

氦气资源的分类、特征及富集主控因素分析

陈新军^{1,2}, 丁一³, 易晶晶³, 陈刚^{1,2}

1. 中国石化 深部地质与资源重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 武汉 430223

摘要:我国氦气供应量不足, 根本原因是氦气资源相对贫乏。加强对富氦天然气的分类研究, 明确不同类型氦气藏的特征及富集主控因素, 对促进我国氦气勘探开发研究和保障我国用氦安全都具有重要意义。通过研究氦气的成因, 同时考虑氦气资源丰度禀赋, 铀、钍放射性元素所处空间层位, 载体气藏类型, 以及成藏主控因素的差别, 对含氦气藏进行了细致划分。氦气藏总体分为两类: 壳幔混合型和壳源型, 壳源型又可细分为壳源远源型(包括烃类伴生型和水溶气型)和壳源近源型(页岩气型), 不同类型氦气资源特征大相径庭。从国内目前发现的氦气藏来看, 只有与烃类气藏共同成藏的壳源氦才具有工业利用价值, 尽管其资源品位相对较低, 但资源潜力较大。壳源远源型和壳源近源型氦气藏富集主控因素大致相同, 但在氦源岩和运移通道上存在差异。

关键词:壳幔混合型; 壳源型; 氦气; 富氦天然气; 中国

中图分类号: TE132.5

文献标识码: A

Classified characteristics of helium gas resources and controlling factors for the enrichment

CHEN Xinjun^{1,2}, DING Yi³, YI Jingjing³, CHEN Gang^{1,2}

1. SINOPEC Key Laboratory of Geology and Resources in Deep Stratum, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Jianghan Oilfield Branch Company, Wuhan, Hubei 430223, China

Abstract: The lack of helium resources accounts for the limited helium supply in China. It is of great significance to classify of helium-enriched natural gas according to the characteristics of helium reservoirs and the main controlling factors of helium enrichment, thus the exploration and development of helium can be promoted and the safety of helium use in China may be ensured. Based on the origin of helium, this paper classifies the helium reservoirs by the consideration of the abundance of helium resources, the spatial horizon of uranium and thorium radioactive elements, the types of carrier gas reservoirs, and the main controlling factors of helium accumulation. The helium gas resources can be characterized into two types: crust-mantle mixed type and crust-source type. Crust-source type can be further classified into crust-source far-source type (including hydrocarbon associated type and water-soluble gas type) and crust-source near-source type (shale gas type) with different characteristics. In terms of helium reservoirs discovered in China, only crust-source helium which was formed together with hydrocarbon gas reservoirs has industrial utilization value due to the great resource potential, although its resource grade is relatively low. The main controlling factors of helium accumulation in the crust-source far-source type and crust-source near-source type are roughly the same, but there are differences in helium sources and migration pathways.

Key words: crust-mantle mixed type; crust-source type; helium gas; helium-rich natural gas; China

氦气因其特殊的物理化学性质, 在临床医学、国防军工、航天、核工业、深海潜水、低温科学等高科技领域都有广泛应用。由于氦气的稀缺性以及国防军工和高科技产业发展不可替代的作用, 氦

气已成为一种重要战略资源^[1-2]。世界上所发现的天然气中, 氦气含量最高可达 8% 左右, 但大多数含量低于 2%。尽管如此, 氦含量较高(一般大于 0.05%) 的天然气仍是工业氦气的唯一来源。我

国氦气资源相对较贫乏,所需氦气资源长期依赖进口,对外依存度超过 98%,且需求量逐年增长。2015—2019 年间氦气进口量更是逐年递增,平均增速在 14% 以上,2020 年受疫情影响略微下降,进口来源地主要为卡塔尔(53%)、美国(33%)、澳大利亚(13%)。随着国内经济恢复及高科技产业快速发展,预计 2025 年氦气需求达到 $3\ 200 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。近年来,美国、欧盟均将氦气列为关键性矿产或原材料之一,加强出口限制,氦气已成为我国十分紧缺的“卡脖子”战略稀缺资源。我国氦气供应量不足,根本原因是氦气资源相对贫乏,同时受到技术、经济、管理机制等多方面因素制约。因此加强对富氦天然气分类研究,明确不同类型氦气藏的特征及富集主控因素,对促进我国氦气勘探开发研究和保障我国用氦安全都具有重要意义。

