

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.002

全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探

张宇轩^{1,2}, 吕鹏瑞^{1,2,*}, 牛亚卓¹, 李玉宏¹, 周俊林¹, 贺政阳¹, 魏建设¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国-上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要:氦气作为关系国家安全和高新技术产业发展的关键性稀有气体资源,在液体燃料火箭发射、深潜水等多个领域应用广泛且无可替代。笔者梳理了全球氦气资源分布与产能概况,总结了全球典型含氦-富氦天然气藏地质背景及其时空分布规律,探讨了全球氦气资源潜力和产能格局,并提出了推动中国氦气产业高质量发展的相关建议。研究结果显示,①全球氦气资源和产量分布极不平衡,主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯、波兰等国,2021年全球氦气总资源量和探明储量分别为 $484 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $121 \times 10^8 \text{ m}^3$,产量为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。②全球工业利用的氦气资源主要赋存于含氦-富氦天然气藏中,主要为壳源型,少数为幔源型;从晚元古代到新生代均有产出,主要分布在板块边缘隆起、陆内裂谷和深大走滑断裂带3类构造环境;优质氦源岩是形成富氦天然气藏的物质基础。③全球氦气资源潜力巨大,产能发展态势良好,出现“氦热潮”,或将改变世界氦气供需格局,全球氦气供应市场将由单极走向多元。④面对全球氦气资源现有格局和发展热潮,中国氦气发展挑战与机遇并存,亟需开展氦气资源调查评价与勘查示范,建立健全国家氦气资源战略储备管理机制,构建多元化供应体系,推动氦气产业高质量发展。

关键词:全球;氦气资源;成藏背景;地质特征;资源潜力;产能格局

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)04-0011-22

Preliminary Study on the Geological Characteristics, Resource Potential and Production Capacity Pattern of Global Helium Resources

ZHANG Yuxuan^{1,2}, LÜ Pengrui^{1,2,*}, NIU Yazhuo¹, LI Yuhong¹,
ZHOU Junlin¹, HE Zhengyang¹, WEI Jianshe¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center of Geological Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. China-SCO Geosciences Cooperation Research Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: As an important key rare gas resource related to national security and the development of high-tech industries, helium is widely used and irreplaceable in liquid fuel rocket launch, deep diving and other fields. In this paper, the authors summarized the distribution and production ca-

收稿日期:2022-06-18;修回日期:2022-08-29;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:曹佰迪

基金项目:中国地质调查局项目“全国氦气资源潜力评价与战略选区调查”(DD20221665)和陕西省创新人才推进计划“造山带地层层序恢复:以甘蒙北山造山带南部的石炭系—二叠系为例”(2021KJXX-74)联合资助。

作者简介:张宇轩(1990-),男,工程师,主要从事基础地质与战略性矿产研究。E-mail:yxzhang90@163.com。

* 通讯作者:吕鹏瑞(1984-),男,高级工程师,主要从事境外地质矿产调查研究及矿业投资环境评价。E-mail:lvpengrui0910@163.com。

capacity of global helium resources, introduced the geological background of typical helium bearing and helium rich natural gas reservoirs in the world, further summarized the temporal and spatial distribution law of global helium resources. , discussed the global helium potential and productivity pattern, and put forward relevant suggestions to promote the high-quality development of China's helium industry. The results show that: ①the distribution of global helium resources and production is extremely uneven, mainly in the United States, Qatar, Algeria, Russia, Poland and other countries. In 2021, the total resources and proved reserves of helium in the world were 48.4 billion cubic meters and 12.1 billion cubic meters respectively, with an output of 160million cubic meters. ②the helium resources used by the global industry are mainly stored in helium containing and helium rich natural gas reservoirs, which are mainly of crust type and only a few of mantle type. They have been produced from Late Proterozoic to Cenozoic, and are mainly distributed in three tectonic environments: plate edge uplift, intracontinental rift and deep and large strike slip fault zone. High quality helium source rocks are the material basis for the formation of helium rich natural gas reservoirs. ③the global helium resource potential is huge, the production capacity development trend is good, and the "helium heat" tide may change the world helium supply and demand pattern, and the global helium supply market will move from unipolar to diversified. ④facing the current pattern and development upsurge of the world's helium resources, China's helium development challenges and opportunities coexist. There is an urgent need to continue to work on the investigation and evaluation of helium resources, exploration and demonstration, and the establishment and improvement of the national strategic reserve management mechanism of helium resources; It is urgent to build a diversified supply system to reduce the risk of helium supply in China and promote the high-quality development of China's helium industry.

Keywords: global; helium resources; reservoir forming background; geological characteristics; resource potential; production capacity pattern

氦(He)在常温下无色、无味、无臭,在水中的溶解度很低,是除氢气以外密度(0.178 6 g/L)最小的气体。氦也是已知熔点、沸点最低的元素,其液化温度接近绝对零度,同时具有高导热率、强化学惰性等特殊的物理和化学性质,广泛应用于液体燃料火箭、载人深潜、第四代核反应堆、高端芯片制造、量子计算机、核磁共振、现代精密分析仪器等国防工业和高新技术领域,是中国进一步走向“深空、深海、深地、深蓝”不可或缺的关键性稀有气体资源(李玉宏等, 2018;贾凌霄等, 2022)。目前全球工业利用的氦气(工业品位为 0.1%)资源主要赋存于含氦、富氦天然气藏中。根据油气田氦气含量(体积分数,下同),可将其分为特富氦(氦气含量 $\geq 0.500\%$)、富氦(0.150%~0.500%)、含氦(0.050%~0.150%)、贫氦(0.005%~0.050%)、特贫氦($< 0.005\%$)气藏等 5 类。按其氦气储量规模可分为特大型($\geq 100 \times 10^6 \text{ m}^3$)、大型($50 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3$)、中型($25 \times$

$10^6 \sim 50 \times 10^6 \text{ m}^3$)、小型($5 \times 10^6 \sim 25 \times 10^6 \text{ m}^3$)、特小型($< 5 \times 10^6 \text{ m}^3$)气藏等 5 类(Dai et al., 2017)。

中国氦气资源需求增长强劲,对外依存度极高,但由于资源家底不清,对外依存度高,产业链尚未建立,资源安全形势严峻,短时期内难以实现氦气全面自给自足,亟需着眼国内外市场,分阶段保障氦资源供应。因此,有必要厘清全球氦气资源的时空分布规律及其资源潜力,可用于分析中国氦气资源的分布与富集规律,查清中国氦气资源的勘探前景,为中国氦气产业的全球布局多元化供应体系提供参考。

1 全球氦气资源分布概况

全球氦气资源分布极不平衡,绝大部分位于北半球(北纬 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间),主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯、波兰等 5 国(俗称“氦五

国”)(Pacheco,2002);南半球目前仅有澳大利亚和坦桑尼亚有氦气资源发现。据美国地质调查局(USGS)统计,截止 2021 年底,全球氦气总资源量约为 $484\times10^8\text{ m}^3$,其中美国氦气资源量估计为 $171\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 35.33%;卡塔尔氦气资源量为 $101\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 20.87%;阿尔及利亚氦气资源量为 $82\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 16.94%;俄罗斯氦气资源量为 $68\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 14.05%;加拿大氦气资源量为 $20\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 4.13%;中国氦气资源量为 $11\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 2.27%;其他国家资源量为 $31\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦资源量的 6.40%(USGS,2022)。美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯 4 国氦气资源量占全球资源量的 87.19%(图 1)。此外,坦桑尼亚鲁夸(Rukwa)地区可能蕴含多达 $39.08\times10^8\text{ m}^3$ 的氦气资源,是最佳的无风险潜在可回收(Best-Estimate Unrisked Prospective Recoverable)氦气资源,但仍需钻探证实

(Helium One,2022)。

全球氦气总探明储量约为 $121\times10^8\text{ m}^3$,其中美国氦气储量约为 $85.86\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦气总储量的 71.04%;阿尔及利亚氦气储量约为 $18\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦气总储量的 14.89%;卡塔尔氦气资源主要来自液化天然气闪蒸气(BOG)提纯回收,资源量巨大但无高品位氦气储量;俄罗斯氦气储量约为 $17\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦气总储量的 14.07%;波兰氦气储量约为 $0.24\times10^8\text{ m}^3$,占全球氦气总储量的 0.20%;其他国家或地区暂无氦气储量统计(USGS,2022)。美国、阿尔及利亚、俄罗斯 3 国氦气总储量占世界已公布探明储量的 99.99%,基本垄断了全球氦气供应市场(图 1)。

1.1 美国氦气资源储量在全球具有绝对优势

全球氦气储量 70.9%分布在美国,而美国 97%的氦气集中在 6 大气田(表 1):德克萨斯州的克利夫赛德(Cliffside)气田、堪萨斯州—俄克拉荷马州—德克萨斯州的胡果顿(Hugoton)气田、堪萨斯

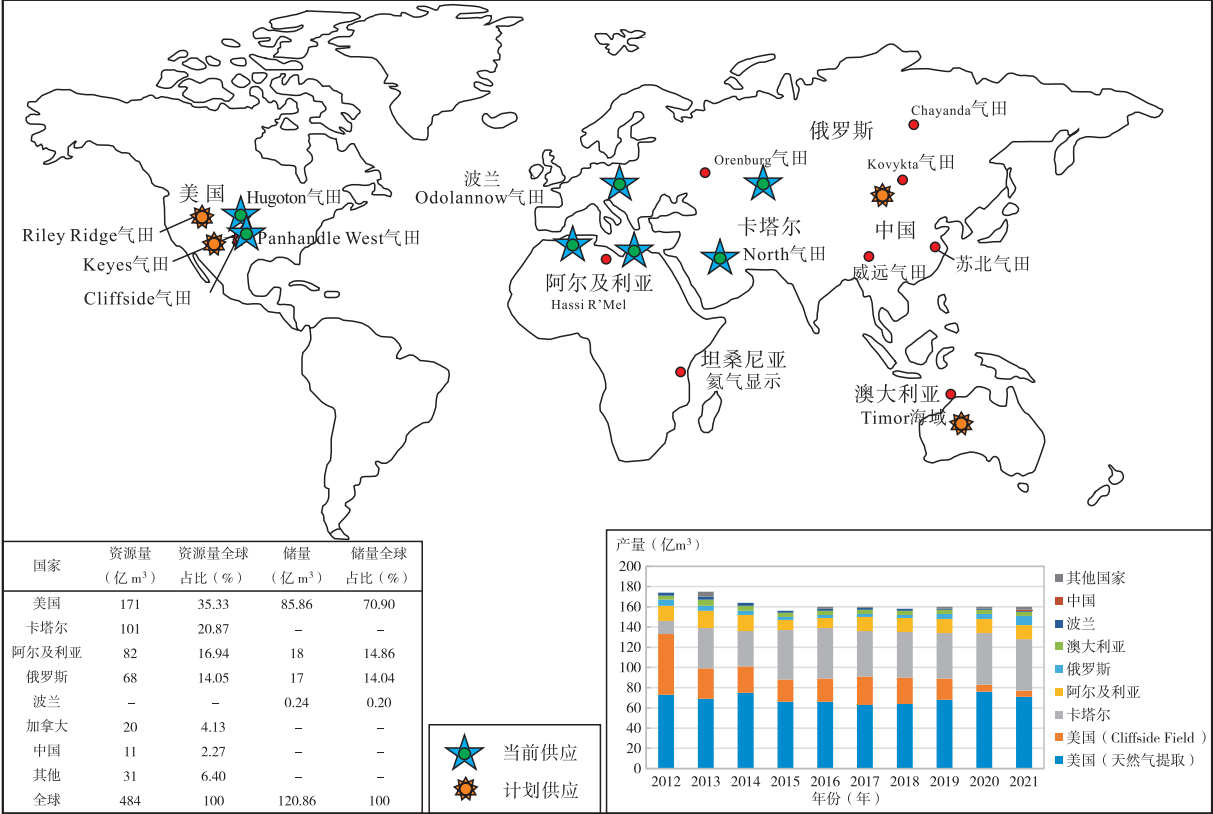


图 1 全球氦气藏分布与产能格局示意图(据张宁等,2010;USGS,2022 修编)

Fig. 1 Schematic diagram of global helium reservoir distribution and productivity pattern

