含量十分有限,气藏中的氦主要来自源外氦的贡献,这也证实以壳源氦为主的页岩气藏通过深大断裂获取基底或幔源氦的可能性很小,页岩气藏在很大程度上为封闭气藏<sup>[12]</sup>。页岩气藏本身的封闭性也导致其与含水层之间缺乏相互作用,最终导致以地层水为主要迁移载体的外部氦很难进入到页岩气藏中<sup>[76]</sup>。

学者们<sup>[77]</sup>一般认为<sup>36</sup>Ar 是地球的原始组分,而放射性成因的<sup>40</sup>Ar 主要由源岩中的<sup>40</sup>K 通过壳层捕获而形成,其丰度主要与源岩的地质时代和钾含量有关,因此可用<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 来表征放射性成因氩的年代累积效应。四川盆地威远区块和长宁区块龙马溪组页岩气的<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值主体分布在 1 441.5~1 983.1,与四川盆地志留系烃源岩中 K 放射性衰变生成的<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值(1 724~2 042)较为一致,这表明龙马溪组页岩气中的氩为源内 K 放射性衰变累积形成<sup>[77-78]</sup>。这也佐证了以龙马溪组页岩气为代表的壳源氦成因的页岩气并未获得来自基底的稀有气体。

页岩气藏不发育与基底连通的深大断裂,页岩气中很少有外界烃类或稀有气体的加入,页岩气中的氦更大可能是来自源内 U、Th 的放射性衰变。国内外典型页岩气现今实测的氦含量与基于页岩中 U、Th 放射性衰变效应年代累积的氦含量分布区间相近(图 6),这进一步证实了页岩气中的壳源氦主要源自页岩的 U、Th 放射性衰变累积形成。而与此不同,中国柴达木盆地北缘侏罗系<sup>[20]</sup>和阿根廷 Neuquén 盆地上侏罗统—下白垩统 Vaca Muerta 组页岩气<sup>[79]</sup>中的氦为壳-幔复合来源。由于这两个地区的页岩中广泛发育深切至基底

甚至地幔的深大断裂,页岩气中的氦主要来自基底及地幔,且页岩气成分以 N<sub>2</sub> 或 CO<sub>2</sub> 为主,其富集模式与富氦天然气相似。

富有机质页岩在地质演化过程中原地生成的天然气总量远大于现今的页岩气含量。腾格尔等<sup>[80]</sup>基于固体沥青的识别和统计获得涪陵地区和彭水地区龙马溪组页岩的原地生气量分别为 21.23 m<sup>3</sup>/t 和 18.99 m<sup>3</sup>/t,远高于其现今页岩的平均含气量(分别为 5.95 m<sup>3</sup>/t 和 1.99 m<sup>3</sup>/t,表 1)。这主要是由于页岩在热演化过程中生成的页岩气大部分已通过排烃、气体扩散和构造抬升破坏等多种形式逸散,现今保存下来的页岩气只是其历史生成的烃类气体的一部分。基于理论计算所获得的页岩源内氦含量(图 6)是页岩自沉积后岩石本身 U、Th 放射性衰变所产生的全部氦含量。页岩源内氦含量同现今页岩气中的氦含量十分接近,表明页岩源内 U、Th 放射性衰变生成的氦几乎保存在页岩气藏内,并未随着地质过程中页岩气烃类组分的逸散而损耗。这可能与氦浓度低导致毛细管阻力的堵塞作用和氦气具有比甲烷更强的吸附能力有关。

氦气的散失方式包括水溶态和游离态 2 种<sup>[81]</sup>,即氦气主要通过溶解在地层水中或以单一气相扩散逃逸。一般认为,氦气在泥页岩孔隙水中的溶解度较低,不利于以溶解态扩散,主要以游离态在泥页岩中扩散<sup>[81]</sup>。而页岩气藏以烃类组分为主,这一方面导致氦气的分压低,克服毛细管阻力的动力不足;另一方面烃类载气浓度高,在浓度差的驱动下,扩散动力大,若直径较大(0.38 nm)的甲烷分子先堵塞在气体的运移通道中,会阻止直径小(0.26 nm)的氦分子运聚,由此导致氦气在纳米级页岩孔隙中被较好地保存下来<sup>[81]</sup>[图 7(a)]。此外,You 等<sup>[82]</sup>基于蒙特卡洛法模拟了甲烷和氦气在纳米级伊利石孔隙表面上的竞争吸附,结果显示,氦气在伊利石表面上的吸附能力远高于甲烷,且吸附系数( $k_{\text{CH}_4}/k_{\text{He}}$ )随温度升高而降低,从 45 °C 时的 0.90 降低到 145 °C 时的约 0.66<sup>[82]</sup>。这导致页岩气在散失过程中吸附能力弱的甲烷优先脱附、逃逸,而吸附能力强的氦气则能够更好地保存下来。

因此,页岩气藏中的氦气主要来自源内 U、Th 放射性衰变,且氦能够在页岩气藏中较好地保存下来。页岩中的 U、Th 含量越高、地层年代越古老,则页岩源内生氦量越充足。基于全球含氦页岩气藏统计和国内外典型页岩气源内氦含量的理论计算结果认为,富氦页岩气藏(氦含量>0.05%)的形成一般需要页岩形成时代在石炭纪前,页岩中的 U 含量在  $10 \times 10^{-6}$  以上。中—上扬子地区寒武系和志留系 2 套海相页岩是当前页岩气勘探开发的主战场,其中,以寒武系页岩更