1 中国氦气资源概况

多年来的勘探和研究证实,我国东部的松辽、海拉尔、渤海湾、苏北、三水盆地,以及中西部的四川、鄂尔多斯、渭河、柴达木、塔里木、准噶尔等 11 个盆地都有氦含量大于 0.1% (工业品位) 的天然气发现^[3-16],主要赋存于油气田产出的天然气中,在渭河盆地则赋存于地热水溶气中。中国含氦天然气的赋存层位跨度大,从元古宇到新生界均有分布。东部地区富氦层系主要为白垩系和第三系,在松辽盆地北部还有少量赋存于侏罗系中,在苏北盆地有部分赋存于二叠系中。中部鄂尔多斯盆地主要赋存于二叠系中;渭河盆地含氦的地热水溶气主要赋存于古近系—新近系中。西部地区富氦天然气的赋存层位跨度大,四川盆地的威远气田震旦系是我国最老的氦气赋存层位,另外在志留系、石炭系、二叠系、侏罗系都有含氦天然气检出;柴达木盆地在石炭系、三叠系和古近系—新近系有富氦天然气显示;塔里木盆地富氦天然气主要发育在石炭系,奥陶系次之;准噶尔盆地氦气主要发现于侏罗系中。据“十三五”氦气资源评价成果以及国内三大油公司统计上报的数据,中国氦气资源潜力约为 $50 \times 10^8\ \text{m}^3$,显示出较好的资源前景。氦气含量超过 0.1%,且资源潜力较大的均是与烃类气藏相伴生的氦气,多分布于中西部的鄂尔多斯、塔里木、柴达木盆地,少量分布于东部的松辽盆地。除此之外,还发现了一批氦气含量介于 0.01%~0.10% 之间,但资源潜力较大的气田,如苏里格气田、涪陵页岩气田、靖边气田等,尽管氦气含量未达到工业品位,但未来随着技术的进步,也具有一定开发利用

的潜力。

总体看来,中国氦气资源禀赋不佳,探明程度也很低。早期,我国发现了几个氦气含量相对较高的气田,仅四川盆地威远气田是唯一实现氦气工业化开发的气田,氦含量一般在 0.1%~0.342%,平均约为 0.2%;部分气田如黄桥气田氦含量虽然较高(1.1%~1.4%),但气田整体规模较小,氦气储量也较少,开发价值有限^[8]。近年来,我国发现了多个氦含量相对较高、规模较大的气田,如塔里木盆地和田河气田,氦含量为 0.30%~0.37%,平均 0.32%,折算氦气探明储量 $1.959 \times 10^8\ \text{m}^3$ ^[12];鄂尔多斯盆地东胜气田,氦气平均含量约为 0.15%,以此估算氦气储量也近 $2 \times 10^8\ \text{m}^3$ ^[16]。这 2 个大型富氦气田都在规划建设提氦装置,预计未来 2~3 年将建成投产,为保障我国未来氦气资源供应奠定了良好的基础。

2 氦气资源分类及特征

前人研究证实,自然界中存在的氦是基于不同成因来源的氦混合而成的,有大气氦、幔源氦与壳源氦 3 种。由于氦有 2 个稳定同位素,³He 为原始成因的氦,含量较少;⁴He 为放射性成因的氦,含量相对较多,因此,通常使用氦的稳定同位素³He 和⁴He 的比值来判定氦气来源,即用 $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 来表示^[17]。其中,大气氦普遍存在于空气中,因浓度较低而无工业意义,其 R 值较高,典型值为 1.4×10^{-6} ,用 R_a 表示;幔源氦是幔源岩浆成因的氦气, R 值高,典型值为 1.1×10^{-5} ;壳源氦是由主要来源于古老的变质岩、混合岩、花岗岩中铀、钍放射性元素 α 衰变而成的, R 值较低,典型值为 2.0×10^{-8} 。

当 $R/R_a > 1$ 时,表示气样中幔源氦份额大于 12%;当 $R/R_a > 0.1$ 时,表示气样中幔源氦份额大于 1.2%;当 $R/R_a < 0.1$ 时,可以认为气样中的氦基本都来自壳源^[18]。基于此,目前国内都把发现的天然气中的氦简单分成两类:即壳幔混合型和壳源型。壳幔混合型氦气由岩浆脱气产生的氦气和放射性元素衰变产生的氦气混合而成,一般来说幔源氦份额都大于 12%;壳源型氦气基本由放射性元素衰变而成,几乎不含有幔源氦或混有少量的幔源氦,幔源氦一般不足 2%,只有极个别达到 7%~8%。

本文对这种广谱分类进行了继承和发展。本次分类以氦气的成因为基础,同时考虑氦气资源丰度禀赋,铀、钍放射性元素所处空间层位,载体气藏类型,以及成藏主控因素的差别,将含氦气藏进行了细致划分。总体分为两类:壳幔混合型和壳源型,壳源型还可细分为壳源远源型(包括烃类伴生

型和水溶气型)和壳源近源型(页岩气型)(表 1)。一般来说,壳幔混合型为高品位型,氦含量一般在工业品位之上;壳源型除水溶气型之外,均为中低品位型,氦含量一般不超过工业品位,仅少数几个氦含量超过工业品位、具有一定商业开发价值的氦气藏。此外,不同类型氦气藏,其成藏主控因素也有显著差别。

2.1 壳幔混合型氦气藏

2.1.1 多与非烃气藏相伴生

从分布区域看,壳幔混合型氦气,主要分布于东部的郯庐断裂带两侧的含油气盆地,如海拉尔、松辽、渤海湾、苏北、三水等盆地。目前在中国石化油气探区内发现的氦含量较高的天然气藏主要集中于东部地区,自北向南主要有松南万金塔气田、济阳花沟气田、苏北黄桥气田以及三水盆地二氧化碳气田等。研究发现,壳幔混合型氦气多是与非烃类气藏的伴生,且多与二氧化碳气藏相伴生,幔源氦含量较高,基本都在 40% 以上。松南万金塔二氧化碳气田伴生的氦气,幔源氦平均含量为 62.5%;济阳花沟地区与二氧化碳伴生的氦气,幔源氦含量在 50% 以上;苏北黄桥气田、三水盆地也是与二氧化碳气藏相伴生,幔源氦含量以 40% ~