表 1 美国六大氦气田统计表

Tab. 1 Six helium gas fields in the United States

序号	氦气田	所在地(州)	氦气含量 (%)	储量 (亿 m ³)
1	胡果顿 (Hugoton)	堪萨斯州,俄克拉荷 马州,德克萨斯州	0.20~1.18	—
2	巴拿马 (Panoma)	德克萨斯州	0.40~0.60	—
3	凯斯 (Keyes)	俄克拉荷马州	1.00~2.70	—
4	潘汉德西部 (Panhandle West)	德克萨斯州	0.15~2.10	—
5	雷利岭 (Riley Ridge)	怀俄明州	0.50~1.30	13.88
6	克利夫赛德 (Cliffside)	德克萨斯州	氦气战略 储备气田	—

注:数据来源于 Parham et al.,1993;Pacheco,2002

州的巴拿马(Panoma)气田(位于 Hugoton 气田北部,产气层位不同)、德克萨斯州的潘汉德西部(Panhandle West)气田、俄克拉荷马州的凯斯(Keyes)气田以及怀俄明州的雷利岭(Riley Ridge)气田。此外,美国西南部四角地区(Four Corners)和丘帕德拉台地地区(Chupadera Mesa)也发现有氦气资源(Broadhead,2005;Halford et al.,2022)。

1.2 卡塔尔氦气主要来自 LNG-BOG 提氦,资源量巨大

卡塔尔氦气主要采自卡塔尔北方气田(North Field)的液化天然气(LNG),北方气田是全球上最大的非伴生天然气田(Qatargas,2021)。该气田东北部位于伊朗境内海域,称为南帕尔斯(South Pars)气田,该气田也具有氦气勘探潜力。卡塔尔氦气资源量虽仅次于美国,但天然气中氦含量很低,约为 0.04%,依靠 LNG 烃类液化后的 BOG 中氦富集程度提高才能具有商业价值。

1.3 阿尔及利亚氦气主要来自哈西鲁迈勒气田 LNG-BOG 提氦

阿尔及利亚氦气也是采自液化天然气,主要来自哈西鲁迈勒(Hassi R'Mel)气田(Nuttall et al.,2012)。该气田占阿尔及利亚天然气出口的 60%,氦气含量为 0.09%~0.22%,平均氦含量为 0.19%,氦气资源量约为 45.6×10⁸ m³。

1.4 俄罗斯氦气储量或被低估,潜力巨大

俄罗斯富氦天然气气田约 170 余个,主要包括

北里海(Northern Caspian)地区的奥伦堡(Orenburg)气田、雅库特(Yakutia)地区的恰扬达(Chayanda)气田、西伯利亚东部(Eastern Siberia)地区的科维克塔(Kovykta)气田(Hooker,2012)。据俄罗斯联邦国家平衡表估算,俄罗斯氦气总储量(前苏联储量标准 A+B+C₁+C₂ 级总量)187.6×10⁸ m³,远高于美国地质调查局的统计数据。西伯利亚东部及远东地区氦气储量(前苏联储量标准 A+B+C₁+C₂ 级总量)约达 162×10⁸ m³,占俄罗斯氦气总储量的 86.4%(Yakutseni,2014;Provornaya et al.,2022),推测和潜在资源量(前苏联储量标准 C₃+D 级总量)约为 300×10⁸~350×10⁸ m³,西伯利亚东部及远东不同地区平均氦气含量为 0.13%~0.67%(表 2)。俄罗斯氦储量集中在气藏气或者气顶气,很多都具备商业开发价值,但现阶段开发程度低,氦气平均含量为 0.1%~0.2%。目前,俄罗斯氦气的最大来源为奥伦堡(Orenburg)气田;科维克塔气田正在开发,氦气资源潜力巨大(Yakutseni,2014)。

1.5 波兰目前共发现 18 个富氦气田

波兰氦气主要分布在东欧板块苏德台单斜外围的奥斯特鲁夫-维尔科波尔斯基(Ostrow-Wielkopolski)奥多拉努夫(Odolanów)富氦气田。据波兰地质研究所(Polish Geological Institute)称,目前共发现 18 个氦气田,主要位于 Zielona Góra-Rawicz-Odolanów 地区的 Fore-Sudetic Monocline 南部,与 Rotliegend、Zechstein 石灰岩和 Main Dolomite 地层有关。仅 Trzebusz 气田是位于 Pomorze 扇区西北部的石炭纪砂岩。氦气含量为 0.22%~0.42%;氮气含量为 30%~40%;氦气储量约为 2 382×10⁴ m³,预测氦气资源量为 3 468×10⁴ m³(Polish Geological Institute,2021)(表 3)。

1.6 加拿大氦气资源以富氮氦气藏为主

在加拿大不列颠哥伦比亚省的西北部的 Slave Point、Jean Marie 和 Wabamun 组气藏中发现有氦气显示(0.04%~0.24%),Horn River 组 Evie 段的页岩气有 0.04%的氦气(Johnson,2013)。加拿大目前已经探明的氦气资源通常位于富含氮气的储层中,并伴随着少量的 CO₂ 或其他气体,位于深部圈闭中,提取和液化成本更低,因此加拿大的氦勘探可能非常有前景(贾凌霄等,2022)。

表 2 俄罗斯十大氦气田统计表(据 Yakutseni, 2014)
Tab. 2 Top ten helium gas fields in Russia

序号	氦气田	所在地(州)	氦气含量(%)	储量(亿 m ³)	
				A+B+C ₁	C ₂
1	科维克塔(Kovykta)	伊尔库茨克	0.28	38.8	12
2	恰扬达(Chayanda)	萨哈共和国(雅库特)	0.43~0.63	18.5	53
3	索宾(Sob)	鄂温克民族自治区	0.58~0.67	7.95	1
4	中博托宾(Srednebotuobin)	萨哈共和国(雅库特)	0.19~0.26(气顶气); 0.58~0.67(游离气)	7.5	0.4
5	阿斯特拉罕(Astrakhan)	阿斯特拉罕	0.020~0.023	6.25	—
6	奥伦堡(Orenburg)	奥伦堡	0.045	4.61	—
7	塔斯-尤里亚赫(Tas-Yuryakh)	萨哈共和国(雅库特)	0.38	4.09	0.5
8	尤鲁布切诺-托霍姆(Yiinibcheno-Tokhom)	鄂温克民族自治区	0.18	3	5
9	杜利斯明(Dulismin)	伊尔库茨克	0.26	1.8	0.4
10	上维柳尚(Verkhnevilyuchan)	萨哈共和国(雅库特)	0.13	1.8	1
合计				195	75.7

表 3 波兰主要氦气田统计表
Tab. 3 Helium gas fields in Poland

序号	氦气田	开发阶段	储量(万 m ³)		产量 (万 m ³)
			A+B	C	
1	Bogdaj-Uciechów	在产	1 065	—	24
2	Brzostowo	废弃	0	—	—
3	Czeszów	在产	90	—	—
4	Dębina	详查	29	—	—
5	Góra	在产	14	—	5
6	Grabówka E	废弃	8	—	—
7	Grochowice	在产	219	—	10
8	Kandlewo	详查	11	36	—
9	Kulów	详查	5	—	—
10	Naratów	在产	20	—	3
11	Niechlów	在产	7	—	2
12	Pakośław	详查	100	—	—
13	Ślubów	在产	0	—	1
14	Tarchały(d. g. + cz. s.)	在产	421	—	8
15	Trzebusz	在产	—	146	2
16	Wilcze-czerwony spa.g.	详查	80	72	—
17	Wilków	在产	47	—	14
18	Wysocko Małe E	在产	12	—	0*
合计			2 128	254	69

注:数据来源于 Polish Geological Institute,2021;数据更新至 2021 年 12 月 31 日。

1.7 坦桑尼亚氦气资源仍需钻探证实

Ballentine 等(2017)通过土壤气体地球化学调查(深度 1 m,n=1 486),在坦桑尼亚西南部鲁夸地区发现氦浓度在 2.5%~4.2%之间的天然气,氦气被储集在 0.5~2.5 km 的深度范围内的砂岩储层中。另外,在坦桑尼亚中东部巴兰吉达(Balangida)和埃西亚(Eyasi)裂谷盆地的温泉气体中包含了更高浓度的氦,高达 10.5%。上述 3 个裂谷都是稳定克拉通上发育的小型裂谷盆地,裂谷带基底由多个相对稳定的太古宙克拉通及周边的活动带组成(Macheyeki et al.,2008)。鲁夸盆地是 3 个裂谷中目前勘探程度最高的盆地(Kilembe et al.,1992;Morley et al.,1992)。鲁夸盆地古老的大陆地壳提供了⁴He 的来源。北美的研究表明,放射性成因⁴He 是在造山时期中释放的,通过对²⁰Ne 的研究,表明地下水在氦运移到气藏中发挥了重要作用(Ballentine et al.,2002)。裂谷及其相关岩浆作用提供了构造和热机制来驱动深层流体循环,驱动主要基底断层附近的地下水流向近地表。氦在运移的过程中被构造圈闭捕获。坦桑尼亚的氦含量可能与东非大裂谷(<5 Ma)对太古宙坦桑尼亚克拉通和元古宙莫桑比克带的加热和破碎有关。高氦气苗的分布说明浅部地壳和深部地壳存在联系(Danabalan et al.,2016)。由于该地区存在气藏,所以可能有重要的氦气资源。目前坦桑尼亚共发现 5 个富氦气

苗,氦气含量为 2.7%~10.6%,³He/⁴He 值为 0.039~0.053 Ra,主要为壳源;⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 409.9~548.7,高于大气值(295.5);⁴He/²⁰Ne 值为 2.4×10³~8.9×10³,比北美油气井水中的含量高 2 个数量级,说明地热系统对挥发分运移的重要作用。Danabalan 等(2016)认为,火山活动为古老岩石中气体的释放提供了热量;如果气藏与火山太近,氦气会被火山气(如 CO₂)稀释。根据刚从地下冒出的气泡(H₂和 N₂)成分测定,将气藏结构的地震图像和氦地球化学性质结合,计算出裂谷一部分区域的氦气资源量为 15.29×10⁸ m³。盆地内已实施 2 口勘探井,证实了盖层和储层的存在,储层中具有储量可观的氦气资源(Danabalan et al., 2022)。

1.8 中国氦气资源分布广泛,资源前景良好

中国氦气资源分布广泛,层位众多,分布特征明显(表 4)。中西部氦气资源主要分布在四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、汾渭盆地等大型克拉通盆地和裂谷盆地中,以壳源成因为主,主控因素包括富含 U、Th 等放射性元素岩体的分布、断裂等构造体系及地下水系统。四川盆地威远气田是中国首个实现氦气商业化利用的气田,氦气含量为 0.2%左右,最高为 0.36%(张子枢,1992;戴金星,2003;王佩业等,2011;秦胜飞等,2022a)。鄂尔多斯盆地是目前

国内最大的天然气生产基地,氦气含量为 0.03%~0.05%,盆地北部少数气田氦气含量达到 0.1%以上,其中东胜气田氦气含量为 0.045%~0.487%,探明储量为 2.444×10⁸ m³,控制储量为 4.270×10⁸ m³,预测储量为 1.590×10⁸ m³,合计地质储量为 8.304×10⁸ m³(何发岐等,2022)。塔里木盆地塔西南、塔北、塔中地区均展现出一定氦气富集前景,氦气含量为 0.05%~2.19%(常兴浩等,1997;余琪祥等,2013),其中巴楚隆起东南缘和田河气田氦气含量为 0.26%~0.53%,为壳源成因,折算氦气探明储量为 1.959 1×10⁸ m³(陶小晚等,2019)。柴达木盆地北缘东坪、马北、尖北等气田陆续发现高品位富氦天然气藏(东坪气田为 0.075%~1.069%;马北气田为 0.06%~0.20%;柴北缘全吉山等地区为 0.21%~0.72%),标准氦气资源量预计达 4×10⁸ m³(张云鹏等,2016;杨振宁等,2018;韩伟等,2020;张晓宝等,2020)。汾渭盆地氦源岩广泛发育、品质较好,氦气成藏条件得天独厚,资源潜力巨大,是目前中国开展氦气资源研究的热点地区之一(刘建朝等,2009;李玉宏等,2011,2015,2016,2017;张福礼等,2012;冉利民,2014;张瑾,2018;张文等,2018;刘浩,2021;韩元红等,2022)。其中西安凹陷和固市凹陷新生界地热井中伴生壳源氦气显示十分

表 4 中国部分含氦天然气显示盆地特征统计表(据李玉宏等,2018)
Tab. 4 Statistical table of characteristics of some helium bearing natural gas display basins in China

