

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 Yu-hong, LI Ji-yuan, ZHOU Jun-lin, et al. Research Progress and New Views on Evaluation of Helium Resources[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 363-373.

DOI: 10.19814/j.jese.2021.11008

· 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 ·

氦气资源评价相关问题认识与进展

李玉宏^{1,2}, 李济远², 周俊林^{1*}, 赵峰华², 徐 聃¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 氦气是重要的稀有战略资源, 全球供应短缺, 中国长期依赖进口, 近年来其重要性逐步得到相关业界和政府部门的重视。为了认识氦气成藏的特殊性, 总结氦气资源调查评价方法, 指导氦气调查工作, 基于长期氦气资源评价工作经验和认识, 对氦气成藏特征、调查评价方法等相关问题进行了讨论。结果表明: 氦气属典型的“弱源气”, 以溶解态或伴生气形式混储于天然气藏中, 氦气与天然气成藏的关联性 & 差异性 是认识氦气成藏规律、有效开展氦气调查评价的关键; 有效氦源、高效运移通道(断裂、不整合)和适度的载体气藏是氦气富集成藏的基本条件; 地质、物化探综合评价有利区, 氦气气测录井标定富集层段, 是有效的调查方法。根据氦气成藏特殊性 & 中国氦气资源调查现状, 认为中国氦气资源前景良好。低品位氦资源的有效利用是实现短期提升氦气资源保障水平的现实途径, 加强(天然)气-氦兼探、寻找富氦天然气是中长期提高中国氦气资源保障水平的重要途径, 开展国际合作和建立战略储备体系是氦气资源多元保障的有效补充。

关键词: 氦气; 天然气; 调查评价; 氦源; 成藏; 关联性与差异性; 工业利用; 资源保障

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2022)03-0363-11

Research Progress and New Views on Evaluation of Helium Resources

LI Yu-hong^{1,2}, LI Ji-yuan², ZHOU Jun-lin^{1*}, ZHAO Feng-hua², XU Dan¹

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Helium is an important rare strategic resource, and the global supply is short, China has long relied on imports. In recent years, its importance has gradually attracted the attention of relevant industries and government. To understand the particularity of helium accumulation, summarize the investigation and evaluation methods of helium resources, and guide the investigation and evaluation of helium, based on the summary of long-term experience and understanding of helium resource evaluation, the characteristics of helium reservoir formation, investigation and evaluation methods, and other related issues are discussed. It is recognized that helium is a typical “weak source gas”, which is stored as associated with natural gas reservoirs or dissolved in geofluid, and the correlation and difference of helium and natural gas accumulation are the keys to understand the law of helium accumulation and effectively carry out helium

收稿日期: 2021-11-04; 修回日期: 2022-01-27

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA0719003); 国家自然科学基金项目(41572131);

中国地质调查局地质调查项目(DD20190103)

作者简介: 李玉宏(1968-), 男, 陕西甘泉人, 中国地质调查局西安地质调查中心正高级工程师, 理学博士, E-mail: L1763@tom.com。

* 通讯作者: 周俊林(1986-), 男, 陕西横山人, 工程师, E-mail: zjunlin@mail.cgs.gov.cn。

investigation and evaluation. Effective helium sources, efficient migration channels (faults, unconformities), and moderate carrier gas reservoirs are the basic conditions for helium enrichment and accumulation. The investigation methods of demarcating the enrichment zone by helium logging in the favorable areas for comprehensive evaluation of geological, geophysical and geochemical exploration are summarized. According to the particularity of helium accumulation and the analysis of the investigation status of helium resources in China, it is pointed out that the prospect of helium resources in China is good. The effective use of low-grade helium resources is a realistic way to improve the level of helium resource security in the short term; strengthening the simultaneous exploration of natural gas and helium, and finding helium-rich natural gas reservoirs are important ways to improve the guarantee level of helium resources in China in the medium and long term; international cooperation and the establishment of a strategic reserve system are effective supplements to the diversified guarantee of helium resources.

Key words: helium gas; natural gas; investigation and evaluation; helium source; accumulation; correlation and difference; industrial utilization; resource guarantee

0 引言

氦气广泛应用于国防和高新技术领域,是重要的稀有战略资源。目前,全球氦气年需求量约为 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,但年产量不足 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,供需矛盾突出。中国氦气供应长期严重依赖进口,年进口量约为 $2\,800 \times 10^4 \text{ m}^3$,对外依存度超过 95%,资源安全形势极其严峻^[1-2]。20 世纪 70 年代,西方国家就曾把氦气列入对华禁运物资之一;2007 年氦气被美国核定为战略储备资源,限制产量;2018 年以来,美国、欧盟、澳大利亚、加拿大等国家或组织先后将氦气列为关键矿产,限制出口量及应用领域。