50% 为主^[5-7],个别井可达 60% 以上(图 1)。此类气藏一般沿郯庐断裂带分布,发育于东部断陷盆地,分布于深大断裂附近,幔源气沿深大断裂逐步向上运移,并在适合的圈闭富集成藏。

2.1.2 资源品位高、资源潜力较小

测试分析数据表明,壳幔混合型氦气资源品位一般相对较高,基本都在工业品位(0.1%)之上,最高甚至能达到 5.1% (花沟地区),但由于天然气藏整体规模较小,故氦气资源潜力有限。如松南万金塔氦气含量平均为 0.104%,氦气资源量却只有 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$;济阳花沟氦气含量高达 2.08%~5.11%,氦气资源量只约为 $(0.2 \sim 0.5) \times 10^8 \text{ m}^3$;苏北溪桥气田氦气含量高达 1.1%~1.4%,氦气资源量只约为 $0.02 \times 10^8 \text{ m}^3$;三水盆地氦气含量多在 0.11%~0.30% 之间,氦气资源量因太少而没有具体统计。由此看来,尽管壳幔混合型氦气资源品位非常高,有的甚至高出工业品位数十倍,但其资源潜力因受非烃气藏规模限制而较小,以目前经济技术条件来看,其开发利用潜力有限。

2.2 壳源型氦气藏

壳源型氦气富集区主要发育于中西部地区和松辽盆地南部部分气田,如鄂尔多斯、渭河、四川、

表 1 氦气资源分类及示例

Table 1 Helium resource classification and samples

项目	壳幔混合型	壳源型	
		壳源远源型	壳源近源型
R/Ra	>1	<1	<1
气藏特征	非烃气体伴生氦气	烃类气体伴生氦气	页岩气伴生氦气
氦含量及特征	氦含量相对较高	氦含量较低且分布不均	氦含量低且分布均匀
示例	黄桥气田:氦含量 1.1%~1.4%, R/Ra 为 2.6~3.2;万金塔气田:氦含量平均 0.104%, R/Ra 最高为 5.14;花沟地区:氦含量 0.08%~5.11%, R/Ra 为 3.1~3.2;三水盆地:氦含量 0.1%~0.3%, R/Ra 为 1.2~4.6	威远气田:氦含量平均 0.2%, R/Ra 为 0.01~0.02;东胜气田:氦含量 0.14%, R/Ra 为 0.01~0.02;等等 特例:水溶气伴生氦气,氦含量相对较高。渭河盆地水溶氦气,氦含量 0.1%~4.1%, R/Ra 为 1.2~4.6	涪陵页岩气田:氦含量 0.044%, R/Ra 为 0.004~0.03;永川页岩气田:氦含量 0.041%, R/Ra 为 0.003;威荣页岩气田:氦含量 0.030%, R/Ra 为 0.002~0.03;等等

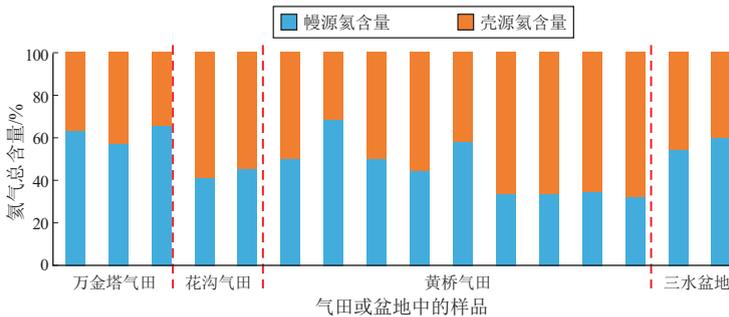


图 1 中国石化东部油气区壳幔混合源型氦气中的幔源、壳源氦含量

Fig.1 Contents of mantle- and crust-derived helium in crust-mantle mixed helium gas, eastern oil and gas fields of SINOPEC

塔里木等盆地,主要是与烃类气藏相伴生的氦气和水溶型氦气。目前在中国石化油气探区内发现的主要有塔里木盆地雅克拉、亚松迪和巴什托气田等,鄂尔多斯盆地东胜气田、渭河盆地水溶氦气、四川盆地涪陵页岩气田,以及松辽南部松南、长岭气田等。该类氦气以典型壳源成因为主,只混有少量甚至微量的幔源氦。如渭河盆地水溶气中的氦气,其幔源氦含量一般不足 1%,个别数据较大为 7%左右;塔里木盆地、松辽盆地南部伏龙泉、长岭、松南等气田幔源氦含量在 1%左右;四川盆地和东胜气田幔源氦含量极低,几乎可以忽略不计(图 2)。壳源型氦气又可以依据铀、钍放射性元素赋存的位置及与氦气藏的空间分布关系以及成藏主控因素,细分为壳源远源型和壳源近源型。