分区	盆地	位置	产层	氦气含量	壳源/幔源	地质背景特征
中西部大型克拉通盆地和裂谷盆地	四川盆地	威远气田	震旦系	0.2%左右,最高 0.36%	以壳源为主	发育在前震旦纪花岗岩之上;储层富铀,断层、裂隙发育
	塔里木盆地	巴楚隆起、沙雅隆起等	古生代、中生代	0.05%~2.19%	壳幔混源,以壳源为主	二叠纪火山活动提供了丰富的氦源;有深大断裂
	柴达木盆地	北缘	中生代	0.075%~1.069%	以壳源为主	中生代地层中有铀矿化异常,铀衰变产生氦气,断裂较发育
	汾渭盆地	咸渭凸起、西安、固市凹陷	新生代	最高达 10%以上	壳幔混源,以壳源为主	盆地南部靠近秦岭,大面积分布燕山期花岗岩;盆地内有深大断裂
东部郑庐断裂带	松辽盆地	北部多个凹陷	中生代	0.102%~0.404%,最高 2.104%	壳幔混源,以壳源为主	周围分布火山岩;氦气与二氧化碳生成关系密切,二氧化碳生成在喜山期
	渤海湾盆地	济阳拗陷	新生代	2.08%~3.08%	壳幔混源,以幔源为主	控制气藏形成的断层中生代以来持续活动,深大断裂是主控因素;与岩浆活动密切相关
	苏北盆地	黄桥、溱东、金湖地区	新生代	0.08%~1.34%	壳幔混源,以幔源为主	靠近郑庐断裂;燕山期、喜山期有强烈的岩浆活动;形成幔源含氦二氧化碳气藏
	海拉尔盆地	乌尔逊断陷	中生代、新生代	0.003%~0.198%	壳幔混源,以幔源为主	均分布于深大断裂、燕山期花岗岩侵入体附近

普遍,氦气显示井 77 口,地热井井口气体中氦含量大于 1% 的 38 口,最高达 9.226%,氦含量之高居全球前列(韩元红等,2022);其北段晋中凹陷新发现 6 口地热井井口气体中氦气含量达 10% 以上,世界罕见。渭河盆地估计 4 000 m 以浅水溶氦气资源量为 $21.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,现已圈定华州-潼关、武功-咸阳、户县-蓝田 3 处氦气远景区,进一步工作有望取得氦气资源勘查重大突破(李玉宏等,2015)。

东部氦气资源主要分布在郯庐断裂带两侧含油气断陷盆地中,断裂带两侧发现了多个含有氦气的油气藏和非烃气藏,包括含氦气的 CO_2 气藏和氮气藏等,且氦气含量较高,以幔源成因为主,表现为幔、壳源混合成因,主控因素为深大断裂。松辽盆地北部氦气主要分布于白垩系和侏罗系,对该区 30 多口油气勘探井的分析显示,其氦气含量为 0.102%~0.404%,个别井中氦气含量较高,如汪 9-12 井氦气含量为 2.104%,高地 1 井氦含量为 0.84%,黑富地 1 井和吉白地 1 井氦含量均为 0.5%,氦气勘探前景良好;氦气含量具有自上而下逐渐上升的特点,说明氦气源于地壳深部环境(杨玉峰等,2000;车燕等,2001;冯子辉等,2001a,2001b;付晓飞等,2005)。渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区发现富含氦气的非烃气藏,花 501 井气藏氦气含量达 2.08%~3.08%(车燕等,2001;顾延景等,2022)。苏北盆地也发现了多个含氦气的油气藏和非烃气藏,其中黄桥深层含二氧化碳气田氦气含量为 0.01%~0.23%;浅层溪桥气田是以氮气为主、甲烷与二氧化碳气为辅的混合气田,氦气含量为 0.48%~1.34%,落实氦气储量为 $12.77 \times 10^4 \text{ m}^3$ (张雪等,2018;陈践发等,2021)。

2 全球典型含氦、富氦天然气藏地质背景

2.1 美国胡果顿-潘汉德气田

胡果顿-潘汉德(Hugoton-Panhandle)气田位于美国中部,长为 442.6 km、宽为 12.9~91.7 km,面积约为 $2.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该气田发现于 1910 年,是全球面积最大的气田之一,也是全球最著名的富氦天然气藏,探明天然气储量为 $3.144 2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,平均氦含量为 0.49%。气田由北部的北北东向胡果顿气田和南部的南东东向潘汉德油气田组成,整体平面形状似长筒皮靴(图 2)。南、北 2 部分构造

特征及气藏类型均有显著差别;潘汉德区属于北翼存在油环的背斜型气藏,胡果顿区属于平缓向东倾斜的单斜型地层岩性复合气藏;两部分之间以低渗透岩层分界,但仍是一个连通的整体,有不活跃的边、底水衬托(Pippin,1970;Sorenson,2005)。气田位于美洲克拉通的阿马里洛(Amarillo)-威奇托(Wichita)隆起上,为其北侧堪萨斯隆起的延伸,属中部大陆晚古生代形成的克拉通盆地的局部构造隆起。基底为中元古代增生型造山带,在古元古代末至中元古代(1.8~1.3 Ga)时期,北美大陆的南缘发育增生型造山带。该造山带主要由拼贴的岛弧和同碰撞期花岗岩等岩石组合构成,代表类似现代的岛弧和活动大陆边缘的特征(Burgess,2008,2019)。堪萨斯隆起主要以前寒武纪花岗岩为结晶基底,可能是天然气藏中氦气的主要源岩(Ballentine et al.,2002)。

胡果顿-潘汉德地区烃源岩分布于奥陶系-宾夕法尼亚系的各层系,其中,上泥盆统一下密西西比统的伍特福德(Woodford)组页岩是最重要的烃源岩(图 2),TOC 质量分数为 2.7%~5.5%。伍特福德组页岩的烃源岩类型主要是 II 型干酪根。伍特福德组页岩在阿纳达科盆地南部和俄克拉荷马州东南部具有很高的成熟度,局部地区镜质体反射率可达 4.0%,为气藏提供了丰富的气源条件。气田的主要产气层为二叠系狼营(Wolfcamp)统的 Chase 组和 Council Grove 组,这是一套沉积在高位体系域浅海大陆架之上的碳酸盐岩储集体(图 2)。Chase 组与 Council Grove 组储层岩性是以颗粒支撑的碳酸盐岩及硅质碎屑砂岩为主,北部胡果顿地区大量岩心资料显示,该段岩性包括粗粉砂岩、泥粒灰岩、粒泥状灰岩、泥质粉砂岩、粒状与叶枝状海藻障结灰岩等,其中碳酸盐岩是主要的储集岩性,而且碳酸盐岩储集层孔隙度随着其泥质含量的减少而逐渐增大。南、北两区稍有差别。胡果顿区以含泥质灰岩、白云质灰岩及多孔白云岩为主;潘汉德区以白云岩及花岗质碎屑岩为主。全气田气层最多达 7 层,总厚度为 70~160 m,埋深为 700~1 550 m。储层物性相差较大,孔隙度为 10%~30%,渗透率为 $5 \times 10^{-3} \sim 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (徐思煌等,2012)。狼营统之上的韦契塔组石膏层构成了优质封盖层,特别是狼营期晚期形成了 Chase 组厚层膏岩层,为氦气的保存提供了优质的盖层条件(图 2)。这种短距离侧向运聚、下储上盖、生储盖层发育时间及空间都极为接近的

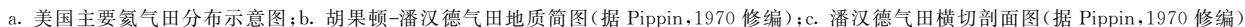


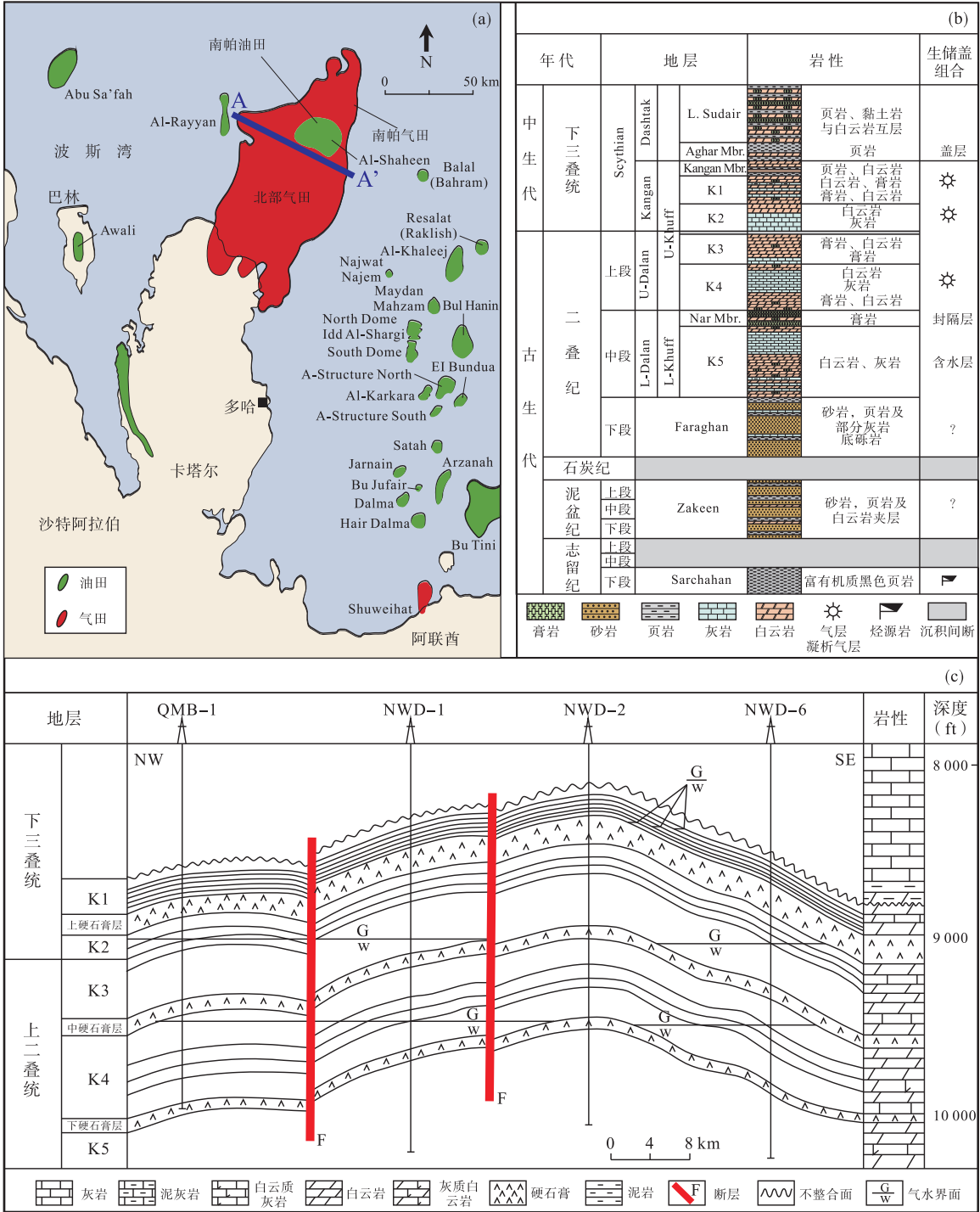
Fig. 2 Geological sketch and cross section of Hugoton-Panhand gas field in the United States

胡果顿-潘汉德气田天然气中氦气浓度变化较大,氦气在气水界面处及断层附近浓度相对较高,而在构造高部位或者气藏的中部氦气浓度较低,这反映了氦气在气水界面上发生溶解交换的特点。胡果顿-潘汉德气田富氮天然气与高浓度氦相伴生,其中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.14 \sim 0.26 \text{ Ra}$, $^4\text{He}/\text{N}_2$ 值为 $0.02 \sim 0.049$, $^4\text{He}/\text{N}_2$ 整体从堪萨斯胡果顿地区的 0.02 变为得克萨斯潘汉德地区的 0.077 。根据 $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ 和 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 值显示出 60% 的 ^4He 来源于地壳浅部。结合使用稀有气体和稳定同位素查明胡果顿-潘汉德气田的氦气来源于 2 种截然不同成因的地壳其中氮气成分所占比例由德克萨斯州的 60% , 下降到堪萨斯-俄克拉荷马的 25% , 氮气组成特点为 $\delta^{15}\text{N}_{\text{N}_2} = -3\text{‰}$ 、 $^4\text{He}/\text{N}_2 = 0.077$ 和 $\text{N}_2/^{20}\text{Ne} = 4.4 \times 10^5$ (Ballentine et al., 2002)。这些“ He 伴生 N_2 ”主要来源于低级变质岩的脱挥发分, 后来运移聚集到得克萨斯潘汉德, 部分溶解在区域地下水