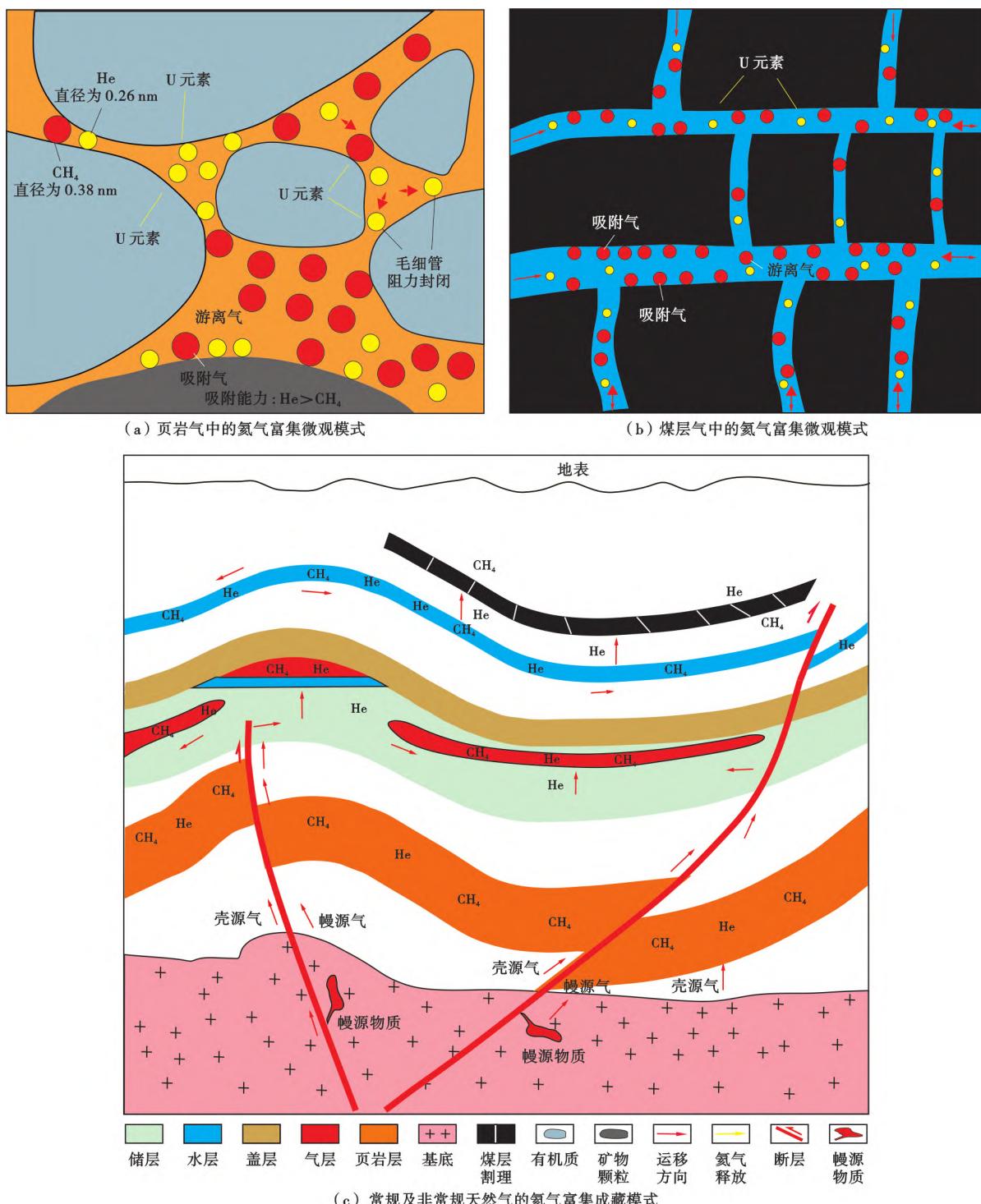


图7 含氦天然气成藏综合模式

Fig.7 Comprehensive model of gas accumulation with helium

为古老,页岩中的U、Th含量较高,生氦潜力较大。寒武系海相页岩的沉积厚度大、分布范围广,是一套生氦潜力较大的氦源岩层<sup>[33]</sup>。该套页岩的封闭性较强,氦浓度较低,毛细管阻力的堵塞作用较强,页岩内部生成的氦能够较好地保存下来,是当前寻找富氦页岩气的有利勘探区带。

### 3.2 富氦煤层气成藏机制

与现今报道的页岩气中氦含量最高的中国柴达木盆地北缘侏罗系页岩气(氦含量为 $10\ 800\times10^{-6}$ )相比,煤层气中的氦含量更高。例如:美国墨西哥湾盆地北部North Louisiana地区古近系Wilcox群生物成因煤层气中的氦含量达 $22\ 800\times10^{-6}$ ;澳大利亚Bowen盆地煤

层气、中国鄂尔多斯盆地东缘石炭系一二叠系煤层气、英格兰及苏格兰中部石炭系煤层气中氦的平均含量均超过  $500 \times 10^{-6}$  为富氦煤层气(图 3)。煤层气源内氦含量通常远低于煤层气中的实测氦含量(图 5),而幔源氦对煤层气中氦的贡献一般不超过 12.57%,这表明煤层气中的氦更多地来自源外壳源氦的贡献。Györe 等<sup>[24]</sup>基于英国石炭系煤层气中氦(含量为 0.030%~

0.298%) 的成因分析认为,幔源氦及煤层中 U、Th 衰变形成的氦的贡献最高分别为 2.8% 和 0.00196%,煤层气中的氦主要来自地壳深处的熔融,而煤层在数千万年里一直充当着深层挥发物的储层。煤层气中氦的富集机制与页岩气具有显著差异[图 7(a)、图 7(b)],这主要与二者在生氦潜力、氦气运聚及保存条件等方面的差异有关<sup>[3,5-6,10,12,17,20,29,32,36,80,83-89]</sup>(表 2)。

表 2 富氦常规与非常规天然气成藏特征对比

Table 2 Comparison of accumulation characteristics of helium-rich conventional and unconventional gas