2.2.1 壳源远源型

壳源远源型氦气主要来源于基底古老的变质岩、混合岩、花岗岩及下伏地层火山岩中铀、钍放射性元素的衰变,产生的氦气大部分扩散到孔隙水中,随后沿深大断裂向上运移,氦气在孔隙水中的浓度随铀、钍含量的增高而增高,当富含溶解氦的孔隙水与天然气相遇并相互作用,最终脱水分解成气体,随载体气一起运移至储层适宜部位富集成藏。此类型氦气依据赋存的天然气载体不同,可以分为烃类气藏伴生氦气和水溶气伴生氦气。

(1) 烃类气藏伴生氦气,资源品位相对较低,分布不均,但资源潜力较大。测试分析数据表明,与壳幔混合型氦气相比,与烃类气藏相伴生的壳源远源型氦气资源品位相对较低,氦含量普遍小于工业品位(0.1%),只有少数几个气田含量相对较高,且氦气含量分布也不均匀。但因该类氦气分布范围相对较广,烃类载体气量丰富,故氦气资源潜力往往也较大,特别是少数几个气藏中氦气含量一旦超过工业品位(0.1%),一般都具有良好的工业开发前景。

例如四川威远气田平均氦含量在 0.2%左右,折算氦气储量约 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,是我国首个也是目前唯一实现氦气工业化开发的气田;塔里木盆地和田河气田石炭系生屑灰岩段氦气含量为 0.30%~0.37%(平均 0.32%),折算氦气探明储量 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,为我国发现的首个特大型富氦气田^[11];鄂尔多斯盆地东胜气田伴生氦气,据 2016—2018 年中国石化华北油气分公司提供的测试数据,氦含量为 0.045%~0.487%,其中 70%以上的样品氦的含量达到 0.1%的工业品位之上,平均为 0.157%(图 3),折算探明地质储量约为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16],为一个特大型含氦—富氦气田,有望建成新的大型氦气资源基地。

(2) 水溶气伴生氦气,资源品位高,资源潜力大,但产气量较小。目前国内发现的水溶型氦气主要集中于渭河盆地的地热井中,氦气显示十分丰富^[19-20]。渭河盆地的水溶型氦气虽然是壳源型,但在资源品位方面,却与壳幔混合型氦气类似,其含量相对较高。20 世纪 70 年代,渭深 13 井新近系钻遇良好的天然气显示,氦气含量为 2%~4%。2012 年中国石化华北分公司第一口氦气预探井——渭新 1 井检测结果表明,氦气含量均超过 0.1%的氦气工业标准,最高可达 5%,其中达到富氦标准(0.7%)的样品占总检测井次的 68%,反映

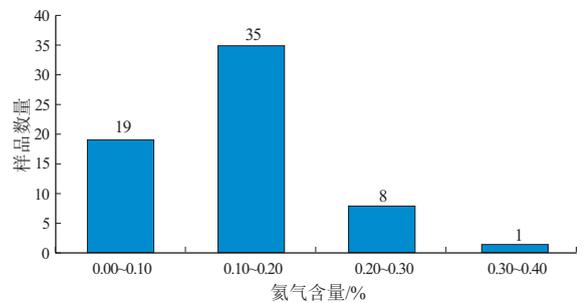


图 3 鄂尔多斯盆地东胜气田氦含量分布

Fig.3 Helium content in Dongsheng gas field, Ordos Basin

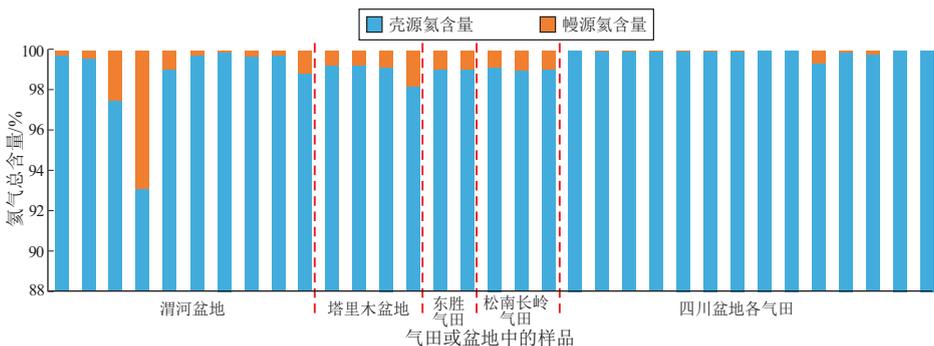


图 2 中国石化油气区壳源型氦气中的幔源氦含量

Fig.2 Contents of mantle-derived helium in crust-source helium gas, oil and gas fields of SINOPEC