氦气成藏研究的经典成果由 Brown 于 2010 年发表^[3];20 世纪末期,中国学者对氦气等稀有气体研究成果进行了学习引进^[4-6],并以流体示踪为重点开展了系统的氦气及其同位素研究,取得了大量重要成果^[7-10]。长期以来将氦气作为独立资源勘探的研究甚少。2009 年以来,中国地质调查局西安地质调查中心氦气调查研究团队联合西北大学、长安大学、西安石油大学、陕西金奥能源开发有限责任公司等单位,依托渭河盆地开展了长期的氦气资源调查研究工作,并逐步形成了一支涵盖理论研究、地质勘查、提取利用的中国地质调查局、勘查企业、中国科学院参与的联合团队构架,提出了氦气“弱源成藏”概念,关注了氦气成藏与天然气(载体气)的关联性与差异性,取得了一系列成果^[11-14],出版了中国氦气资源调查的首部综合性专著,促成中国新一轮“氦气热”。近年来,关注氦气资源的研究人员逐渐增多,各位同行对国内外氦气资源分布状况进行了进一步

整理,但对氦气成藏的特殊性认识依然有限^[15-23]。本文根据长期氦气资源评价工作所取得的经验和认识,探讨了氦气成藏的“弱源性”、氦气富集与天然气(载体气)藏的关系、氦源岩及工业氦气藏类型等氦气成藏的特殊性及工业氦气提取方式,讨论了氦气资源调查评价方法等氦气资源调查研究相关问题,并根据氦气成藏的特殊性及中国氦气资源调查现状,提出了中国氦气资源保障途径。

1 氦气资源评价中的若干问题讨论

1.1 氦气成藏的特殊性(弱源气)

He 主要有大气源、壳源(放射性来源)和幔源等 3 个来源^[24]。目前,工业利用的氦气主要为放射性成因的壳源氦,它是由岩石、矿物中的 U、Th 发生放射性衰变产生的,主要是 ^4He ,放射衰变反应为:① $^{238}\text{U} \rightarrow 8\ ^4\text{He} + 6\beta + ^{206}\text{Pb}$;② $^{235}\text{U} \rightarrow 7\ ^4\text{He} + 4\beta + ^{207}\text{Pb}$;③ $^{232}\text{Th} \rightarrow 6\ ^4\text{He} + 4\beta + ^{208}\text{Pb}$ (表 1)。幔源氦是地幔通过岩浆活动发生脱气作用释放的,主要表现为 ^3He 同位素的显著升高。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} ^[25]。大气源氦是壳源氦、幔源氦混合的结果,大气源氦中幔源氦贡献率较高(约 12.5%),高于多数天然气藏中的幔源氦贡献。由于壳源氦的 ^3He 丰度较幔源氦低了 3 个数量级,大气源氦的同位素比值更接近于幔源氦。自然界中仅一些在构造活动区的天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值达到或超过大气,表明有较多幔源氦贡献,但天然气规模有限,多数发现的含(富)氦天然气以壳源氦贡献为主。

表 1 主要以⁴He 为衰变产物元素的反应速率

Table 1 Reaction Rates of the Decay Product Elements Which Is Mainly ⁴He

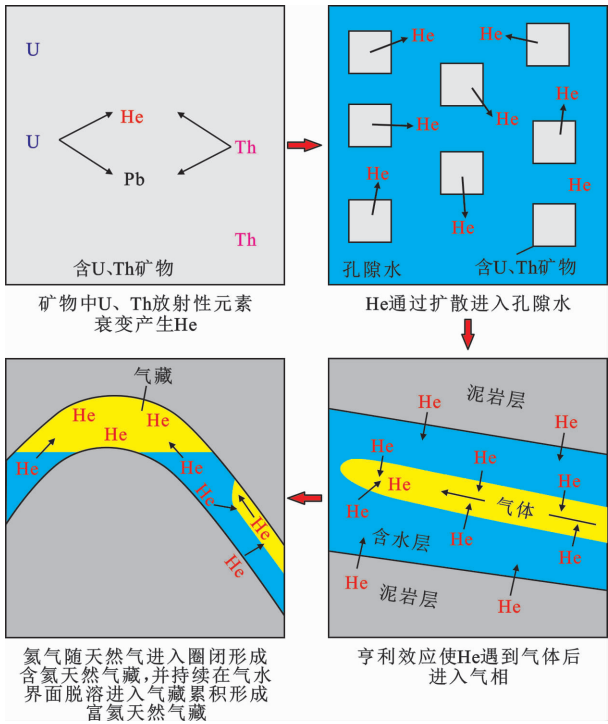
母体	半衰期/10 ⁹ 年	子体	产额 (原子/原子)	母体原子量	原子丰度/%	稀有气体产量/(m ³ STP · kg ⁻¹)	
						产率(每年)	积累量(1 个半衰期)
²³² Th	14. 010 0	⁴ He	6	232. 038	100. 00	2. 868×10 ⁻⁸	579. 600
²³⁸ U	4. 468 0	⁴ He	8	238. 029	99. 28	11. 602×10 ⁻⁸	747. 900
²³⁵ U	0. 704 8	⁴ He	7	235. 044	0. 72	0. 467×10 ⁻⁸	4. 746