成藏特征		富氦常规天然气藏	富氦页岩气藏	富氦煤层气藏	文献
氦气含量及来源	氦气含量	0~0.071 1/0.001 3	$6 \times 10^{-8} \sim 0.011 40/0.000 61$	$5 \times 10^{-7} \sim 0.022 80/0.001 15$	部分据文献 [3,5-6,12]
	氦气成因	壳源为主、幔源为辅,少数为幔源氦气藏,如中国东部含油气盆地	壳源为主	壳源为主	
	氦气来源	外源氦	内源氦为主,外源氦为辅,自生自储	外源氦为主,内源氦为辅	
氦源岩	岩石类型	花岗岩基底	古老富有机质页岩	花岗岩基底	部分据文献
	岩石年代	太古宙、元古宙	早古生代	太古宙、元古宙	[17,84-85]
源内生氦潜力	氦气储层 U 含量/ $10^{-6}$	0.45	1.07~112.10/12.19	0.38~30.50/3.57	部分据文献[3]
	氦气储层 Th 含量/ $10^{-6}$	1.7	0.10~62.90/15.07	0.74~27.40/9.46	
	氦气储层衰变氦量/ $(10^{-3} \text{m}^3/\text{t})$	0.056	0.17~4.28/1.02	0.08~0.30/0.17	
	氦气储层源内氦含量/ $10^{-6}$	极低,可忽略	50~8481	1~117	
储层	储层岩性	孔隙型砂岩、裂缝型碳酸盐岩	泥岩/页岩	煤层及碎屑岩夹层	部分据文献 [83,86-87]
	储层物性	好孔隙度>10%,渗透率>1 mD	极致密孔隙度为 4%~6%,渗透率<0.1 mD	较差孔隙度为 6%~11%,渗透率<100 mD	部分据文献 [29,32,83]
	氦气储集空间	大孔隙、裂缝	基质孔隙,尤其是 0.38 nm 以下的微孔隙	基质孔隙、割理、裂缝	部分据文献 [88-89]
	埋深/m	<3500	主体为 1500~3500	<2000	
运移聚集	氦气释放	岩浆作用、构造活动促使氦从基底矿物晶格中释放	矿物破裂、矿物转变、扩散及衰变反冲释放	岩浆作用、构造活动促使氦从基底岩体的矿物晶格中释放	部分据文献 [29,36]
	氦气运移	早期以水溶态随地层水运移、后期因亨利系数差异从水溶态转为游离态进入气藏	几乎不发生二次运移	与富氦常规天然气藏相同	
	运移距离	运移距离较长	运移距离较短甚至不发生二次运移	运移距离较长	部分据文献 [87-89]
	运移通道	深大断裂、断层、不整合面	微裂隙、孔隙	深大断裂、断层、不整合面	
保存条件	盖层岩性	主要为蒸发岩,其次为泥页岩	页岩	泥岩、粉砂质泥岩、灰岩	部分据文献
	封闭性	水动力平衡,封闭性好	水动力弱,封闭性好	水动力强,封闭性差	[10,20]
富集模式		发育于克拉通盆地,氦气源于古老花岗岩基底,通过深大断裂和不整合面运移到古隆起和有效圈闭,受晚期构造活动影响,具有区域性优质盖层	发育于石炭纪之前的古老页岩中,页岩中的 U 含量在 $10 \times 10^{-6}$ 以上且具有一定含气量 ( $>1 \text{m}^3/\text{t}$ )	发育于成藏年代较晚且底部有充足的氦源供给(包括壳源氦和幔源氦)的煤层	部分据文献 [80,84]

注 “/”后为平均值。

煤层的生氦潜力远低于页岩,原因主要为:①煤层的 U、Th 平均含量(分别为  $3.57 \times 10^{-6}$ 、 $9.46 \times 10^{-6}$ )远小于页岩的 U、Th 平均含量(分别为  $12.19 \times 10^{-6}$ 、 $15.07 \times 10^{-6}$ ,图 5),而全球煤层主要形成于石炭系一二叠系以及之后的年轻地层中,相较于下古生界页岩,煤层更为年轻,这使得煤层单位质量岩石 U、Th 放射性衰变的生氦量(平均为  $0.17 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{t}$ )远低于页岩单位质量岩石 U、Th 放射性衰变的生氦量(平均为  $1.02 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{t}$ ,表 2);②目前,煤层中保存的烃类含量远高于页岩(表 1),典型含氦煤层的烃类含量平均为  $8.52 \text{m}^3/\text{t}$  远高于页岩中的烃类平均含量( $2.88 \text{m}^3/\text{t}$ )。煤

层气中较高含量的烃类进一步稀释了其中的氦浓度。以上两方面原因导致全球典型煤层源内氦含量(通常小于  $120 \times 10^{-6}$ )远低于页岩源内氦含量(主体在  $500 \times 10^{-6}$  以上,最高达  $8481 \times 10^{-6}$ ,图 6)。

煤储层的渗透性和水动力作用强度与页岩存在较大差异,这导致煤层气中的氦运聚及保存条件与页岩气不同。具体表现在:①尽管煤层和页岩的基质渗透率一般均小于  $10^{-3} \text{mD}$ ,但由于煤层中发育不同级别的割理,由此造成煤层的裂缝渗透率(0.1~100.0 mD)远高于页岩的裂缝渗透率(0.01~0.10 mD)<sup>[83]</sup>,煤层整体的渗透性更好,而来自深部的气体可以穿透煤层并储集

于其中,如英国石炭系煤层中的氦即为此成因<sup>[24]</sup>;②当前主力勘探开发的煤层气的埋深(2 000 m 以浅)远低于页岩气的埋深(2 000~4 500 m),煤层气整体处于承压区—弱径流区,煤层的水含量丰富且遭受的水动力作用较强,以至于煤层中的水活跃程度远高于封闭性强的页岩,这一方面使得煤层中的氦可通过扩散作用进入到地层水中并随地下水运移,造成氦逸散,而另一方面,溶有氦的地层水在亨利系数差异下可发生解吸并在煤层中聚集成藏,如新集地区煤层气的分析结果显示其由于受浅部地层水径流影响而混入了大气氦<sup>[84]</sup>。

基于国内外典型煤层气藏的生氦量理论计算和富集规律研究认为:由于煤层气储层的渗透性好,所遭受的水动力作用强,因而煤层气中的氦与外界的交换将会更为活跃;由于大部分煤层源内生氦量较低,因而富氦煤层气的形成应有充足的源外氦的贡献。

成藏年代较晚、底部有充足氦源供给(包括壳源氦和幔源氦)的煤层是氦气的有利聚集区。尽管理论上也存在煤层内部富集 U,Th 且保存条件适当的富氦煤层气,但此类气藏目前鲜有发现。鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系煤层气资源丰富,而盆地基底为一套富含 U,Th 的古老花岗岩,底部有充足的氦源供给,加之煤层内发育大量沟通基底的断裂<sup>[85-86]</sup>,这些断裂作为氦气向上运移的优势通道,使得外源氦可补给到石炭系一二叠系煤层气中,形成氦气富集。目前,鄂尔多斯盆地已发现由基底花岗岩的 U,Th 放射性衰变形成的壳源氦沿断裂运移至石炭系一二叠系致密砂岩中形成的富氦天然气田(如东胜气田)<sup>[1]</sup>。因此在该地区寻找通过深大断裂与花岗岩基底连通的煤层,是富氦煤层气的有利勘探方向。