北方—南帕尔斯气田位于中阿拉伯盆地东部卡塔尔基底隆起之上的巨大低幅穹窿背斜,靠近扎格罗斯山前带。中阿拉伯盆地的基底岩石类型包括片岩、板岩、花岗闪长岩和花岗岩,主要出露在阿拉伯板块的西侧,基底之上发育了寒武纪—新近纪沉积

层系(图 3)。烃源岩为晚志留世富有机质页岩,盖层为上二叠统一下三叠统胡夫组蒸发岩和下三叠统

页岩(Holail et al.,2006)。该背斜南北走向,长约为 130 km、宽约为 75 km,面积超 6 000 km²,该背



a. 北方-南帕尔斯气田位置图(Rahmani et al.,2010);b. 北方-南帕尔斯气田地层综合柱状图(Aali et al.,2012);c. 北方气田气藏剖面图(据 Alsharhan et al.,1997 修编;剖面位置见图 a)

图 3 卡塔尔北方—南帕尔斯气田地质简图及剖面图

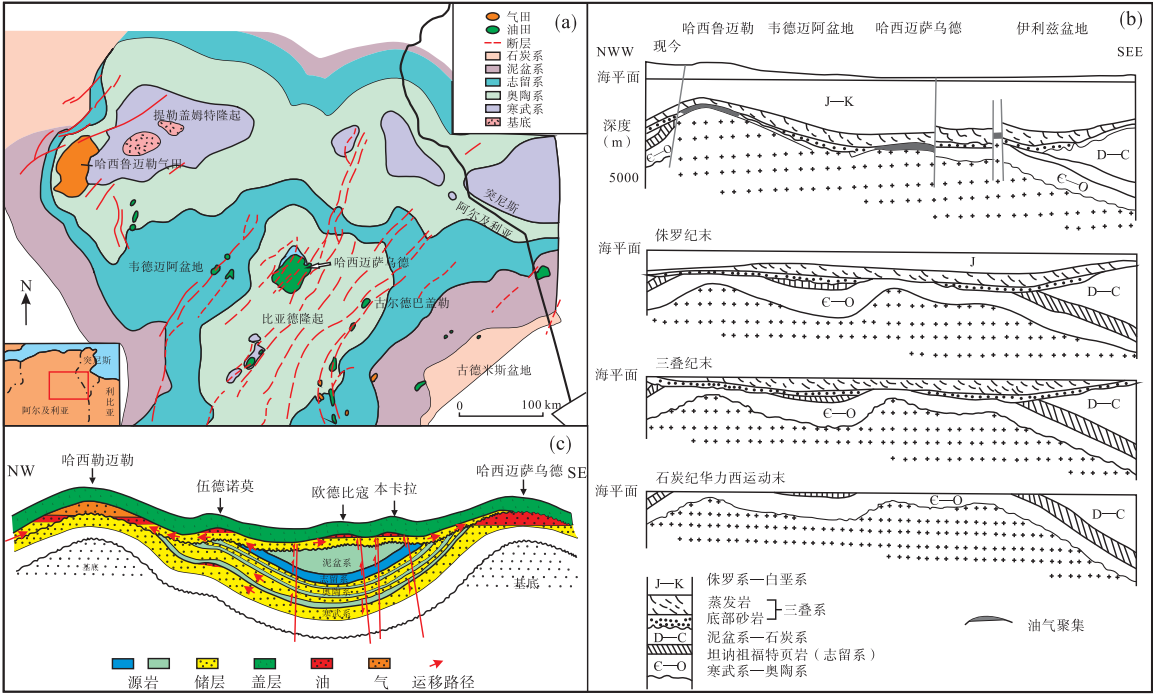
Fig. 3 Geological sketch of Northern Qatar-South Pars gas field

斜四周封闭形成圈闭,翼部轻微倾斜,倾角为 $0.3^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ 。气田主要产气层自上而下分为 4 个层段,即 K1、K2、K3 和 K4。其中 K1 层内有 3 个较小的气藏,最上部气藏的初始气水界面为 2 464 m(海拔之下垂直深度),该层顶部被超压页岩、泥灰岩及致密石灰岩所封盖。K2 和 K3 层内发育一个独立气藏,初始气水界面为 2 758 m,其上硬石膏层为该气藏的直接盖层。K4 层内发育有一个独立气藏,初始气水界面为 2 895 m,硬石膏层为该气藏的直接盖层。胡夫组顶部不整合面发育有少量断距可达 15 m 的垂直断层(Alsharhan et al.,1997)。胡夫组沉积后经历了淋滤作用和白云岩化作用,造成储层内形成铸模孔隙和粒间孔隙,有效提高了储层的储集性能。胡夫组储层孔隙度为 $6\% \sim 22\%$ (平均值 15%),渗透率为 $0.2 \times 10^{-3} \sim 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。K2 层和 K4 层的储层最为优良(K4 层渗透率平均值 $70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,K3 层和 K1 层次之。储层物性在纵向上变化剧烈是胡夫组储层的一个特征,在 1 m 厚的层段内孔隙度可由 4% 变为 20% ,渗透率可由 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 变为 $1\,800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,绝大多数天然气

产自那些厚度较薄但储层性能优良的层段(Holail et al.,2006)(图 3)。

2.3 阿尔及利亚哈西鲁迈勒气田

哈西鲁迈勒(Hassi R'Mel)气田发现于 1956 年,原始天然气地质储量为 $2.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。氦气含量为 $0.09\% \sim 0.22\%$,平均氦含量为 0.19% ,氦气资源量约为 $45.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。哈西鲁迈勒气田属于阿尔及利亚东北部三叠盆地的蒂尔赫姆特穹隆构造高部位,阿特拉斯褶皱带与撒哈拉地台交界地带撒哈拉地台一侧,构造上属于东非克拉通(Makhous et al.,2003)。蒂尔赫姆特隆起北部是撒哈拉地台北缘阿特拉斯褶皱带前缘,一些学者将韦德迈阿盆地及周围隆起称为三叠盆地,作为统一的构造沉积单元研究。哈西鲁迈勒气田是古生界隆起上的背斜圈闭,背斜长为 80 km,宽为 45 km,面积约为 $2\,600 \text{ km}^2$,构造平缓,倾角为 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。产层为三叠系下部的哈西鲁迈勒砂岩,在古隆起顶部则缺失(图 4)。盖层为三叠系的蒸发岩,最大厚度可达 1 255 m。烃源岩为志留系页岩,在三叠系沉积前,烃源岩未成熟。因此,构造圈闭形成期在生排烃之前,匹配关系好。



a. 蒂尔赫姆特穹隆构造简图;b. 三叠盆地构造演化剖面(据 Boudjema, 1987); c. 过东撒哈拉的构造剖面图 A - A'(Mitra et al.,2003)

图 4 阿尔及利亚哈西鲁迈勒气田地质简图及剖面图

Fig. 4 Geological sketch and profile of hassilumail gas field in Algeria

三叠盆地基底为前寒武纪结晶基底,包括古太古界—新元古界(4 000~570 Ma),主要岩性为花岗岩、其他侵入岩、火成岩及变质岩等。此外,下志留统热页岩富含放射性铀,在测井曲线上表现为高伽马特征,是晚奥陶世冰期以后最大规模海侵所形成滞流环境的沉积产物(Lüning et al., 2000),其放射性铀、钍元素来源可能与基底富铀花岗岩有关。撒哈拉地台东西部盆地主要发育有2套烃源岩,分别为下志留统热页岩和中上泥盆统页岩(Talamali et al., 2016)。下志留统热页岩是撒哈拉地台区的主力烃源岩,所生成的油气占到北非古生界已发现油气储量的80%以上。该套烃源岩为志留系底部发育的灰色—黑色笔石页岩,与下伏奥陶系呈突变接触,烃源岩有机质来自于海相母源,包括藻类、几丁虫类、笔石类、无定型腐泥质等,主要为I/II型干酪根(Lüning et al., 2000)。哈西鲁迈勒气田所在的蒂尔赫姆特穹窿构造的天然气主要来自于西部盆地,西部盆地区志留系泥岩地层厚度为500~1 000 m,据测井曲线高伽马特征(GR值大于200 API)识别的高丰度热页岩厚度为10~30 m,有机碳质量分数一般为1%~4%,烃源岩热演化处于高成熟—过成熟阶段,盆地沉积中心镜煤反射率 R_o 可达3%以上,整体以生气为主(刘琼等, 2013)。

哈西鲁迈勒气田的储层主要为中生界三叠系,为华力西侵蚀面上沉积发育的河流—三角洲相石英砂岩,主要分布在撒哈拉地台的东部沉积盆地区(Rafik et al., 2017)。目前整个阿尔及利亚三叠系储层中已发现油气储量占到阿尔及利亚全国储量的44%。三叠系储层孔隙度为10%~20%,渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,胶结物主要为石英次生加大,孔隙以残余粒间孔为主,沉积微相及压实胶结作用控制着储层物性的优劣(刘琼等, 2013)。在晚三叠世—早侏罗世沉积了厚层蒸发岩,早白垩世发生海侵形成广泛的碳酸盐岩沉积,之后发生海退,晚白垩世末期为局限海的蒸发岩沉积。其中三叠系—侏罗系发育的蒸发盐岩是区域上的有效盖层,厚度一般可达1 000 m,封盖条件极其优越,是储层的直接盖层(Galeazzi et al., 2010)。哈西鲁迈勒气田位于蒂尔赫姆特穹窿构造高部位。该隆起在华力西期及新生代的构造活动,产生大量断层,沟通了前寒武纪结晶基底,基底花岗岩体产生的氦气通过断层垂直向上运移,由于隆起区域剥蚀掉了寒武系以上地层,氦气运移距离较小,同时,志留系烃源岩具有

高的U、Th含量,有利于氦气的产生,并伴随天然气运移至构造高部位,晚白垩世膏岩层构成良好封盖(图4)。

3 全球含氦、富氦天然气藏特征

3.1 气体组分与同位素特征

氦具有2种稳定同位素(^3He 和 ^4He),以游离态或溶解态等方式存在。根据氦同位素值将氦气分为大气源、壳源和幔源3类(Ballentine et al., 2000)。大气源的氦气主要通过地下水的循环进入盆地流体系统;壳源(放射性来源)的氦气是由矿物、岩石中含有的U、Th元素发生放射性衰变产生的,主要是 ^4He (Brown, 2010);幔源氦气是地幔中的氦气通过岩浆活动发生脱气作用释放的,主要为 ^3He (张明升等, 2014)。 ^3He 、 ^4He 成因的差异为不同来源的氦提供了判识标志,可以根据 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值来确定氦的来源。通常大气源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.4×10^{-6} ;壳源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 2×10^{-8} ;幔源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.1×10^{-5} (Mamyrin et al., 1986)。也常用样品氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}(R)$ 比大气氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}(R_a)$ 来表示气样的氦同位素特征,即 $R/R_a = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} / (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{大气}}$ 。在天然气藏中大气源氦的组分少到可忽略,因而可不考虑大气源氦的来源,从而可以用二元复合模式计算天然气样品中壳源和幔源所占份额。在用 R/R_a 表示气样氦同位素分布特征时,当 $(R/R_a) > 1$,表示气样中幔源氦份额大于12%;当 $(R/R_a) > 0.1$ 时,幔源氦份额大于1%;当 $(R/R_a) < 0.1$ 时,可以认为天然气中氦基本来自壳源(徐永昌, 1997;陶明信等, 2001;张明升等, 2014)。

氦气均为无机成因,从最原始的氦气成因,可将富氦天然气藏分为壳源型和幔源型富氦天然气藏。目前,全球范围内的主要含氦、富氦天然气藏均为壳源型,仅少数富氦天然气藏为幔源型。目前,世界范围内尚未发以氦气为主的天然气聚集,而是伴生于载体天然气气藏中,发现的工业氦气载体气藏有 CH_4 、 N_2 、 CO_2 等3种类型(李玉宏等, 2022a)。壳源型富氦天然气藏则多以 CH_4 气藏为主, CH_4 主要为有机成因,该类气藏普遍具有 N_2 气含量较高的特点;幔源型富氦天然气藏多为无机成因气藏,如 CO_2 气藏、 N_2 气藏。影响氦气成藏的主要因素为富含U、Th等放射性元素岩体的分布、断裂、地下水、