烃源岩热演化过程中,生气高峰阶段通常大量生气,在该时期生成的天然气可突破“压力封存箱”,从烃源岩排出(初次运移),之后主要以游离态形式在浮力驱动下进入圈闭成藏(二次运移)。而地质体中 U、Th 等氦源元素丰度低,半衰期极长,生氦速率极低(1 km³ 地质体年生氦量以升计),不存在集中生气高峰,难以发生突破“压力封存箱”的大规模集中排气形成气柱,在浮力驱动下进入圈闭形成氦气藏,具有典型的“弱源性”^[26-27]。氦气的“弱源性”是影响其成藏过程与天然气(烃类)差异性的最重要因素。

1.2 为何氦气富集需有天然气藏?

在盆地地下水的补给区,大气中的氦气会溶解到补给水中,随着地下水从补给区向排泄区运移,最终运移到油气藏中;但由于 He 溶解度极低,这类氦对氦气成藏的贡献非常有限。由于氦气的“弱源性”,矿物中生成的 He 从固体颗粒运移到孔隙水中后,主要溶解在孔隙水中并不断积累(图 1)。Sathaye 等认为氦气在孔隙水中的扩散速度是非常缓慢的,必须通过流体的大规模运移才能实现远距离的迁移^[28-29]。

目前,世界范围内尚未发现以氦气为主的天然气聚集,而是伴生于载体天然气气藏中。亨利定律在氦气的运移、成藏和保存过程发挥着至关重要的作用^[3,26,30]。首先,油气运移过程中,CH₄ 等天然气通过含氦地质体及含氦孔隙、裂隙水时,遵从亨利定律,多组分气体竞争性溶解,氦气更趋向于进入气相(图 1),脱溶氦气随着天然气一起运移进入载体气藏。另外,富(含)氦地下水向上运移过程中,含氦流体一旦遇到天然气(有机、无机)藏,低体积分数(低分压)和高亨利系数的溶解氦将因溶解度降低而脱溶,He 从水溶态转变为游离态而进入气藏,CH₄ 等游离态天然气因高分压、低亨利系数被置换进入水中,并导致气藏附近水体中溶解氦丰度的降低,形成低浓度漏斗,使渗流系统内水溶氦向气藏附近迁移,最终绝大部分进入气藏,大大提高了氦气的运聚系数,很好地弥补了氦气因弱源而难以成藏的问题。



图件引自文献[3],有所修改

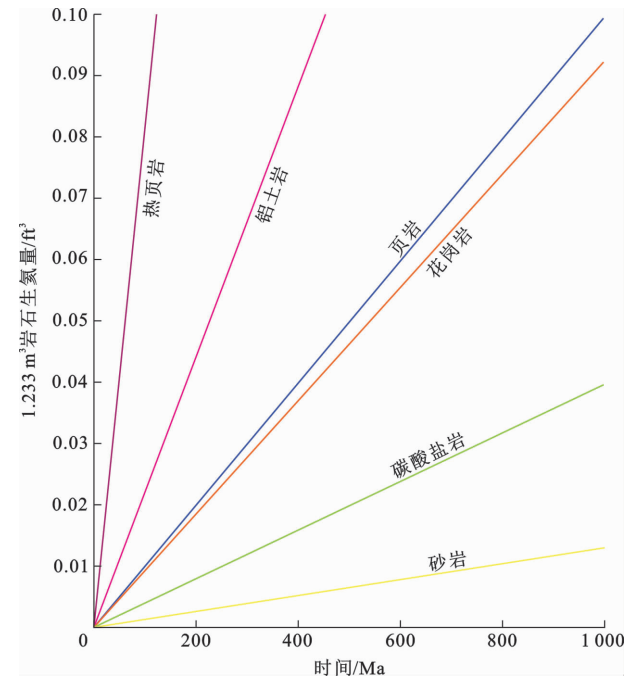
图 1 氦气运移富集模式

Fig. 1 Mode of Helium Migration and Enrichment

气藏中氦气长期积累,积少成多,便可形成富氦天然气藏(图 1)。因此,天然气藏(载体气藏)及其运移过程是 He 进入气相形成富氦天然气藏的关键因素。

1.3 氦源岩及为何天然气田多数贫氦?