### 3.3 富氦非常规天然气与富氦常规天然气成藏条件对比

基于富氦页岩气和富氦煤层气的成藏条件剖析,笔者系统对比了富氦常规天然气、富氦页岩气和富氦煤层气在氦气含量、来源、氦源岩、源内生氦潜力、储集层、运移和保存条件上的差异(表 2)。

氦气含量对比显示:氦平均含量在富氦常规天然气藏(0.130%)和富氦煤层气藏(0.115%)中较高,在富氦页岩气藏(0.061%)相对较低。富氦气藏中的氦均以壳源氦为主,仅在中国东部含油气盆地中分布少量壳-幔复合型氦气藏<sup>[12,34,50]</sup>。

从源内生氦潜力来看,富氦常规天然气藏储层中的 U,Th 含量分别为  $0.45 \times 10^{-6}$  和  $1.70 \times 10^{-6}$ ,U,Th 衰变的生氦量为  $5.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{t}$ ,源内氦含量极低,可忽略不计;富氦煤层气藏中的 U,Th 含量分别为  $3.57 \times 10^{-6}$  和  $9.46 \times 10^{-6}$ ,煤层中 U,Th 衰变的生氦量为  $0.17 \times$

$10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ ,源内氦含量为  $(1 \sim 117) \times 10^{-6}$ ,具有一定的源内生氦潜力;富氦页岩气藏中的 U,Th 平均含量分别为  $12.19 \times 10^{-6}$  和  $15.07 \times 10^{-6}$ ,页岩储层中 U,Th 衰变的生氦量为  $1.02 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$ ,源内氦含量为  $(50 \sim 8481) \times 10^{-6}$ ,源内生氦潜力巨大<sup>[17,85]</sup>。因此,富氦常规天然气藏和富氦煤层气藏中的氦主要为外源氦贡献,其氦源岩主要为太古宇和元古宇花岗岩基底;而富氦页岩气藏中的氦属于自生自储型氦气藏,以内源氦贡献为主,其氦源岩主要为下古生界富有机质页岩。

从氦气藏的储层特征来看,富氦常规天然气藏的储层以孔隙型和裂缝型碳酸盐岩为主,储层物性较好,氦气多作为天然气的伴生气赋存在大孔隙和裂缝中,埋深多小于 3 500 m<sup>[83,87]</sup>;富氦页岩气藏的储层岩性主要为泥页岩,储层物性较差,氦气多储存在基质孔隙中,尤其是在 0.38 nm 以下的微孔中,主体埋深为 1 500~3 500 m<sup>[88-89]</sup>;富氦煤层气藏的储层主要为煤层和碎屑岩夹层,储层物性较差,割理发育,渗透率较高,氦气主要储存在基质孔隙、割理和裂缝中,主体埋深在 2 000 m 以浅<sup>[29,32]</sup>。

从氦气的释放和运移特征来看,在富氦常规天然气藏与富氦煤层气藏中,氦气的释放和运移特征相似<sup>[34,50]</sup>,均表现为:受岩浆作用和构造活动影响,当温度达到不同矿物对氦的封闭温度时,基底岩石中的氦从矿物晶格中释放,以水溶态进入地层水中并随地层水沿深大断裂、断层和不整合面等运移,在后期因亨利系数差异而由水溶态转为游离态进入气藏,从而实现较长距离的运移[图 7(c)]。富氦页岩气藏为自生自储型气藏,氦气几乎不发生运移,只有当矿物中的氦浓度达到一定程度后,氦气才通过扩散和衰变反冲等方式释放到页岩基质孔隙中,其主要运移通道为页岩层中的微裂缝和孔隙<sup>[38]</sup>。

从保存条件来看,常规富氦气藏的盖层主要为蒸发岩,其次为泥页岩;由于常规富氦气藏的水动力较为平衡,整体上盖层封闭性较好<sup>[10,20]</sup>。富氦煤层气藏的盖层主要为泥岩、粉砂质泥岩和灰岩等,由于富氦煤层气藏的水动力整体较强,加之割理和裂缝较为发育,盖层封闭性较差,不利于氦气保存。富氦页岩气藏为自生自储型气藏,其水动力较弱,整体上封闭性较好。

基于富氦常规天然气与富氦页岩气和富氦煤层气在氦气含量及来源、氦源岩、源内生氦潜力、储集层、运移和保存条件上的对比分析,笔者总结了 3 种类型氦气藏富集的有利条件:①富氦常规天然气藏主要分布在克拉通盆地,有深大断裂和不整合面连通古老花岗岩基底,发育于古隆起和有效圈闭中,晚期构造活动促使氦气成藏,具有区域性优质盖层;②富氦页岩气藏主

要发育于石炭纪之前的古老页岩中,其 U 含量在  $10 \times 10^{-6}$  以上且具有一定含气量 ( $>1 \text{ m}^3/\text{t}$ ) ; ③富氦煤层气藏的成藏年代较晚,发育于底部有充足氦源供给(包括壳源氦和幔源氦)的煤层。

## 4 结 论

(1) 全球 450 个含氦页岩气和煤层气样品中,超过 24% 样品的氦含量大于  $500 \times 10^{-6}$ ,其中,来自煤层气样品中的氦含量最高为 2.280%、平均为 0.115%,来自页岩气样品中的氦含量最高为 1.140%、平均为 0.061%。非常规天然气展现了良好的氦资源前景。

(2) 页岩气和煤层气中的氦以壳源氦为主,幔源氦的贡献通常不超过 12.57%。页岩气中的氦主要由源内 U、Th 放射性衰变形成;煤层气中内源氦的贡献十分有限,富氦煤层气主要来自外源氦的输入。

(3) 页岩气与煤层气中氦富集机制的差异主要与二者的生氦潜力、储层渗透性和水动力条件有关。U 含量在  $10 \times 10^{-6}$  以上且具有一定含气量 ( $>1 \text{ m}^3/\text{t}$ ) 的石炭纪之前的古老页岩,是富氦页岩气的有利勘探目标;成藏年代较晚且底部有充足氦源供给(包括壳源氦和幔源氦)的煤层,是富氦煤层气的有利勘探目标。

(4) 中国中—上扬子地区寒武系页岩和鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤层是富氦非常规天然气的有利勘探层位。