出该盆地富氦程度相当高。近年来,盆地内西安、咸阳、渭南等地钻探的地热井中,也多发现地热水伴生的富氦天然气,以水溶态产出,从收集到的 30 口地热井的资料显示,氦气含量分布在 0.1%~4.942%之间,平均 0.99%,这一数值在国内目前发现的氦气含量中是非常高的。张雪等^[3]基于放射性衰变原理计算渭河盆地氦气资源量为 $6.6 \times 10^8 \text{ m}^3$; 而张文等^[8,20]根据地热富氦情况计算的资源量为 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$, 尽管二者数据有很大差别,但都显示渭河盆地氦气资源潜力巨大,勘探前景良好。但目前发现的地热井的产气量都比较小,因此在渭河盆地进行氦气的商业开发还存在一定的难度,除非发现一定规模的天然气田。

2.2.2 壳源近源型(页岩气型)

壳源近源型氦气主要来源于富有机质泥页岩中吸附的放射性铀元素的衰变,与页岩气类似,相当于自生自储型,氦气伴生于页岩气藏中。其典型特征表现为氦气含量相对较低,但分布较均匀,且资源潜力较大,目前发现最典型的是涪陵页岩气田的伴生氦气。

涪陵页岩气田 45 个气样测试分析显示,该区天然气中普遍含氦,氦含量介于 0.034%~0.073%之间,其中 80%的数据处于 0.034%~0.05%,只有个别数据大于 0.05%,表明该地区氦气分布非常均匀、稳定(图 4)。该区氦气主要来源于富有机质页岩吸附的铀元素 α 衰变。龙马溪组沉积初期处于一种闭塞、半闭塞、缺氧的滞留海盆还原环境,在深水陆棚相沉积发育了一套富有机质、富铀及磷酸钙的黑色碳质页岩,其底部页岩的铀含量在 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$, 普遍具有高伽马值($>150 \text{ API}$)、高放射性的特征(图 5)。因此,该套页岩不仅是页岩气勘探的重要目的层段,还是良好的氦气源岩。尽管该区氦含量较低,但由于页岩气量较大,使得氦气资源规模也十分可观,估算氦气地质储量约 $2.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。相信随着技术的进步,在不久的将来,这种低品位、大规模的氦气资源也将得到开发利用。

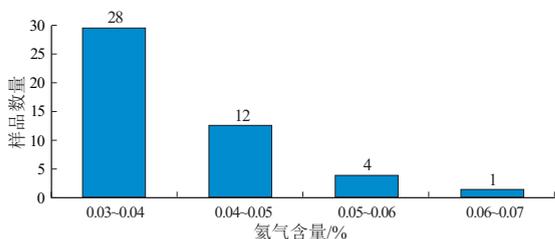


图 4 四川盆地涪陵页岩气田氦气含量分布
Fig.4 Helium content of Fuling shale gas field, Sichuan Basin

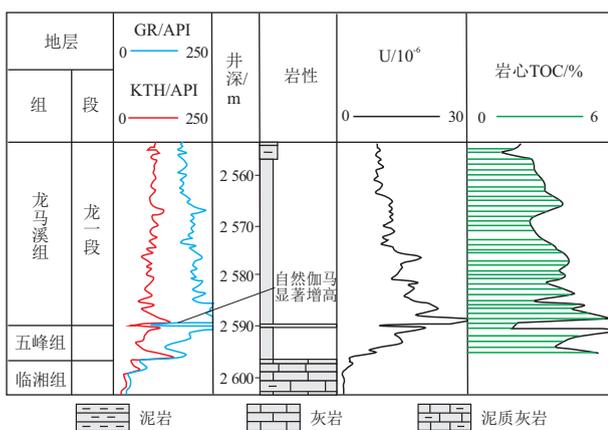


图 5 四川盆地涪陵页岩气田焦 1 井龙马溪组一段测井曲线特征

Fig.5 Logging curves of first member of Silurian Longmaxi Formation in well Jiao 1, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

3 氦气富集主控因素

氦气是一种稀有资源,因其量少、扩散性强,在地层中无法独立成藏。从国内目前发现的氦气藏来看,只有与烃类气藏共同成藏的壳源氦才有工业利用价值,而非烃类气藏伴生的幔源氦和水溶氦,因资源规模限制了它的工业价值。因此,壳源远源型和壳源近源型这两类氦气藏是研究的重点。下面以这两类气藏为例,分析氦气富集主控因素及其差别。

3.1 充足的氦源岩

壳源氦是由铀、钍放射性元素 α 衰变而成,因此壳源型氦气藏必须要有大量充足的富含铀、钍等放射性元素的源岩,但壳源远源型和壳源近源型氦气藏的氦源岩有所不同。

壳源远源型氦源岩主要是变质岩、混合岩、花岗岩及火山岩等。李玉宏等^[20]研究认为,北秦岭地区(渭河盆地东南部)广泛发育的富铀花岗岩年龄(120 Ma)与²³⁵U 半衰期相当,应是渭河盆地内富氦天然气藏的主要氦源岩。李子颖等^[21]研究显示,华北板块是一富铀古老地质体,鄂尔多斯盆地北部大桦背岩体铀含量 5.52×10^{-6} , 局部铀含量高达 26×10^{-6} , 均表明该区基底岩石富铀。近年来在鄂尔多斯盆地北缘发现了皂火壕、纳岭沟、大营、东胜等一系列大型—特大型砂岩型铀矿床,也从侧面说明了该区具有丰富的铀源^[22-24]。因此,东胜气田氦气主要来源于基底的太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系中铀元素的衰变。