地热及其他伴生气(如 CO_2 、 N_2 等)。

板块边缘型富氮天然气根据气藏气体组分可以分为富氮 N_2 气藏和富氮 CO_2 气藏。载体气主要为无机成因,该类气藏主要分布于板块边缘,气藏缺乏烃源岩供给,但构造活动强烈,断层发育。此类气藏在美国落基山脉较为发育,多发育在基底卷入断层附近,在花岗岩基底风化壳或上覆沉积地层中形成富氮气藏,上部被晚古生代厚层膏泥岩覆盖,此类气藏单个气藏规模小,氮气含量高,最高可达 10% 以上,以富氮 N_2 气藏为主。美国怀俄明州的 Riley Ridge 地区发育的富氮 CO_2 气藏是全球范围内少有的壳源富氮 CO_2 气藏,一般来说, CO_2 是幔源成因,幔源气体在不断演化中受 CO_2 耗散的影响逐渐演化为壳源型富氮天然气,幔源成分不断被壳源 ^4He 稀释,但该气藏可能是一个特例,目前缺乏相关数据判别其成因(表 5)。

地幔成因的幔源型氮气最终必然要进入地壳圈闭中成藏,因此,幔源型富氮天然气藏均有壳源氮气的混入,即使大洋中脊 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(8 Ra)与大陆岩石圈地幔 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(6.1 Ra)也存在差异,因此并不具有完全意义上的幔源富氮天然气。按照其载体气主组分特征,可分为幔源富氮 N_2 气藏和幔源富氮 CO_2 气藏,这种组分的差异是由幔源气体在运移过程中 CO_2 的消耗差异性决定的。一般而言。幔源成因的 CO_2 在运移过程中与地层水和其中的一些阳离子发生反应逐渐消耗,而地壳变质作用产生的 N_2 气逐渐富集,随之而来的是幔源气中壳源成分的增长,因此富氮 N_2 气藏可分为壳源与幔源 2 种,其区别主要在于 CO_2 的消耗速率和壳源 ^4He 的混入量。

3.2 氮源岩及产层时代特征

3.2.1 氮源岩

富氮天然气藏形成需要富 U、Th 的岩类作为氮源岩,同时需要贫有机质,以避免氮气被过度稀释。优质氮源岩是形成富氮天然气藏的物质基础。U、Th 等元素广泛赋存于各类地质体中,但其丰度极低,半衰期极长,生氮速率极低。因此,在没有外部氮源的情况下,难以形成氮气富集。形成富氮天然气需要再配备生氮能力较好,且不生烃或弱生烃的外部氮源(花岗岩、铝土岩、泥页岩等),经过“多源聚氮、主源富氮”的过程(Ballentine et al., 2002; Brown, 2010; Danabalan, 2017; 李玉宏等, 2017, 2018; 张文等, 2018; 秦胜飞等, 2022b)。李玉宏等

(2017, 2018)提出了富氮天然气弱源成藏理论,认为富 U、Th 花岗岩是富氮天然气藏的主要氮源,花岗岩碎屑岩和泥页岩是氮源岩的有力补充。李济远等(2022)对华北地区本溪组铝土岩的生氮能力的研究表明,铝土岩的 U、Th 含量高于花岗岩,生氮速率仅次于烃源岩,为优质氮源岩。

3.2.2 产层时代

从全球已发现的富氮天然气藏产出地层时代看,从晚元古代到新生代均有产出,主要产层时代为前寒武纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪和白垩纪,奥陶纪、泥盆纪和新近纪也有少量产出。美国富氮天然气藏主要产出地层时代为石炭纪—二叠纪,部分出于侏罗纪、泥盆纪、三叠纪,如胡果顿—潘汉德、凯斯等气田出于石炭纪—二叠纪,雷利岭等气田出于侏罗纪;卡塔尔含氮天然气藏主要产出地层时代为侏罗纪—白垩纪,如北方气田;阿尔及利亚富氮天然气藏主要出于三叠纪,如哈西鲁迈勒气田;俄罗斯富氮天然气藏主要产出地层时代为前寒武纪,如恰扬达、科维克塔等气田;波兰富氮天然气藏主要产出地层时代为二叠纪(表 5)。

3.3 构造环境特征

通过全球范围内主要富氮天然气藏的类比,初步认识到目前全球已经发现、探明、并投入开发的富氮天然气藏均发育在古老的克拉通基底之上,古老、稳定、巨大的基底为氮的形成提供了充足的气源条件。由于富氮天然气的形成需要恰当的地质活动性,既发育运移通道,且具有保存条件,多发育于稳定区的相对活动带或活动区的相对稳定带,如地台背景下的沉积盆地、中生代—新生代构造—岩浆活动强烈且具有古老花岗岩的基底区。因此,与其相关的构造环境可大致分为 3 类:板块边缘隆起、陆内裂谷和深大走滑断裂带(陈践发等, 2021; 李玉宏等, 2022a)。构造背景不同造成氮气来源和富集模式的差异(秦胜飞等, 2022b),笔者根据对比将壳源型富氮天然气藏分为板块边缘隆起型和陆内裂谷型;将幔源型富氮天然气藏划分为深大走滑断裂型(表 5)。

3.3.1 板块边缘隆起

板块边缘盆地隆起带是氮气富集最为有利的区带。潘汉德—胡果顿气田位于北美克拉通西南的卡萨斯古隆起之上,南部为阿马里洛—威奇托隆起,其南部与阿帕拉契亚接壤。阿尔及利亚哈希鲁迈勒气田位于东非克拉通北缘阿特拉斯褶皱带前缘。卡塔尔诺斯气田位于阿拉伯板块东南缘,靠近扎格罗斯

表 5 富氦天然气藏成因类型、组分及其同位素特征数据表

Tab. 5 Genetic types, components and isotopic characteristics of helium rich natural gas reservoirs

成因 分类	构造 成因 分类	气田名称	大地构造位置	产层	深度	组分特征(%)					³ He/ ⁴ He (10 ⁻⁸)	R/Ra	幔源 份额 (%)	CO ₂ 碳 同位素 (‰)	CH ₄ 碳 同位素 (‰)	参考 文献
						CH ₄	C ₂ ⁺	N ₂	CO ₂	He						
壳	板 块 边 缘 隆 起 型	Hugoton-Panhandle	北美克拉通南缘	C ₂ -P	430~1670	50~77	7~14	10~41	0.1	0.49	14~36.4	0.1~0.26	1.01~3.13		-43.4 (平均值)	Yakuseni, 2014, 胡安平, 2016 戴金星, 2003 余琪祥等, 2013 刘全有等, 2009 Zhang et al., 2019 张晓宝等, 2020
		Keyes	北美克拉通南缘	C	1431	64.3	6.2	-80.26	0.7	2.2						
		Cliffside	北美克拉通南缘	P	1011	65.5	7.2	25.1	0.4	1.8						
		Hassi R'Mel	撒哈拉板块北缘	T ₂	2150	82.2	12	5.6	0.2	0.19						
		North Dome	阿拉伯板块东南缘	J-K	2500~2895	85.58	8.17	3.45	2.02	0.09~0.2						
		威远	上扬子板块西南缘	γ-Z	2700~3800	83.97	2.3	9.6	4.3	0.21~0.34	2.9~3.0	0.21~0.22	0.08~0.09	-12.51~-23.09	-30.37~-45.0	
		雅克拉	塔里木板块北缘	C	5755~5776	70.37	3.1	6.88	19.43	0.22	21.6	0.15	1.79	-31.96~-35.7		
		和田河	塔里木板块西缘	O	1546~2272	80.35	3.64	10.39	1.36	0.249	11.6~12.70	0.08~0.09	0.87~0.97			
		马北	柴达木板块北缘			77~79		7.41~8.87	0.10~0.53	0.12~0.20	4.90~6.85	0.04~0.05	0.3~0.4			
		东坪	柴达木板块北缘	基底	3159~4788	62~95	1~13	3~30	0.01~2.02	0.08~1.07	1.01~2.21					
源	板 块 边 缘 隆 起 型	牛东	柴达木板块北缘	J	2124~3200						1.31~3.62					Yakuseni, 2014
		Hogback	落基山脉南段	C ₂	1879	29.1	6.1	54.6	2	7.17				-35.8		
		Bitebito	落基山脉南段	T	297	14.4	6.4	78.9	0.3	8.9						
		Table Mesa	落基山脉南段	C ₁	2287	5.9	1.6	83.8	1.4	5.7						
		Rattlesnake	落基山脉南段	C ₁ +D	2119	14.2	2.8	86.2	2.8	7.81						
		Tostito	落基山脉南段	C ₁	2036	2.6	0.8	96.3	0.3	7.27						
		Navajo-Chambers	落基山脉南段	P-T	~300	0.1	—	90	0.8	8~10						
		Pinta Dome	落基山脉南段	P	~350	—	—	85	1.5	8						
		Boulder Baute	落基山脉南段	C ₁	1695	43.7	4	36.9	9.6	3.79						
		Riley Ridge	落基山脉北段	J	1900~2100	19~20	—	7.8	68.69	0.55						
氮	陆 内 裂 谷 型	Harley Dome	落基山脉北段	J ₂	262	5.1	2.3	91.5	1.1	7.02	14	0.1	1.09		-48.4~-48.7	Danabalan et al., 2017; Macheyeki et al., 2008 Danabalan et al., 2017 Zhang et al., 2019 Bremner, 2017 曹忠祥等, 2001 郭念发等, 1999 戴金星等, 1994
		North Tanzania	东非裂谷东支	温泉气				90~95		2.7~10.6	5.46~7.42	0.039~0.053	0.32~0.49			
		Eyasi	东非裂谷东支	温泉气		<0.1	—	93.1	0.2	5.7	6.44	0.046	0.4			
		Idindiro	东非裂谷南段	温泉气						0.04	96.6	0.69	8.62			
		华县 2 号	华北板块汾渭地堑	N		71.70	72.38	27.20	0.567	0.395	17.64	0.13	1.42	-33.47		
		Bravo Dome	落基山脉南段	基底		—	—	—	98.77~99.86	0.005~0.14	93.8~596	0.67~4.26	8.36~54.1			
		花沟	鄂尔多斯带	N		1.77		68.86	34.27	2.08	434	3.10	39.3			
		黄桥	鄂尔多斯带	N	200~300	27.057	2.825	64.529	4.241	1.33	371	2.65	33.61	-8.09		
		万金塔	松辽盆地	K ₂	838.8~843.8	9.69	0.39	—	89.92	0.1	687	4.91	62.38	-8.83	-45.37	

注: C₂⁺ 为重烃; V 为文德系(670~590 Ma); RI 为里非系(1 650~800 Ma); 均为前苏联元古宇地层单位(杜金虎等, 2013)。

山造山带。威远气田位于上扬子西缘乐山龙女寺隆起之上,塔里木盆地北缘沙雅隆起、西部巴麦隆起具有丰富的富氦天然气显示(表 5)。总体而言,地球上目前已经投入开发的富氦天然气藏均位于板块边缘的隆起带之上。

3.3.2 陆内裂谷

近年来陆内裂谷盆地成为氦气找矿的新领域,是目前勘探热点(李玉宏等,2022a),包括东非裂谷系、渭河盆地等。虽然目前在陆内裂谷盆地内还没有探明储量,但近年来的勘探表明古老克拉通内或者其边缘的裂谷盆地具有较大的氦气勘探潜力,特别是花岗岩大面积展布分布的结晶基底发生裂谷作用后,其氦源条件充足,深部岩浆活动为氦气向上运移提供了通道和能量,氦气通过断裂和热作用在裂谷盆地内聚集成藏。2016 年以来坦桑尼亚东非裂谷系鲁夸(Rukwa)、埃西亚(Eyasi)、巴兰吉达(Balangida)等裂谷盆地均有重要的发现。中国地质调查局西安地质调查中心近年在渭河盆地开展了大量基础调查和物化探工作,发现了众多高含氦溶解气和天然气显示。在渭河盆地固市凹陷华县 2 井中发现了富氦天然气显示,预示着渭河盆地存在游离态富氦天然气。陆内裂谷型幔源富氦天然气藏发育较少,最为典型的是东非大裂谷南段的 Idindiro 地区温泉气体,此类气体多分布在裂谷作用的活跃地区,其火山活动较强,地幔脱气过程中被圈闭捕获成藏,但此类气藏通常有壳源混入才能达到工业利用标准。因此,笔者认为不存在绝对意义上的幔源型富