符号注释:  $E$ —衰变中释放出的能量, eV;  ${}^0_1 e$ —电子;  $N$ —衰变后残余的原子数;  $N^*$ —衰变的原子数;  $\lambda$ —衰变常数;  $t$ —衰变时间, a;  $t_{1/2}$ —半衰期, a;  $k_{\text{CH}_4}$ 、 $k_{\text{He}}$ —甲烷、氦气的吸附系数。

## 参 考 文 献

- [1] 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, 65(5): 874-881.
- [2] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地化特征——I. 氦资源的新类型: 沉积壳层幔源氦的工业储集 [J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(1): 1-8.  
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Geochemistry on mantle-derived volatiles in natural gases from eastern China oil/gas provinces (I): a novel helium resource—commercial accumulation of mantle-derived helium in the sedimentary crust [J]. Science in China Series D, 1997, 40(2): 120-129.
- [3] BROWN A A. Formation of high helium gases: a guide for explorers [C]//2010 AAPG Convention and Exhibition. New Orleans: AAPG, 2010: 80115.
- [4] 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——古老地层水脱氦富集 [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.
- [5] 王晓锋, 刘全有, 刘文汇, 等. 中国东部含油气盆地幔源氦气资源富集成藏机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(12): 2441-2453.  
WANG Xiaofeng, LIU Quanyou, LIU Wenhui, et al. Accumulation mechanism of mantle-derived helium resources in petroliferous basins, eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(12): 2322-2334.
- [6] 王海东, 刘成林, 范立勇, 等. 古隆起背景下多源供氦氦气富集模式——以鄂尔多斯盆地庆阳气田为例 [J/OL]. 天然气地球科学, (2024-08-22). [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxYTb1tBRkJ7OZfnbRgPRwJAA3albkb6hYyCNZVu5B1sQHjDOAtQl-aBeZN0M0\\_nJfFrGqs09Qe2BQGm91ydZX5Ox\\_2tm6gFSqZLamj0kbGZVbde6ur2Ex6mTAIqSMm\\_73-hTdQ\\_GccoKzDd76na8RZRUsWRXYNE6ReJD09CKL3fm6-IfXWhN8jn5&uniplatform= NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxYTb1tBRkJ7OZfnbRgPRwJAA3albkb6hYyCNZVu5B1sQHjDOAtQl-aBeZN0M0_nJfFrGqs09Qe2BQGm91ydZX5Ox_2tm6gFSqZLamj0kbGZVbde6ur2Ex6mTAIqSMm_73-hTdQ_GccoKzDd76na8RZRUsWRXYNE6ReJD09CKL3fm6-IfXWhN8jn5&uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
WANG Haidong, LIU Chenglin, FAN Liyong, et al. Helium enrichment patterns of multi-source helium supply in the context of paleo-upliftment: a case study of the Qingsheng gas field in the Ordos Basin [J/OL]. Natural Gas Geoscience, (2024-08-22). [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxYTb1tBRkJ7OZfnbRgPRwJAA3albkb6hYyCNZVu5B1sQHjDOAtQl-aBeZN0M0\\_nJfFrGqs09Qe2BQGm91ydZX5Ox\\_2tm6gFSqZLamj0kbGZVbde6ur2Ex6mTAIqSMm\\_73-hTdQ\\_GccoKzDd76na8RZRUsWRXYNE6ReJD09CKL3fm6-IfXWhN8jn5&uniplatform= NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxYTb1tBRkJ7OZfnbRgPRwJAA3albkb6hYyCNZVu5B1sQHjDOAtQl-aBeZN0M0_nJfFrGqs09Qe2BQGm91ydZX5Ox_2tm6gFSqZLamj0kbGZVbde6ur2Ex6mTAIqSMm_73-hTdQ_GccoKzDd76na8RZRUsWRXYNE6ReJD09CKL3fm6-IfXWhN8jn5&uniplatform= NZKPT&language=CHS).
- [7] YAKUTSENI V P. World helium resources and the perspectives of helium industry development [J]. Neftegazovaya Geologiya Teoriya I Praktika, 2014, 9(1): 1-22.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 徐永昌, 沈平. 漫源氦的工业储聚和祁连大断裂带 [J]. 科学通报, 1990, 35(12): 932-935.  
XU Yongchang, SHEN Ping. Industrial accumulation of mantle source helium and the Tanchenglujiang fracture zone [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(6): 494-498.
- [11] 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 rules of helium in shale gas and coal seam gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 684-696.