壳源近源型氦源岩主要为泥页岩。BROWN^[25]研究认为,普通页岩与花岗岩释放氦气

的速率和潜力几乎一样,但吸附了大量铀元素的富有机质页岩具有最大的生氦速率和潜力,其产生氦气的速率比普通页岩或花岗岩约高 8 倍。因此,涪陵页岩气田氦源岩主要为有机质含量非常高的五峰组—龙马溪组页岩,尤其是龙马溪组页岩底部丰富的有机质吸附了大量的铀元素,具有高伽马值(>200 API)特征,铀的含量最高超过了 30×10^{-6} ,这些丰富的铀元素在漫长的地质历史中慢慢衰变,并源源不断地释放出氦气。

3.2 有效的运移通道

烃类载体和壳源远源型氦气由深部运移至浅层成藏需要有效的断裂、不整合面等运移通道。研究认为断裂对于氦气富集成藏而言,作用不仅限于运移通道,很可能也是氦气释放、富集的重要因素之一。在活跃的构造背景下,盆地内部地质应力不断改变,从而不断地释放氦气,形成局部富集区,断穿基底的通源断裂能够沟通深部氦气源,使氦气沿断裂向上运移,且不断在合适的地方富集保存起来。四川盆地威远构造为一巨型穹隆背斜,沟通基底的断裂和裂缝是氦气的高效运移通道,背斜的存在有利于氦气从水溶态进入气相,并在背斜高部位圈闭富集。渭河盆地南部边缘通源断裂分布区、盆地凹陷南部断块发育区以及局部构造发育的区域,都是氦气成藏的有利位置,深大断裂为地热水与氦气提供了运移通道。鄂尔多斯盆地东胜气田氦气藏,来源于基底变质岩—花岗岩系的氦气以泊尔江海子等深大断裂为运移通道向上运移至天然气储层中,并随着烃类气体运移至适宜部位富集,深大断裂不但有效沟通了基底氦源岩、烃源岩和储集层,还控制了氦气在纵向多套储集层中的富集

(图 6)。至于壳源近源型,因氦源岩与气藏几乎是混为一体的,类似页岩气自生自储,因此放射性元素衰变而成的氦气则不需要运移通道,而是溶入页岩气当中,并扩散到适宜的部位富集。

3.3 良好的保存条件

氦气分子半径很小,仅为 0.26 nm(甲烷半径为 0.42 nm),不易与其他物质发生化学变化,具有较强的扩散和穿透能力,容易发生逸散,氦气富集成藏较烃类对保存条件要求更加苛刻,因此,壳源型氦气藏需要优质、厚层的膏盐岩、泥岩进行封存,确保烃类及氦气不扩散、逸失。塔里木盆地中石化探区已发现的高含氦气藏——雅克拉和巴什托凝析气藏,均发育有 80~150 m 的膏盐岩作为良好盖层。前人曾经对塔北吉拉克和桑塔木油田三叠系油气藏做过氦气含量检测,结果显示氦气含量低于 0.1%,未达到工业开采标准,但是该区地表氦气含量却显示有超标现象,推断该区可能是因为盖层保存条件不好,发生了氦气逸散现象。塔北三叠系油气藏目的层为中三叠统阿克库勒组,其盖层为上覆泥岩段,厚度为 20~30 m,与巴什托、雅克拉等高含氦气藏无论盖层厚度还是岩性上都有不少的差距。对于涪陵页岩气田而言,该地区五峰组—龙马溪组页岩气层顶底板厚度大,区域展布稳定,岩性致密,突破压力大(在 80 °C 条件下高达 64.5~70.4 MPa),封隔性好^[26-28],因此,致密的顶底板和高顶板突破压力能有效阻止烃类和氦气散失,对气体的聚集起到重要作用。