氦天然气藏(表 5)。

3.3.3 深大走滑断裂带

走滑断裂带壳幔物质交换活跃,幔源氦气通过深大走滑断裂运移至上地壳,进而在有利部位成藏,形成幔源型富氦天然气。走滑断裂型富氦天然气主要分布于美国落基山脉和中国郯庐断裂带两侧,美国落基山脉地区是目前全球范围内幔源型富氦天然气藏富集的有利构造带,主要为 CO₂ 气藏,如美国 Bravo Dome 气田;中国郯庐断裂带则是走滑断裂型幔源富氦天然气聚集的典型区带,郯庐断裂带两侧发现了多个富氦天然气田,最为典型的是黄桥盐城组富氦 N₂ 气田(表 5)。

4 全球氦气产能格局及其展望

4.1 全球氦气产能格局

受氦气资源分布制约,目前全球氦气产量分布亦较为集中,主要产氦国为美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯、波兰和澳大利亚等国。全球约 95% 的氦气供应来自天然气加工或液化天然气(LNG)生产的副产品。氦气生产始于 20 世纪初的美国,20 世纪末至 21 世纪初,全球氦气年产量总体上处于稳步增长态势,年产量为 0.85×10⁸~1.75×10⁸ m³。2002~2008 年产量持续升高,2008 年全球氦气产量最高,达 1.75×10⁸ m³; 2012~2021 年基本趋于平稳,呈震荡下行趋势,总体保持在 1.6×10⁸ m³ 左右,其中 2021 年全球氦气产量为 1.6×10⁸ m³(图 1,表 6)。

表 6 全球主要产氦国家近十年氦气产量情况(亿 m³)
Tab. 6 Helium production in major countries in the world in recent ten years(10⁸ m³)

国家	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年* ^e
美国(天然气提取)	0.73	0.69	0.75	0.66	0.66	0.63	0.64	0.68	0.76	0.71
美国(Cliffside 气田)	0.60	0.30	0.26	0.22	0.23	0.28	0.26	0.21	0.07	0.06
卡塔尔	0.13	0.40	0.35	0.49	0.50	0.45	0.45	0.45	0.51	0.51
阿尔及利亚	0.15	0.17	0.16	0.10	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
俄罗斯	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.09
澳大利亚	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
波兰	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
中国										0.01
其他国家	0	0.05	0	0	0.02	0.01	0	0.02	0.02	0.03
全球	1.75	1.75	1.64	1.56	1.60	1.60	1.58	1.60	1.60	1.60

注:数据来源于 USGS. Mineral Commodity Summaries 2015~2022;* e 代表预测数。

4.1.1 美国掌控世界氦气市场的绝对话语权

美国是目前全球第一大氦气生产国,同时也是氦气开采利用最早、技术储备最雄厚、经验最丰富的国家。美国早在1910年就开始氦气开采,虽然已大规模开采60余年,但氦气藏量仍占全球总储量的一半左右,美国掌控世界氦气市场的绝对话语权。2012年之前,美国氦年产量一直接近全球年产量的80%。2013年美国国会通过《2013年氦气管理法》,限制氦气生产。2012~2020年,美国氦气年产量从 $1.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减至 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量减少逾40%。受此影响,全球氦气供应整体呈逐渐减少趋势,价格快速大幅抬升。2021年美国氦气产量继续下降为 $0.77 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球氦气总产量的48.13%,其中 $0.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 来自天然气提取, $0.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 来自克利夫赛德战略储备气田。

4.1.2 卡塔尔大量低品位氦气得到有效利用

卡塔尔是“氦五国”中最晚开始供应氦的国家,但潜力不小。从2005年开始向全球供应氦气,2006年以后,其产量增长加快,均向全球每年供应氦气 $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2005年开始运营的卡塔尔拉斯拉凡1期(Ras Laffan-1)和2013年开始运营的拉斯拉凡2期(Ras Laffan-2)项目的启动对氦气供应产生了重大影响,综合产能目前为 $6200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (贾凌霄等,2022),并在2012年短缺后导致2014~2016年出现过剩。由于地缘政治导致的出口封锁,2017年产量略有降低,卡塔尔氦气通过阿联酋(通过沙特阿拉伯)出口,但这条路线在2017年年中被封锁。氦气生产于2017年6月暂停,但在组织了一条新路线后于7月重新开始(Edison,2017)。2021年氦气产量为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球氦气总产量的31.88%,成为现今全球第二大氦供应国。卡塔尔目前有2个氦气工厂,年产能分别为 $0.566 \times 10^8 \text{ m}^3$ (新增设的工厂年产能 $0.3679 \times 10^8 \text{ m}^3$),可以满足提供全球25%的氦需求量。氦气主要来源于卡塔尔北部气田(Qatar's North Field)的液化天然气。气田中氦气含量仅为0.04%,但天然气可采储量达 $25.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,计算得卡塔尔北部气田中氦气资源量为 $101 \times 10^8 \text{ m}^3$,该数值与美国估算的资源量一致(Nuttall et al.,2012)。

4.1.3 阿尔及利亚氦气主要出口法国

阿尔及利亚作为第三大氦气产出国,有阿尔泽(Arzew)和斯基克达(Skikda)2个氦气工厂,氦气产

能均为 $1700 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,但目前均未满负荷运行。从1995年开始向全球供应氦,2014年前供应相对稳定,年产量基本上维持在 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,2015~2016年供应有所下降,2017~2021年期间稳定在 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,2021年产量 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球氦气总产量的8.75%,大部分出口法国。

4.1.4 俄罗斯长期以来供应量较少

俄罗斯是较早开发氦气的国家,但供应量较少,基本稳定在 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,2021年氦产量 $0.09 \times 10^8 \text{ m}^3$,2021年占全球氦气总产量的5.63%。每年除满足自身 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的需求外,剩余部分液化后可以出口他国。俄罗斯目前氦气由奥伦堡提氦厂工业化生产,氦气年产能 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$,配套建有奥伦堡盐穴、加里宁格勒2座储氦库。该厂已在2017~2020年间将产量从 $510 \times 10^4 \text{ m}^3$ 削减至 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4.1.5 波兰是欧洲唯一的氦生产国

波兰也是一个较早开发氦气资源的国家之一,是欧洲唯一的氦生产国。但供应量一直较小,近几年氦产量维持在 $0.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,2021年氦产量 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球氦气总产量的0.63%,主要供应欧洲市场。该国有18个氦气田14个正在生产,产量占主导地位两个气田(Bogdaj-Uciechów和Wilków)几乎占总产量的55%(表3、表6)。

4.1.6 澳大利亚已有一家LNG工厂投产

澳大利亚自2010年以来,林德集团的成员比欧西(BOC)在达尔文有一家液化天然气工厂投产,其氦其年产量约为 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$,有几个液化天然气出口设施在建或拟建。2021年氦气产量 $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球氦气总产量的2.50%,主要满足澳大利亚、新西兰和亚太地区(张宁等,2010)。此外,Greater Sunrise(Bonaparte盆地),Ichthys(Browse盆地)和Goodwyn-North Rankin North West Shelf Venture(Northern Carnarvon盆地)天然气藏在氦提取方面的潜在未开发价值高于澳大利亚在达尔文的唯一商业陆上氦提取设施。估计从澳大利亚液化天然气中氦气回收总量为 $16.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ (Boreham et al.,2018)。因此,澳大利亚增加氦气产量的机会很大。

4.1.7 中国LNG-BOG提氦技术与产能建设飞速发展

中国天然气提氦始于20世纪60年代的威远提氦试验I装置,该装置设计日处理天然气 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/$

d, 氦生产能力约为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2004 年因威远气田产能不足以及氦气生产成本高于进口价格而关闭;2012 年, 该气田恢复生产, 重新在四川省荣县东兴场镇建成天然气提氦装置, 该装置设计日处理天然气 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$, 氦生产能力约为 $21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 氦收率 $>96.5\%$ 。但由于该气田产能递减, 原料天然气量不足, 实际进装置原料天然气小于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 实际氦产量未达设计产能。该生产装置单位产品能耗和运行费用不断增加, 生产成本较高, 且受提纯技术和工艺限制, 只生产高纯度气体氦, 不生产液氦。塔里木盆地和田河气田氦气储量为 $0.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 目前实际产量约为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均氦含量为 0.32% , 折合氦气产能约为 $110 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 提氦装置设计每年可回收氦气约为 $90 \times 10^4 \text{ m}^3$, 氦产能和氦含量均高于威远气田(李玉宏等, 2022b)。2014 年以来, 中国 LNG-BOG 提氦技术与产能建设飞速发展, 将成为中国氦气战略资源保障的重要力量。中国科学院理化技术研究所国产大型低温制冷技术方面取得突破性发展, 实现了中国大型制冷系统从应用基础、关键设备到系统集成技术与能力的全面提升。

2020 年以来, 依托大型低温制冷技术孵化的北京中科富海低温科技有限公司, 在闪蒸汽提氦领域取得里程碑式突破, 成功研制出国内首套 LNG-BOG 低温提氦装置, 并与多家公司合作建成多条 LNG-BOG 提氦生产线, 形成了高纯氦气和液氦生产的自主关键技术和装备, 其中内蒙古兴圣天然气有限责任公司等已建成年提氦能力 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上工厂, 另有多家公司在建年提氦能力约为 $200 \times$

10^4 m^3 以上。此外, 国有油气企业的陕北 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 联产提氦项目、东胜-乌审旗 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 膜法+变温吸附提氦项目正在推进、陕北多个新建 LNG-BOG 提氦装置正在规划(李玉宏等, 2022b)。

4.2 未来展望

过去十年国际氦气市场反复出现供应短缺, 导致氦气备受关注, 涌现出大量的氦气相关公司, 出现“氦热”潮, 一些具有油气勘探或者采矿背景的公司也开始转向重视氦气勘探, 积极布局氦气产业发展, 挖掘氦气资源潜力。据外媒《Gasworld》报道, 大约有 30 家以上的初创公司在美国西南部、加拿大萨斯喀彻温省和阿尔伯塔省、塔桑尼亚、澳大利亚和南非等国家或地区从事氦气勘探(贾凌霄等, 2022), 印度尼西亚、韩国以及日本等也在积极进氦供应领域。这些公司中大约有 10 家已经上市交易。几乎所有这些公司都在积极寻求额外投资(Phil Kornbluth, 2022)。据彭博社报道, 从 2020 年 1 月上旬到 2021 年 6 月底, 氦一号(Helium One)市值几乎翻了 3 倍(高达 1.541 亿美元)。蓝星氦(Blue Star Helium)增长了 9 倍(高达 3 290 万美元), 加拿大皇家氦公司(RHC)增长了 86 倍(高达 6 050 万美元)。目前, 全球规模较大的提氦厂共计 19 家, 其中美国 15 家, 卡塔尔 1 家, 阿尔及利亚 1 家, 俄罗斯 1 家, 波兰 1 家。

2021~2025 年, 全球陆续有俄罗斯阿穆尔(Amour)、卡塔尔拉斯拉凡 3 期(Ras Laffan-3)、坦桑尼亚氦一号(Helium One)、阿尔及利亚提氦厂等工厂陆续投产(表 7), 届时预计产氦能力将增加 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 全球氦气供应量将达到 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 7 全球部分天然气提氦厂统计表
Tab. 7 Statistics of some natural gas helium extraction plants in the world

国家	所有者(运营者)	工厂名称(地点/气田)	氦年产能(万 m^3)	计划投产时间(年)
俄罗斯	俄罗斯天然气工业股份公司(Gazprom)	阿穆尔 1 期(Amour)	2 000	2021
俄罗斯	俄罗斯天然气工业股份公司(Gazprom)	阿穆尔 2 期(Amour)	2 000	2022
俄罗斯	俄罗斯天然气工业股份公司(Gazprom)	阿穆尔 3 期(Amour)	2 000	2024
俄罗斯	伊尔库茨克石油公司(INK)	雅拉克塔(Yarakta)	750	2021
俄罗斯	伊尔库茨克石油公司(INK)	马尔科夫斯科(Markovsk)	450	2025
卡塔尔	卡塔尔石油公司	拉斯拉凡 3 期(Ras Laffan-3)	1 200	2022
坦桑尼亚	氦一号公司(Helium One)	氦一号(Helium One)	2 800	2025
阿尔及利亚		阿尔及利亚提氦厂	1 000	项目已启动