- characteristics and enrichment of helium in shale gas and coalbed methane [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 684-696.
- [12] MILKOV A V, FAIZ M, ETIOPE G. Geochemistry of shale gases from around the world: composition, origins, isotope reversals and roll-overs and implications for the exploration of shale plays [J]. *Organic Geochemistry*, 2020, 143: 103997.
- [13] 陶明信.中国煤层气同位素地球化学初步研究 [J]. *地质学报*, 2015, 89( 增刊1): 185-186.  
TAO Mingxin. Preliminary study on isotope geochemistry of coalbed methane in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89( S1): 185-186.
- [14] NUTTALL W J, CLARKE R H, GLOWACKI B A. Stop squandering helium [J]. *Nature*, 2012, 485( 7400): 573-575.
- [15] 罗胜元, 陈孝红, 刘安, 等. 中扬子宜昌地区下寒武统水井沱组页岩气地球化学特征及其成因 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 999-1010.  
LUO Shengyuan, CHEN Xiaohong, LIU An, et al. Geochemical features and genesis of shale gas from the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation shale in Yichang block, Middle Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 999-1010.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WARWICK P D, BRELAND JR F C, HACKLEY P C. Biogenic origin of coalbed gas in the northern Gulf of Mexico coastal plain, U.S.A. [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 76(1/2): 119-137.
- [19] 曹军, 刘成林, 马寅生, 等. 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页岩气地球化学特征及成因 [J]. *地学前缘*, 2016, 23(5): 158-166.  
CAO Jun, LIU Chenglin, MA Yinsong, et al. Geochemical characteristics and genesis of shale gas for Carboniferous marine-continental transitional facies coal measure strata in eastern Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(5): 158-166.
- [20] 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 Jincai, 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.
- [21] ABRAMS M A, THOMAS D. Geochemical evaluation of oil and gas samples from the Upper Devonian and Mississippian reservoirs southern Anadarko Basin Oklahoma and its implication for the Woodford shale unconventional play [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112: 104043.
- [22] TILLEY B, MCLELLAN S, HIEBERT S, et al. Gas isotope reversals in fractured gas reservoirs of the western Canadian Foothills: mature shale gases in disguise [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(8): 1399-1422.
- [23] BALLENTINE C J, O' NIONS R K. The nature of mantle neon contributions to Vienna Basin hydrocarbon reservoirs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 113(4): 553-567.
- [24] GYÖRE D, MCKAVNEY R, GILFILLAN S M V, et al. Fingerprinting coal-derived gases from the UK [J]. *Chemical Geology*, 2018, 480: 75-85.
- [25] 陈磊, 田景春, 文怀军, 等. 柴达木盆地北缘鱼卡煤田侏罗系煤层气特征及含气性评价 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 215-221.  
CHEN Lei, TIAN Jingchun, WEN Huaijun, et al. Jurassic coal bed methane characteristics and gas-bearing property evaluation in Yiqe coalfield, northern Qaidam Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 215-221.
- [26] 郭望, 张卫刚, 李玉宏, 等. 柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征——对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 676-686.  
GUO Wang, ZHANG Weigang, LI Yuhong, et al. Geochemistry of 7 Member shale of the Dameigou Formation in the northern Qaidam Basin, China: significance and implication for provenance and source weathering in the Late Middle Jurassic [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 676-686.
- [27] 汤艳, 张云鹏, 李永红. 柴北缘大煤沟组七段( $J_2 d^7$ )页岩油资源潜力评价——以大煤沟地区为例 [J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 575-584.  
TANG Yan, ZHANG Yunpeng, LI Yonghong. The potential evaluation of shale oil in the seventh member of Dameigou Formation ( $J_2 d^7$ ) on the northern margin of Qaidam Basin: a case study of Dameigou area [J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 575-584.
- [28] 乔世海. 柴达木盆地北缘典型地区页岩气形成条件及控制因素研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
QIAO Shihai. Study on shale gas formation condition and control factors in typical area in the north Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [29] 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.
- [30] MORE S, RIT R, KHAN M A, et al. Record of leaf and pollen cf. *Sloanaea* (Elaeocarpaceae) from the middle Siwalik of Darjeeling sub-Himalaya, India and its palaeobiogeographic implications [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2018, 91(3): 301-306.
- [31] 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.
- [32] XU Zhanjie, LIU Qinfu, ZHENG Qiming, et al. Isotopic composition and content of coalbed methane production gases and waters in karstic collapse column area, Qinshui coalfield, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 165: 94-101.
- [33] MA Yong, ARDAKANI O H, ZHONG Ningning, et al. Possible pore structure deformation effects on the shale gas enrichment: an example from the Lower Cambrian shales of the eastern Upper Yangtze platform, South China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 217: 103349.

- [34] 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.
- [35] LIU Yang ,ZHANG Jinchuan ,REN Jun ,et al. Stable isotope geochemistry of the nitrogen-rich gas from Lower Cambrian shale in the Yangtze gorges area ,South China [J]. Marine and Petroleum Geology ,2016 ,77: 693-702.
- [36] MOORE M T ,VINSON D S ,WHYTE C J ,et al. Differentiating between biogenic and thermogenic sources of natural gas in coalbed methane reservoirs from the Illinois Basin using noble gas and hydrocarbon geochemistry [J]. Geological Society ,London ,Special Publications ,2018 ,468( 1) : 151-188.
- [37] 马鹏程 邹雨 李超.霍西煤田 9#煤和 10#煤的煤岩学和煤质特征 [J].煤炭技术 ,2016 ,35( 10) : 135-137.
- MA Pengcheng ,ZOU Yu ,LI Chao. Coal petrology and quality characteristics of No. 9 and No. 10 coal seam in Huoxi coalfield [J]. Coal Technology ,2016 ,35( 10) : 135-137.
- [38] 赵文智 ,王晓梅 ,胡素云 ,等.中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景 [J].中国科学: 地球科学 ,2019 ,49( 6) : 939-964.
- ZHAO Wenzhi ,WANG Xiaomei ,HU Suyun ,et al. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China [J]. Science China Earth Sciences ,2019 ,62( 6) : 909-934.
- [39] NI Yunyan ,DAI Jinxing ,TAO Shizhen ,et al. Helium signatures of gases from the Sichuan Basin ,China [J]. Organic Geochemistry ,2014 ,74: 33-43.
- [40] 黄金亮 邹才能 ,李建忠 ,等.川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力 [J].石油勘探与开发 ,2012 ,39( 1) : 69-75.
- HUANG Jinliang ,ZOU Caineng ,LI Jianzhong ,et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin ,China [J]. Petroleum Exploration and Development ,2012 ,39( 1) : 69-75.
- [41] WANG Ning ,LI Meijun ,TIAN Xingwang ,et al. Main factors controlling the organic matter enrichment in the Lower Cambrian sediments of the Sichuan Basin ,SW China [J]. Geological Journal ,2020 ,55 ( 4) : 3083-3096.
- [42] 董大忠 程克明 ,王世谦 ,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用 [J].天然气工业 ,2009 ,29( 5) : 33-39.
- DONG Dazhong ,CHENG Keming ,WANG Shiqian ,et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry ,2009 ,29( 5) : 33-39.
- [43] GAO Ping ,LIU Gungdi ,JIA Chengzao ,et al. Redox variations and organic matter accumulation on the Yangtze carbonate platform during Late Ediacaran-Early Cambrian: constraints from petrology and geochemistry [J]. Palaeogeography ,Palaeoclimatology ,Palaeoecology ,2016 ,450: 91-110.
- [44] 马中豪 陈清石 ,史忠汪 ,等.鄂尔多斯盆地南缘延长组长 7 油页岩地球化学特征及其地质意义 [J].地质通报 ,2016 ,35( 9) : 1550-1558.
- MA Zhonghao ,CHEN Qingshi ,SHI Zhongwang ,et al. Geochemistry of oil shale from Chang 7 reservoir of Yanchang Formation in south Ordos Basin and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China ,2016 ,35( 9) : 1550-1558.
- [45] DAI Jinxing ,ZOU Caineng ,LIAO Shimeng ,et al. Geochemistry of the extremely high thermal maturity Longmaxi shale gas ,southern Sichuan Basin [J]. Organic Geochemistry ,2014 ,74: 3-12.
- [46] 李建忠 ,李登华 ,董大忠 ,等.中美页岩气成藏条件、分布特征差异研究与启示 [J].中国工程科学 ,2012 ,14( 6) : 56-63.
- LI Jianzhong ,LI Denghua ,DONG Dazhong ,et al. Comparison and enlightenment on formation condition and distribution characteristics of shale gas between China and U.S. [J]. Engineering Sciences ,2012 ,14( 6) : 56-63.
- [47] MOHAMMADI M ,SHADIZADEH S R ,MANSHAD A K ,et al. Experimental study of the relationship between porosity and surface area of carbonate reservoir rocks [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology ,2020 ,10( 5) : 1817-1834.
- [48] ABSHIRE M L ,RIEDINGER N ,CLYMER J M ,et al. Reconstructing the paleoceanographic and redox conditions responsible for variations in uranium content in north American Devonian black shales [J]. Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology ,2022 , 587: 110763.
- [49] KETRIS M P ,YUDOVICH Y E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals [J]. International Journal of Coal Geology ,2009 ,78 ( 2) : 135-148.
- [50] 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.
- [51] 秦国红 ,邓丽君 ,刘亢 ,等.鄂尔多斯盆地西缘煤中稀土元素特征 [J].煤田地质与勘探 ,2016 ,44( 6) : 8-14.
- QIN Guohong ,DENG Lijun ,LIU Kang ,et al. Characteristic of rare earth elements in coal in western margin of Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration ,2016 ,44( 6) : 8-14.
- [52] 聂志宏 巢海燕 ,刘莹 ,等.鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气生产特征及开发对策——以大宁—吉县区块为例 [J].煤炭学报 ,2018 ,43( 6) : 1738-1746.
- NIE Zhihong ,CHAO Haiyan ,LIU Ying ,et al. Development strategy and production characteristics of deep coalbed methane in the east Ordos Basin: taking Daning-Jixian block for example [J]. Journal of China Coal Society ,2018 ,43( 6) : 1738-1746.
- [53] DAI Jinxing ,ZOU Caineng ,DONG Dazhong ,et al. Geochemical characteristics of marine and terrestrial shale gas in China [J]. Marine and Petroleum Geology ,2016 ,76: 444-463.
- [54] ZHANG Mingjie ,TANG Qingyan ,CAO Chunhui ,et al. Molecular and carbon isotopic variation in 3.5 years shale gas production from Longmaxi Formation in Sichuan Basin ,China [J]. Marine and Petroleum Geology ,2018 ,89: 27-37.
- [55] 李剑 ,王晓波 ,侯连华 ,等.四川盆地页岩气地球化学特征及资源潜力 [J].天然气地球科学 ,2021 ,32( 8) : 1093-1106.
- LI Jian ,WANG Xiaobo ,HOU Lianhua ,et al. Geochemical characteristics and resource potential of shale gas in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience ,2021 ,32( 8) : 1093-1106.
- [56] 李艳芳 ,邵德勇 ,吕海刚 ,等.四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系 [J].石油学报 ,2015 ,36( 12) : 1470-1483.
- LI Yanfang ,SHAO Deyong ,LÜ Haigang ,et al. A relationship between

- elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1470-1483.
- [57] 刘江涛, 刘双莲, 李永杰, 等. 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 53-57.  
LIU Jiangtao, LIU Shuanglian, LI Yongjie, et al. Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiba area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(3): 53-57.
- [58] 蒙炳坤, 周世新, 李婧, 等. 上扬子地区不同类型岩石生氦潜力评价及泥页岩氦气开采条件理论计算 [J]. 矿物岩石, 2021, 41(4): 102-113.  
MENG Bingkun, ZHOU Shixin, LI Jing, et al. Helium potential evaluation of different types of rocks in the Upper Yangtze region and theoretical calculation of helium recovery conditions for shale in Upper Yangtze region [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(4): 102-113.
- [59] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质 (下) [M]. 北京: 地质出版社, 2004.  
MA Li, CHEN Huanjiang, GAN Kewen, et al. Tectonic and marine petroleum geology in South China (Part II) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [60] DANABALAN D, GLUYAS J G, MACPHERSON C G, et al. The principles of helium exploration [J]. *Petroleum Geoscience*, 2022, 28(2): petgeo2021-029.
- [61] ZHANG Wen, LI Yuhong, ZHAO Fenghua, et al. Granite is an effective helium source rock: insights from the helium generation and release characteristics in granites from the north Qinling orogen, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2020, 94(1): 114-125.
- [62] 李艳霞, 赵靖舟, 李净红. 鄂尔多斯盆地东部上古生界气藏成藏史 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2011, 47(3): 29-34.  
LI Yanxia, ZHAO Jingzhou, LI Jinghong. Gas accumulation history in Upper Palaeozoic east of Erdos Basin [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(3): 29-34.
- [63] 张文. 关中和柴北缘地区战略性氦气资源成藏机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.  
ZHANG Wen. Accumulation mechanism of helium, a strategic resource in Guanzhong and north Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019.
- [64] WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. Application of noble gas geochemistry to the quantitative study of the accumulation and expulsion of Lower Paleozoic shale gas in southern China [J]. *Applied Geochemistry*, 2022, 146: 105446.
- [65] 仰云峰, 饶丹, 付小东, 等. 柴达木盆地北缘石炭系克鲁克组页岩气形成条件分析 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 692-697.  
YANG Yunfeng, RAO Dan, FU Xiaodong, et al. Generation conditions of shale gas in Carboniferous Keluke Formation, northern Qaidam Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(6): 692-697.
- [66] 于会娟, 妥进才, 刘洛夫, 等. 柴达木盆地东部地区侏罗系烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 132-138.  
YU Huijuan, TUO Jince, LIU Luofu, et al. Geochemical characteristics and evaluation on hydrocarbon generation potentials of source rocks in Jurassic eastern Qaidam Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 132-138.
- [67] 施辉, 李宗星, 杨元元, 等. 柴东欧南凹陷石炭系烃源岩有机质富集的影响因素 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(2): 203-216.  
SHI Hui, LI Zongxing, YANG Yuanyuan, et al. The factors influencing the enrichment of organic matters in the Carboniferous source rocks, Ounan depression, eastern Qaidam Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(2): 203-216.
- [68] GHANIZADEH A, GASPARIK M, AMANN-HILDENBRAND A, et al. Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales: I. Scandinavian alum shale [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 79-99.
- [69] BHANDARI A R, FLEMINGS P B, POLITO P J, et al. Anisotropy and stress dependence of permeability in the Barnett shale [J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 108(2): 393-411.
- [70] SOEDER D J. Porosity and permeability of eastern Devonian gas shale [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3(1): 116-124.
- [71] BUSTIN R M, BUSTIN A M M, CUI X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics [R]. SPE 119892, 2008.
- [72] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景 (一) [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 689-701.
- [73] 肖威, 张兵, 姚永君, 等. 川东二叠系龙潭组页岩岩相特征与沉积环境 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 152-162.  
XIAO Wei, ZHANG Bing, YAO Yongjun, et al. Lithofacies and sedimentary environment of shale of Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 152-162.
- [74] 王鹏威, 刘光祥, 刘忠宝, 等. 川东南—黔西北地区上二叠统龙潭组海陆过渡相页岩气富集条件及主控因素 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(3): 431-440.  
WANG Pengwei, LIU Guangxiang, LIU Zhongbao, et al. Shale gas enrichment conditions and controlling factors of Upper Permian Longtan Formation transitional shale in southeast Sichuan to northwest Guizhou [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(3): 431-440.
- [75] 高乔, 王兴志, 朱逸青, 等. 川南地区龙马溪组元素地球化学特征及有机质富集主控因素 [J]. 岩性油气藏, 2019, 31(4): 72-84.  
GAO Qiao, WANG Xingzhi, ZHU Yiqing, et al. Elemental geochemical characteristics and main controlling factors of organic matter enrichment of Longmaxi Formation in southern Sichuan [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(4): 72-84.
- [76] BYRNE D J, BARRY P H, LAWSON M, et al. Determining gas expulsion vs retention during hydrocarbon generation in the Eagle Ford shale using noble gases [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 241: 240-254.