3.4 适度的烃类气体

壳源氦的生成量与烃类气体的生成量相比微不足道,烃类气体既是壳源氦的载体气又是稀释

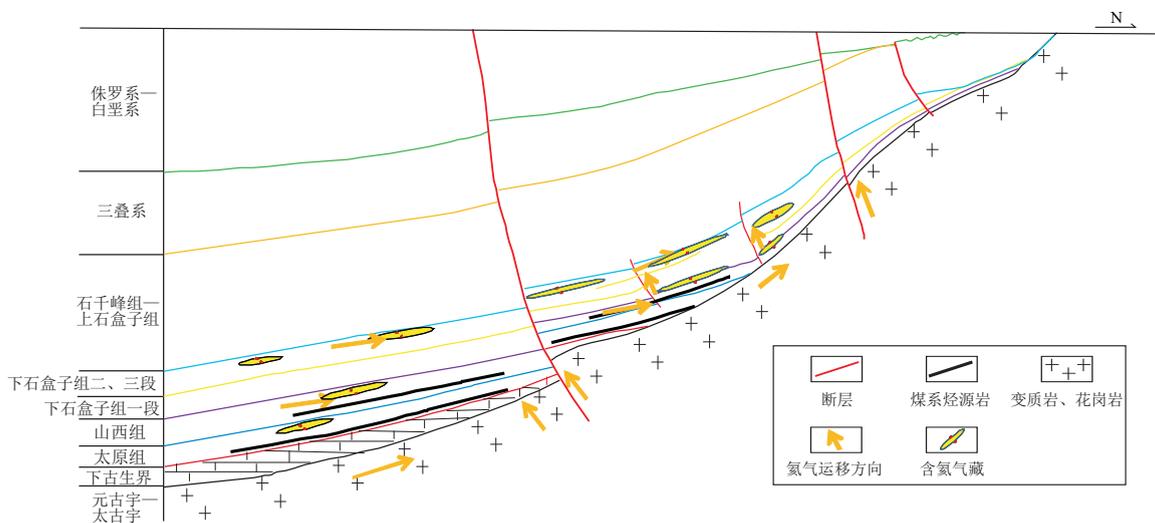


图 6 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气成藏模式

Fig.6 Helium accumulation model of Dongsheng gas field, Ordos Basin

气,超大量的烃类气体会降低氦气的品位和工业价值,复合气藏中烃类气体总量还不能太大,要确保氦气浓度至少要达到边界品位,因此氦气要与适量的烃类气体复合成藏,才具有一定的工业价值。例如,涪陵地区龙马溪组底部热页岩中有机碳含量非常高,原始生烃条件非常优越,其生烃强度非常大,远远超过热页岩中自身铀元素衰变产生的氦气量,由于大量原生页岩气的稀释,造成该区氦气含量不能达到工业品位,平均只有 0.045%。但随着技术的进步和氦气价格的高涨,氦气的工业品位可能会不断降低,当前不能经济开发利用的氦气藏,未来可能会实现经济开发。

4 结论

(1)以氦气的成因为基础,同时考虑氦气资源丰度禀赋,铀、钍放射性元素所处空间层位,载体气藏类型以及成藏主控因素的差别,将含氦气藏划分为壳幔混合型和壳源型。壳源型还可细分为壳源远源型(包括烃类伴生型和水溶气型)和壳源近源型(页岩气型)。

(2)不同类型氦气资源特征有显著差别。壳幔混合型多与非烃气藏相伴生,氦气资源品位较高,但资源潜力却较小。与烃类气藏伴生的壳源远源型氦气,资源品位相对较低,分布不均,但资源潜力较大;水溶气型壳源远源型氦气,资源品位高,资源潜力大,但产气量较小。壳源近源型氦气含量相对较低,但分布较均匀,资源潜力较大。

(3)从国内目前发现的氦气藏来看,只有与烃类气体伴生的壳源型氦气藏才具有工业开发利用价值;而非烃气体伴生的幔源氦气和水溶氦气,因资源规模限制了它的工业价值。壳源远源型和壳源近源型的富集主控因素虽大致相同,但也存在差异:壳源远源型氦源岩主要是变质岩、混合岩、花岗岩及火山岩等,壳源近源型氦源岩主要为泥页岩;壳源远源型需有效的运移通道,壳源近源型则不需要。

参考文献:

[1] 陈新军.典型富氦区资源特征及开发利用前景分析:以中国石化油气矿业权区为例[J].中国国土资源经济,2021,34(4):84-88.
CHEN Xinjun. Analysis of resource characteristics and exploitation foreground of typical helium rich areas;a case study of SINOPEC's oil and gas mining right area[J].Natural Resource Economics of China,2021,34(4):84-88.

[2] 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.