俄罗斯天然气工业股份公司(Gazprom)2020年12月向市场宣称正在建设的阿穆尔天然气加工厂(Amour)提氦装置进展顺利,该项目始建于2015年,最后阶段应在2024年底开始生产。该工厂设计天然气处理能力达 $420 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,共有6条生产线。另外还有3个用于氦气精细净化、液化和包装的装置,每个装置的商业氦气容量为 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,三期建成后,氦气总容量达 $6\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。项目一期(包括两条生产线和一个氦气精细净化、液化和包装的装置)于2021年6月投产,将能够满足俄罗斯国内日益增长的氦气消费量以及全球约30%的市场。据俄罗斯天然气工业股份公司称,来自阿穆尔天然气加工厂的氦气将主要用于出口,并期望在氦气使用增长最快的亚洲与太平洋地区市场份额达到50%~60%,并有望成为氦气生产的全球领先者,在2030年取代美国成为氦第一大供应国。对于其海外运输,正在符拉迪沃斯托克建设一个大型的物流中心,吞吐量达每年4500个集装箱。俄罗斯将中俄东线天然气通过阿穆尔提氦厂处理后再输往中国,规划再建4座储氦库,新增氦储备能力达 $24 \times 10^8 \text{ m}^3$ (Gazprom Information Directorate,2021)。该公司主要优势在于其丰富的氦气资源和优越的地理位置,物流成本低廉,相对靠近亚洲区这一巨大的氦气消费市场,尤其是中国。国际机构预测,阿穆尔天然气加工厂的90%氦气将在30年内出口到中国(Edison,2021)。此外,俄罗斯伊尔库茨克石油公司(INK)计划从东西伯利亚的雅拉克塔(Yarakta)油气凝析气田的气体中提取氦气,分离提纯厂计划于2021年初投产,设计氦气年产能为 $750 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2025年将启动另一个氦气厂,将对来自马尔科夫斯科(Markovsk)气田的天然气进行提氦,设计年产能为 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

卡塔尔Ras Laffan-3最初计划于2018年开始生产,产能为 $1\,100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,目前由于疫情,推迟了该工厂的启动(贾凌霄等,2022)。当Ras Laffan-3工厂达到满负荷时,卡塔尔天然气公司(Qatar-gas)将占全球氦产量的约35%,总产能为 $7\,400 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (Omid Shokri Kalehsar,2021)。此外,卡塔尔石油公司宣布批准North Field East(NFE)项目,为全球上最大的液化天然气项目(Offshore Technology,2021),将作为NFE项目的一部分,将在Ras Laffan新建第4家氦工厂,设计年产氦气约

为 $4\,100 \times 10^4 \text{ m}^3$ (贾凌霄等,2022),到2028年氦气产量将再增加 $3\,400 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

坦桑尼亚Helium One公司主要从事数年前在坦桑尼亚大裂谷地区发现的非伴生氦气资源的甜点储区的勘探、开发、处理和销售一体化业务。公司目前拥有3个氦气项目:①鲁夸位于坦桑尼亚西南部,公司持有该区15个氦气勘探许可证,矿权面积 $3\,590 \text{ km}^2$,根据高分辨率航空重力测量和1100 km的地震剖面数据再处理确定了21个前景区和4个氦气线索(Helium lead),氦浓度高达10.2%,氦资源量约 $39.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,该项目于2021年6月宣布开始Tai-2探井钻探计划。②埃亚西位于坦桑尼亚中北部,公司持有该区1个氦气勘探许可证,矿权面积 260 km^2 ,氦浓度为4.3%。③巴朗吉达位于坦桑尼亚中北部,公司持有该区4个氦气勘探许可证,矿权面积 910 km^2 ,氦浓度高达10.6%(Helium One,2022)。考虑到该氦气资源量规模可供应当前全球氦气消费近20年,市场价值预计300亿美元,其开发利用或将改变全球氦气市场供应格局。坦桑尼亚主流媒体《公民报》2022年4月5日报道,坦桑尼亚预计2025年开始生产氦气。目前鲁夸瓦盆地、尼亚萨湖、埃亚西湖等地区氦气开采取得积极进展。尽管这些氦资源量还没有被充分探明,但氦一号(Helium One)公司认为坦桑尼亚可以提供独立于天然气的独立氦供应,可以根据市场需求,开启或关闭氦气的生产。值得注意的是,在实施钻探勘探井之前,笔者对该地区的商业潜力应保持谨慎。此外,该地区相对偏远,液化和出口氦气的经济性也是要面临的挑战因素(Edison,2017)。

2022年以来,随着卡塔尔和俄罗斯等大型项目的建设 and 投产,世界氦气供应格局进入新的阶段,两国大量额外氦气进入市场,可能导致氦气市场供应大幅宽松。到2026年,仅这2个国家每年就可能为世界增加约 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的氦气供应,按2%的年需求增长预测,届时氦气供应紧张的局面或许会得到缓解,到2030年后可能出现超过20%的供大于求。与此同时,随着美国关键供应源(美国土地管理局管理的阿马里洛氦气产输储体系)资源量减少、法定最低库存限制拍卖量和氦气系统逐步关闭的影响,美国氦气份额由2016年的55.63%下降到2021年的48.13%,预计未来十年将继续下降至20%以下。按此趋势预测,世界氦气供需格局或将迎来巨变。

预计 2030 年左右,世界氦气供应市场将由单极走向多元,世界氦气供应的 75% 将来自卡塔尔、俄罗斯和阿尔及利亚。

5 结论与建议

(1) 氦气在液体燃料火箭发射、深潜水等多个领域无可替代,是深刻影响中国“深空、深海、深地、深蓝”等领域高质量发展的重要关键性稀有气体资源。全球氦气资源储量和产量相对集中,主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯、波兰、澳大利亚等国,2021 年全球氦气总资源量和探明储量分别为 $519 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $121 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。受氦气资源分布制约,目前全球氦气产量分布亦较为集中,2021 年产量为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,氦气产量总体稳步增长,近十年呈震荡下行趋势。

(2) 全球氦气资源潜力巨大,产能发展态势良好。随着卡塔尔和俄罗斯大型提氦项目的建设和投产,卡塔尔与俄罗斯的氦气产量会超过美国,世界氦气供应的 75% 将来自卡塔尔、俄罗斯和阿尔及利亚,全球氦气供应市场将由单极走向多元,全球氦气供需格局或将迎来巨变。

(3) 面对世界氦气资源现有格局和发展热潮,以及国内对氦气资源的旺盛需求和极高对外依存度,中国氦气发展挑战与机遇并存,亟需开展氦气资源调查评价与勘查示范,建立健全国家氦气资源战略储备管理机制,构建多元化供应体系:①开展油气勘探开发的同时,应重视和兼顾氦气藏的勘探与研究;对已经投入开发的天然气田,应开展采样分析和资源评价,在新的油气藏勘探开发过程中,应重视对天然气组分中氦气的检测分析,当氦气达到工业品位时,气田储量计算时应同时计算伴生氦气储量。②对具有商业利用价值的含氦气藏,应充分分离天然气中的氦气资源;对氦含量未达到工业标准,应开展 LNG-BOG 提氦,以提高资源的开发与综合利用效率。③积极加强与俄罗斯在远东地区的氦气开发合作;在经济可行、技术可及基础上,与卡塔尔的氦气和油气生产企业共同探讨氦气开发利用的商业化战略合作;对于坦桑尼亚等一些氦气资源非常丰富的非洲国家,可探讨共同开发。

致谢:匿名评审专家为完善本文提出了建设性的意见与建议,在此致以诚挚谢意。

参考文献(References):

- 常兴浩,宋凯.巴什托构造石炭系小海子组高氦气藏成藏机理浅析[J].天然气工业,1997,17(2):18-20.
- CHANG Xinghao, SONG Kai. Analysis of Reservoir-Forming Mechanism of High-Hepool in the Carboniferous of Xiaohaizi Formation of Bashitou Structure[J]. Natural Gas Industry,1997,17(2):18-20.
- 车燕,姜慧超,穆星,等.花沟气田气藏类型及成藏规律[J].油气地质与采收率,2001,8(5):32-34.
- 陈踐发,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.
- 戴金星.威远气田成藏期及气源[J].石油实验地质,2003,25(5):473-480.
- DAI Jinxing. Pool-Forming Periods and Gas Source of Wei yuan Gasfield[J]. Petroleum Geology & Experimental, 2003,25(5):473-480.
- 杜金虎,杨华,徐春春,等.东西伯利亚地台碳酸盐岩成藏条件对我国油气勘探的启示[J].岩性油气藏,2013,25(3):1-8.
- DU Jinhu, YANG Hua, XU Chunchun, et al. Carbonate Reservoir Forming Conditions of East Siberia Platform and its Inspiration to Oil and Gas Exploration in China [J]. Lithologic Reservoirs, 2013,25(3):1-8.
- 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,2001a,21(5):27-30.
- FENG Zihui, HUO Qiuli, XUE Wang. A Study of Helium Reservoir Formation Characteristic in the North Part of Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry,2001,21(5):27-30.
- 冯子辉,钟延秋,王红娟.松辽盆地北部氦气资源勘探前景展望[J].资源·产业,2001b,(8):31-32.
- FENG Zihui, ZHONG Yanqiu, WANG Hongjuan. Expectation on He Resources Investigation in the North of Songliao Basin[J]. Resources and Industry, 2001,(8):31-32.
- 付晓飞,云金表,卢双舫,等.松辽盆地无机成因气富集规律研究[J].天然气工业,2005,25(10):14-17.
- FU Xiaofei, YUN Jinbiao, LU Shuangfang, et al. A Study of the Enrichment Law of Inorganic Genetic Gas in Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry,2005,25(10):

- 14-17.
- 顾延景,张保涛,李孝军,等. 济阳拗陷花沟地区氦气成藏控制因素探讨——以花501井为例[J]. 西北地质, 2022, 55(3):257-266.
- GU Yanjing, ZHANG Baotao, LI Xiaojun, et al. Discussion on Helium Resource Accumulation Mechanism in Huangou Area of Jiyang Depression: Taking Well Hua 501 as an Example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 257-266.
- 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.
- 韩元红,罗厚勇,薛宇泽,等. 渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 277-287.
- HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and Helium Enrichment Mechanism of Geothermal Water-Associated Gas in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2):277-287.
- 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.
- 贾凌霄,马冰,王欢,等. 全球氦气勘探开发进展与利用现状[J/OL]. 中国地质, 2022: 1-16 [2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220316.1137.008.html>
- JIA Lingxiao, MA Bing, WANG Huan, et al. Global Helium Exploration and Development Progress and Utilization Status[J/OL]. Geology in China, 2022:1-16[2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220316.1137.008.html>
- 李济远,李玉宏,胡少华,等. “山西式”氦气成藏模式及其意义[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(3):529-536.
- LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi-type” Helium Accumulation Model and its Essentiality[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3):529-536.
- 李玉宏,李济远,周俊林,等. 氦气资源评价相关问题认识与进展[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 363-373.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Research Progress and New Views on Evaluation of Helium Resources[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022a, 44(3):363-373.
- 李玉宏,李济远,周俊林,等. 国内外氦气资源勘探开发现状及其对中国的启示[J]. 西北地质, 2022b, 55(3): 233-240.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and Development Status of Helium Resources and its Implications for China[J]. Northwestern Geology, 2022b, 55(3):233-240.
- 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 Jincan, 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.
- 李玉宏,王行运,韩伟. 渭河盆地氦气资源远景调查进展与成果[J]. 中国地质调查, 2015, 2(6):1-6.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Progress and Achievements of Helium Gas Resources Survey in Weihe Basin[J]. Geological Survey of China, 2015, 2(6):1-6.
- 李玉宏,王行运,韩伟. 陕西渭河盆地氦气资源赋存状态及其意义[J]. 地质通报, 2016, 35(2-3):372-378.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Mode of Occurrence of Helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and its Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2-3):372-378.
- 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(04): 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(04):495-501.
- 李玉宏,周俊林,张文,等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京:地质出版社, 2018:1-289.
- LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in the Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018:1-289.
- 刘浩. 秦岭北部中生代高U、Th花岗岩体与渭河盆地氦气聚集区相关性分析[J]. 地下水, 2021, 43(5):152-154.
- LIU Hao. Correlation Analysis of Mesozoic High U、Th Granites in Northern Qinling and Helium Accumulation Area in Wei River Basin[J]. Underground Water, 2021, 43(5):152-154.