(下转第 482 页)

- Basin, northern South China Sea [J]. Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 85-92.
- [19] 姜辉.近海断陷湖盆勘探早期沉积特征与成藏条件分析:以北部湾盆地涠西区块为例 [D].北京:中国地质大学,2007.
- JIANG Hui. The analysis on depositional characteristic and play for petroleum and gas in initial stage of exploration in offshore faulted basin: exemplified by Weixi survey, Beibuwan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [20] 欧光习,李林强,孙玉梅.沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践 [J].矿物岩石地球化学通报,2006,25(1):1-11.
- OU Guangxi, LI Linqiang, SUN Yumei. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 1-11.
- [21] 满晓,胡德胜,范彩伟,等.乌石凹陷“背型负花构造”成因及油气富集规律差异性研究 [J].中国海上油气,2021,33(5):32-39.
- MAN Xiao, HU Desheng, FAN Caiwei, et al. Study on the origin of

“antiform negative flower structure” and the difference of oil and gas enrichment law in Wushi sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 32-39.

- [22] 姜占东,范彩伟,黎孝璋,等.基于变网格高阶有限差分的鬼波数值模拟研究 [J].地球物理学进展,2021,36(1):365-373.
- JIANG Zhandong, FAN Caiwei, LI Xiaozhang, et al. Numerical simulation of marine ghost wave based on high order finite difference method with variable grids [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 365-373.
- [23] 姜占东,范彩伟,黎孝璋,等.多道奇异谱分析压制强振幅窄带随机噪声研究 [J].地球物理学进展,2021,36(2):730-735.
- JIANG Zhandong, FAN Caiwei, LI Xiaozhang, et al. Study on suppressing strong amplitude narrow band random noise based on multi-channel singular spectrum analysis [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 730-735.

(收稿日期 2024-09-23 改回日期 2024-11-28 编辑 雷永良)

(上接第 455 页)

- [77] 刘文汇,徐永昌.天然气中氦氩同位素组成的意义 [J].科学通报,1993,38(9):818-821.
- LIU Wenhui, XU Yongchang. Significance of helium argon isotope composition in natural gas [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(9): 818-821.
- [78] CAO Chunhui, ZHANG Mingjie, TANG Qingyan, et al. Noble gas isotopic variations and geological implication of Longmaxi shale gas in Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89: 38-46.
- [79] GÖYRE D, PUJOL M, GILFILLAN S M V, et al. Noble gases constrain the origin, age and fate of CO<sub>2</sub> in the Vaca Muerta shale in the Neuquén Basin (Argentina) [J]. Chemical Geology, 2021, 577: 120294.
- [80] 腾格尔,陶成,胡广,等.排烃效率对页岩气形成与富集的影响 [J].石油实验地质,2020,42(3):325-334.
- BORJIGIN T, TAO Cheng, HU Guang, et al. Effect of hydrocarbon expulsion efficiency on shale gas formation and enrichment [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 325-334.
- [81] 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.
- [82] YOU Bing, CHEN Jianfa, LIU Xiaoqiang. Molecular competitive adsorption mechanism of methane and helium in illite of shale gas reservoirs through molecular simulation [C] // Proceedings of the Goldschmidt 2023 Conference. Lyon, 2023.
- [83] 孙赞东,贾承造,李相方.非常规油气勘探与开发 [M].北京:石油工业出版社,2011.
- SUN Zandong, JIA Chengzao, LI Xiangfang. Unconventional oil & gas exploration and development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [84] TAO Mingxin, SHI Baoguang, LI Jinying, et al. Secondary biological

coalbed gas in the Xinji area, Anhui Province, China: evidence from the geochemical features and secondary changes [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2/3): 358-370.

- [85] 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.
- [86] 王香增,高胜利,鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征 [J].石油勘探与开发,2014,41(3):294-304.
- WANG Xiangzeng, GAO Shengli, GAO Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.
- [87] 赵文智,李建忠,杨涛,等.中国南方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.
- [88] 董大忠,高世葵,黄金亮,等.论四川盆地页岩气资源勘探开发前景 [J].天然气工业,2014,34(12):1-15.
- DONG Dazhong, GAO Shikui, HUANG Jinliang, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1-15.
- [89] 邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展 [J].地质学报,2015,89(6):979-1007.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.

(收稿日期 2024-05-28 改回日期 2024-09-09 编辑 雷永良)