- [3] 张雪,刘建朝,李荣西,等.中国富氦天然气资源研究现状与进展[J].地质通报,2018,37(2/3):476-486.
ZHANG Xue,LIU Jianchao,LI Rongxi,et al.President situation and progress in the study of helium gas resources in China[J].Geological Bulletin of China,2018,37(2/3):476-486.
- [4] 冯子辉,霍秋立,王雪.松辽盆地北部氦气成藏特征研究[J].天然气工业,2001,21(5):27-30.
FENG Zihui,HUO Qiuli,WANG Xue.A study of helium reservoir formation characteristic in the north part of Songliao Basin[J].Natural Gas Industry,2001,21(5):27-30.
- [5] 曹忠祥,车燕,李军亮,等.济阳坳陷花沟地区高含 He 气藏成藏分析[J].石油实验地质,2001,23(4):395-399.
CAO Zhongxiang,CHE Yan,LI Junliang,et al.Accumulation analysis on a helium-enriched gas reservoir in Huagou area, the Jiyang Depression[J].Petroleum Geology & Experiment,2001,23(4):395-399.
- [6] 任以发.黄桥二氧化碳气田成藏特征与进一步勘探方向[J].天然气地球科学,2005,16(5):632-636.
REN Yifa.The becoming store character and exploration object about carbon dioxide gas field in Huangqiao[J].Natural Gas Geoscience,2005,16(5):632-636.
- [7] 叶先涛.江苏溪桥地区氦气藏天然气富集规律及资源前景[J].江苏地质,2003,27(4):207-210.
YE Xiantao.Enrichment and resource foreground of helium natural gas in Xiqiao area,Jiangsu province[J].Jiangsu Geology,2003,27(4):207-210.
- [8] 张文,李玉宏,王利,等.渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J].天然气地球科学,2018,29(2):236-244.
ZHANG Wen,LI Yuhong,WANG Li,et al.The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J].Natural Gas Geoscience,2018,29(2):236-244.
- [9] 余琪祥,史政,王登高,等.塔里木盆地西北部氦气富集特征与成藏条件分析[J].西北地质,2013,46(4):215-222.
YU Qixiang,SHI Zheng,WANG Denggao,et al.Analysis on helium enrichment characteristics and reservoir forming conditions in northwest Tarim Basin[J].Northwestern Geology,2013,46(4):215-222.
- [10] 张晓宝,周飞,曹占元,等.柴达木盆地东坪氨工业气田发现及氦气来源和勘探前景[J].天然气地球科学,2020,31(11):1585-1592.
ZHANG Xiaobao,ZHOU Fei,CAO Zhanyuan,et al.Finding of the Dongping economic Helium gas field in the Qaidam Basin, and helium source and exploration prospect[J].Natural Gas Geoscience,2020,31(11):1585-1592.
- [11] 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.
- [12] 王江, 张宏, 林东成. 海拉尔盆地乌尔逊含氦 CO₂ 气藏勘探前景 [J]. *天然气工业*, 2002, 22(4): 109–111.
WANG Jiang, ZHANG Hong, LIN Dongcheng. Exploration prospect of helium CO₂ gas reservoir in Urxun, Hailaer Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(4): 109–111.
- [13] 杨长清, 姚俊祥. 三水盆地二氧化碳气成藏模式 [J]. *天然气工业*, 2004, 24(2): 36–39.
YANG Changqing, YAO Junxiang. Modes of CO₂ gas reservoir formation in Sanshui Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(2): 36–39.
- [14] 韩伟, 刘文进, 李玉宏, 等. 柴达木盆地北缘稀有气体同位素特征及氦气富集主控因素 [J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(3): 385–392.
HAN Wei, LIU Wenjin, LI Yuhong, et al. Characteristics of rare gas isotopes and main controlling factors of radon enrichment in the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(3): 385–392.
- [15] 卢进才, 魏仙祥, 李玉宏, 等. 汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探 [J]. *西北地质*, 2005, 38(3): 82–86.
LU Jincai, WEI Xianyang, LI Yuhong, et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas [J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(3): 82–86.
- [16] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 1–10.
HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 1–10.
- [17] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布 [J]. *科学通报*, 1994, 39(16): 1505–1508.
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Distribution of the helium isotopes in natural gases from oil-gas-bearing basins in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(22): 1905–1911.
- [18] 徐永昌. 天然气中的幔源稀有气体 [J]. *地学前缘*, 1996, 3(3/4): 63–71.
XU Yongchang. The mantle noble gas of natural gases [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3/4): 63–71.
- [19] 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(S1): 47–53.
LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Distribution of the helium-rich wells and helium derivation in Weihe Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(S1): 47–53.
- [20] 李玉宏, 周俊林, 张文, 等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景 [M]. 北京: 地质出版社, 2018: 6–10.
LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. The conditions of hydrocarbon accumulation and resource prospects in the Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 6–10.
- [21] 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式 [J]. *铀矿地质*, 2009, 25(2): 65–70.
LI Ziyang, FANG Xiheng, CHEN Anping, et al. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the northeastern Ordos Basin [J]. *Uranium Geology*, 2009, 25(2): 65–70.
- [22] 陈新军. 鄂尔多斯盆地南部 X 探区砂岩型铀成矿地质条件及成矿机理分析 [J]. *世界核地质科学*, 2021, 38(1): 57–65.
CHEN Xinjun. Geological condition and metallogenic mechanism of sandstone type uranium deposit in X exploration area, southern Ordos Basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2021, 38(1): 57–65.
- [23] 吴柏林, 张婉莹, 宋子升, 等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿物地质地球化学特征及其成因意义 [J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3393–3407.
WU Bailin, ZHANG Wanying, SONG Zisheng, et al. Geological and geochemical characteristics of uranium minerals in the sandstone-type uranium deposits in the north of Ordos Basin and their genetic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3393–3407.
- [24] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应 [J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617–638.
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617–638.
- [25] BROWN A A. Formation of high helium gases: a guide for explorationists [C]//2010 AAPG Conference. New Orleans, LA, USA: AAPG, 2010: 11–14.
- [26] 郭旭升, 赵永强, 张文涛, 等. 四川盆地元坝地区千佛崖组页岩油气富集特征与主控因素 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 749–757.
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, ZHANG Wentao, et al. Accumulation conditions and controlling factors for the enrichment of shale oil and gas in the Jurassic Qianfoya Formation, Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 749–757.
- [27] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地中国石化探区油气勘探历程与启示 [J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 283–290.
HU Dongfeng, WANG Liangjun, HUANG Renchun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Sichuan basin: a case study on Sinopec exploration areas [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 283–290.
- [28] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例 [J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 893–901.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEN Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: a case study of the Wufeng–Longmaxi formation of Jiaoshiba area [J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 893–901.