- 刘建朝,李荣西,魏刚峰,等.渭河盆地地热水水溶氦气成因与来源研究[J].地质科技情报,2009,28(6):84-88.
- LIU Jianchao, LI Rongxi, WEI Gangfeng, et al. Origin and Source of Soluble Helium Gas in Geothermal Water, Weihe Basin [J]. Bulletin of Geological science and Technology, 2009,28(6):84-88.
- 刘琼,陶维祥,于水,等.西非下刚果-刚果扇盆地圈闭类型和分布特征[J].地质科技情报,2013,32(3):107-112.
- LIU Qiong, TAO Weixiang, YU Shui, et al. Trap Types and Distribution of Lower Congo-Congo Fan Basin in West Afri[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2013,32(3):107-112.
- 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, 2022a,33(8):1-17.
- 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, 2022a,33(8):1-17.
- 秦胜飞,李济远,王佳美,等.中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J].天然气工业,2022b,42(7):125-134.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, WANG Jiamei, et al. Helium Enrichment Model of Helium-Rich Gas Reservoirs in Petroliferous Basins in China[J]. Natural Gas Industry, 2022b, 42(7):125-134.
- 冉利民.渭河盆地水溶氦气测井识别方法及解释标准[J].测井技术,2014,38(6):760-764.
- RAN Limin. Log Identification Methods and Interpretation Criteria of Water Soluble Helium in WeiHe Basin[J]. Well Logging Technology, 2014,38(6):760-764.
- 陶明信,徐永昌,韩文功,等.中国东部幔源流体的活动特征与成藏效应[J].大地构造与成矿学,2001,25(3):265-270.
- TAO Mingxin, XU Yongchang, HAN Wengong, et al. Active Characteristics and Accumulative Effects of Mantle-Derived Fluids in Eastern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001,25(3):265-270.
- 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.
- 王佩业,宋涛,真允庆,等.四川威远气田:幔壳混源成因的典型范例[J].地质找矿论丛,2011,26(1):63-73.
- WANG Peiye, SONG Tao, ZHEN Yunqing, et al. Sichuan Weiyuan Gas Field: a Typical Example for Mantle-Crust Source[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2011,26(1):63-73.
- 徐思煌,曹婷婷, W. L. Watney. 潘汉得——胡果顿与普光气田形成条件对比及启示[J].新疆石油地质,2012,33(4):502-506.
- XU Sihuang, CAO Tingting, W L Watney. Formation Conditions of Panhandle-Hugoton Gas Field in North America and Puguang Gas Field in Sichuan Basin of China: Contrast and Revelation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012,33(4):502-506.
- 徐永昌.天然气中氦同位素分布及构造环境[J].地学前缘, 1997,4(3-4):185-190.
- XU Yongchang. Helium Isotope Distribution of Natural Gasses and its Structural Setting [J]. Earth Science Frontiers, 1997,4(3-4):185-190.
- 杨玉峰,张秋,黄海平,等.松辽盆地徐家围子断陷无机成因天然气及其成藏模式[J].地学前缘,2000,7(4):523-533.
- YANG Yufeng, ZHANG Qiu, HUANG Haiping, et al. Abiogenic Natural Gases and their Accumulation Model in Xujiaweizi Area, Songliao Basin, Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2000,7(4):523-533.
- 杨振宇,李永红,刘文进,等.柴达木盆地北缘全吉山地区氦气形成地质条件及资源远景分析[J].中国煤炭地质, 2018,30(6):64-70.
- YANG Zhenning, LI Yonghong, LIU Wenjin, et al. Geological Conditions of Helium Formation and Resource Prospect Analysis in Quanjishan Area, Northern Qaidam Basin[J]. Coal Geology of China, 2018,30(6):64-70.
- 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.
- 张福礼,孙启邦,王行运,等.渭河盆地水溶氦气资源评价[J].地质力学学报,2012,18(2):195-202.
- ZHANG Fuli, SUN Qibang, WANG Xingyun, et al. Evaluation of Water Soluble Helium Resources in Weihe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2012,18(2):195-202.
- 张瑾.渭河盆地水溶氦气分布特征与富集规律研究[J].中国化工贸易,2018,(7):253-254.
- 张明升,张金功,张建坤,等.氦气成藏研究进展[J].地下水, 2014,36(3):189-191.
- 张宁,胡忠军,李青.全球氦供求形势及其回收利用[J].低温与特气,2010,28(6):1-6.

- ZHANG Ning, HU Zhongjun, LI Qing. Global Supply and Demand Situation and the Recovery of Helium[J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2010, 28(6):1-6.
- 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.
- 张晓宝, 周飞, 曹占元, 等. 柴达木盆地东坪氦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.
- 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.
- 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.
- 张子枢. 地球深源气研究概述[J]. *天然气地球科学*, 1992, (3):11-14.
- Aali Jafar, Rahmani Omeid. H₂S—Origin in South Pars Gas Field From Persian Gulf, Iran[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 86-87:217-224.
- Alsharhan A S, Nairn A E M. Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East[M]. Amsterdam, Elsevier, 1997.
- 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.
- Ballentine C J, Barfod D N. The Origin of Air-Like Noble Gases in MORB and OIB[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 180(1-2):39-48.
- Ballentine C, Barry P, Fontijn K, et al. Continental Rifting and ⁴He Reserves[C]. Paris: Goldschmidt 2017, 2017.
- Boreham C J, Edwards D S, Poreda R J, et al. Helium in the Australian Liquefied Natural Gas Economy[J]. *The APPEA Journal*, 2018, 58(1):209.
- Broadhead R. F. Helium in New Mexico; Geologic Distribution, Resource Demand, and Exploration Possibilities [J]. *New Mexico Geology*, 2005, 27(4):93-101.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[R]. New Orleans, Louisiana, USA, 2010, 11-14.
- Burgess P M. Chapter 2 Phanerozoic Evolution of the Sedimentary Cover of the North American Craton[M]. *Sedimentary Basins of the World*, Miall Andrewd, Elsevier, 2008, 5, 31-63.
- Burgess P M. Chapter 2-Phanerozoic Evolution of the Sedimentary Cover of the North American Craton[M]. *The Sedimentary Basins of the United States and Canada (Second Edition)*, Miall Andrewd, Elsevier, 2019, 39-75.
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Qin Shengfei, et al. Geochemical Characteristics of He and CO₂ From the Ordos(Cratonic) and Bohai Bay(Rift) Basins in China[J]. *Chemical Geology*, 2017, 469:192-213.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson C G, et al. New High-Grade Helium Discoveries in Tanzania[J]. V. M. Goldschmidt Conference-Program and Abstracts, 2016, 26:595.
- Danabalan D. Helium: Exploration Methodology for a Strategic Resource[Z]. Durham University:2017. <https://go.exlibris.link/DSQb1VYJ>.
- Edison. Global Helium Market Update[R]. 2017.
- Edison. Global Helium Market Update[R]. 2021.
- Galeazzi S, Point O, Haddadi N, et al. Regional Geology and Petroleum Systems of the Illizi-Berkine Area of the Algerian Saharan Platform: An Overview[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1):143-178.
- Gazprom Information Directorate. World'S Biggest Helium Hub Comes Onstream [EB/OL]. 2021. <https://www.gazprom.com/press/news/2021/september/article536871/>.
- Halford D T, Karolytè R, Barry P H, et al. High Helium Reservoirs in the Four Corners Area of the Colorado Plateau, USA[J]. *Chemical Geology*, 2022, 596:120790.
- Helium One. Rukwa[EB/OL]. 2022. <http://www.helium-one.com/rukwa/>.
- Holail H M, Kolkas M M, Friedman G M. Facies Analysis and Petrophysical Properties of the Lithologies of the North Gas Field, Qatar[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2006, 21(1):40-50.
- Hooker Benjamin. Helium in Russia. In: *The Future of Helium as a Natural Resource* [M]. Routledge, 2012;

- 88-100.
- Johnson Elizabeth. Helium in Northeastern British Columbia [R]. 2013.
- Kilembe E A, Rosendahl B R, Ebinger C J, et al. Structure and Stratigraphy of the Rukwa Rift[J]. *Tectonophysics*, 1992, 209(1-4):143-158.
- Konert G, Afifi A M, Al-Hajri S A, et al. Paleozoic Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Arabian Plate [J]. *GeoArabia*, 2001,6(3):407-442.
- Lüning S, Craig J, Loydell D K, et al. Lower Silurian ‘Hot Shales’ in North Africa and Arabia: Regional Distribution and Depositional Model [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49(1):121-200.
- Macheyeki Athanas S, Delvaux Damien, Batist Marc De, et al. Fault Kinematics and Tectonic Stress in the Seismically Active Manyara-Dodoma Rift Segment in Central Tanzania-Implications for the East African Rift [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2008, 51 (4): 163-188.
- Makhous M, Galushkin Yu. I. Burial History and Thermal Evolution of the Northern and Eastern Saharan Basins [J]. *AAPG Bulletin*, 2003,87(10):1623-1651.
- Mamyrin B, Tolstikhin Igor. Helium Isotopes in Nature [M]. Amsterdam: Elsevier, 1986.
- Mitra Shankar, Leslie William. Three-Dimensional Struaural Model of the Rhourde El Baguel Field, Algeria [J]. *AAPG Bulletin*, 2003,87(2): 231-250.
- Morley C K, Cunningham S M, Harper R M, et al. Geology and Geophysics of the Rukwa Rift, East Africa [J]. *Tectonics*, 1992,11(1).
- Nuttall William James, Clarke Richard H, Glowacki Bartek A. The Future of Helium as a Natural Resource [C]. 2012.
- Offshore Technology. Qatar Petroleum Makes FID On \$28.7Bn North Field East Project [EB/OL]. 2021. <https://www.offshore-technology.com/news/qatar-petroleum-makes-fid-on-28-7bn-north-field-east-project/>.
- Omid Shokri Kalehsar. A Rising Role: Qatar and its Competition in the Global Helium Market[EB/OL]. 2021. <https://gulfif.org/a-rising-role-qatar-and-its-competition-in-the-global-helium-market/>.
- Pacheco N. Helium, Mineral Commodity Summaries, Helium[Z]. Government Printing Office, 2002,78-79.
- Parham K D, Campbell J A. Wolf-Campian Shallow-Shelf carbonate-Hugoton Embayment, Kansas and Oklahoma [R]. Atlas of major mid-continent gas reservoirs; Bureau of Economic Geology, University of Texas (Austin), 1993:9-12.
- Phil Kornbluth. Helium Start-Up Activity at Unprecedented Levels [EB/OL]. 2022. <https://www.gasworld.com/helium-start-up-activity-at-unprecedented-levels/2021048.article>.
- Pippin Lloyd. Panhandle-Hugoton Field, Texas-Oklahoma-Kansas—the First Fifty Years1[Z]. American Association of Petroleum Geologists; 1970, 14, 0. <https://doi.org/10.1306/M14368C9>.
- Polish Geological Institute. List of Helium Fields in Poland as of 31. XII. 2021[EB/OL]. 2021. <https://geoportal.pgi.gov.pl/surowce/energetyczne/hel/2021>.
- Provornaya I V, Filimonova I V, Eder L V, et al. Prospects for the Global Helium Industry Development[J]. *Energy Reports*, 2022, 8:110-115.
- Qatargas. Ras Laffan Helium [EB/OL]. 2021. <https://www.qatargas.com/english/operations/ras-laffan-helium>.
- Rafik Baouche, Kamel Baddari. Prediction of Permeability and Porosity from Well Log Data Using the Nonparametric Regression with Multivariate Analysis and Neural Network, Hassi R'Mel Field, Algeria[J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, 26(3):763-778.
- Rahmani Omeid, Aali Jafar, Mohseni Hassan, et al. Organic Geochemistry of Gadvan and Kazhdumi Formations (Cretaceous) in South Pars Field, Persian Gulf, Iran [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70(1-2):57-66.
- Sorenson R P. A Dynamic Model for the Permian Panhandle and Hugoton Fields, Western Anadarko Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(7):921-938.
- Talamali Salima, Chaouchi Rabah, Benayad Soumya. Sedimentological Evolution of the Lower Series Formation in the Southern Area of the Hassi R'Mel Field, Saharan Platform, Algeria[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9.
- USGS. Mineral Commodity Summaries 2022[Z]. U. S. Geological Survey, 2022.
- Yakutseni V. P. World Helium Resources and the Perspectives of Helium Industry Development [J]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2014, 9.
- Zhang Wen, Li Yuhong, Zhao Fenghua, et al. Granite is an Effective Helium Source Rock: Insights from the Helium Generation and Release Characteristics in Granites from the North Qinling Orogen, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1):114-125.