大量研究表明,U、Th 广泛赋存于岩石中,盆地基底、岩体、沉积地层都可成为潜在的氦源,但多数地质体都是“贫乏”的氦源岩,需要巨大的岩石体积和漫长的地质时间来产生 He^[3,29,31-32]。除铀矿(硬岩型、砂岩型等)之外,变质岩和岩浆岩中花岗岩类(酸性岩)U、Th 含量较高;与沉积岩相比,花岗岩 U、Th 含量居中,普通砂岩生氦潜力小,一般泥页岩具有与花岗岩相近的生氦潜力,而富有机质泥页岩(烃源岩)中 U、Th 含量高于花岗岩(图 2),且烃源岩中生成的氦气具有与烃类气一起运移成藏的潜力,应该是更有效的氦源岩。然而,事实是以泥页岩为烃源岩的天然气藏中并未形成广泛的氦气富集。



图件引自文献[3],有所修改

图 2 不同岩石氦气产率比较

Fig. 2 Comparison of Helium Gas Yields Among Different Rocks

Brown 通过计算发现,生烃潜量为每克岩石 2 mg 碳氢化合物(HC)的有机质页岩成熟后产生的甲烷气体量是其 10 亿年产生氦气的 3 000 倍^[3]。因此,在没有外部氦源的情况下,很难形成具有工业价值的氦气聚集。由此可见,烃源岩是品质良好的氦源岩,但因其生烃能力太强,只能作为天然气普遍含氮的本底氦源岩,独立形成富氮天然气的可能性不大。富氮天然气的形成需要再配备生氮能力较好、但不生烃或弱生烃能力的外部氮源岩,例如花岗岩、铝土岩等。从美国 Panhandle-Hugoton、Cliffside,中国四川威远、塔里木盆地西南坳陷巴什托等富氮气田来看,氦气田下部均有巨大、古老的花岗岩体,这些岩体可能是氦气的有效源岩。由于放射性物质产生氦气是一个漫长的积累过程,所以那些规模巨大、形成年代古老、构造改造较强的岩体及盆地基底更有可能成为氦气富集的有效源岩,而富 U、Th 的沉积岩则是基础氮源岩,富氮天然气形成则还需其他氮源岩有效补充。

1.4 工业氦气藏类型

气体在水中的溶解度受温度、压力、气体体积分数和气体种类等的影响。在这 4 个参数中,压力和气体体积分数决定了气体的分压,对气体的溶解度具有决定性影响。温度和气体种类决定了亨利常数,对气体的溶解度影响较小。由此可见,多组分气

体竞争性溶解时除了气相各组分的亨利常数(表征不同气体溶于水的难易程度)之外,气相中各组分分压对气-液(溶解态)转化的影响巨大。而稀有气体氦气在气藏中所占体积分数极低即可成矿^[26],是“弱源”氮能够形成工业气藏的重要因素。

目前发现的工业氦气载体气藏有甲烷、氮气、二氧化碳等 3 种类型,其中以富氮甲烷气藏为主,也发现诸多规模较小的高含氮氮气藏。这与工业勘探主要针对烃类气藏有关,也受不同气藏成因影响。在油气区,富氮天然气为异源同储成因,含氮流体在运移通道上发育天然气藏时,遵从亨利定律,氦气因在气藏中的低丰度而分压降低幅度远高于深度减小引起的压力降低,更容易在气水(流体)界面脱溶进入载体气中积累,形成富氮天然气藏。由于氮源多在深部,位于含氮流体运移通道前端 的深部天然气藏在氮源不足 的背景下,因“近水楼台先得月”可优先“捕获”氮 气,比运移通道后端的天然气藏富氮,不在运移通道上的天然气藏难以“捕获”氮 气而贫氮(图 3)。在非油气区,深源流体向上运移过程中未遇到载体气藏时,深部高压溶解的氮 气-氮 气一直向上疏 导,至浅部时降压脱溶形成氮 气-氮 气藏,为同源同储,浅部更为有利。由于氮 气-氮 气藏未像油区气藏那样经历外部异源气的稀释,所以 He 丰度高。而在壳幔双源氮 气区,还可能有有机气与无机气一起形成混源同储气藏,形成机制更为复杂;这些地区一般为构造复杂区,保存条件较差,需加强 CO₂ 生成碳酸盐矿物的自封闭作用在混合气藏保存中的作用,CO₂ 的消耗也有利于氮 气丰度的提高,同样过多的 CO₂、CH₄ 等外源气也是稀释气。

1.5 工业氦气来源(如何生产)

氮气的生产方法可以有 4 种:①天然气分

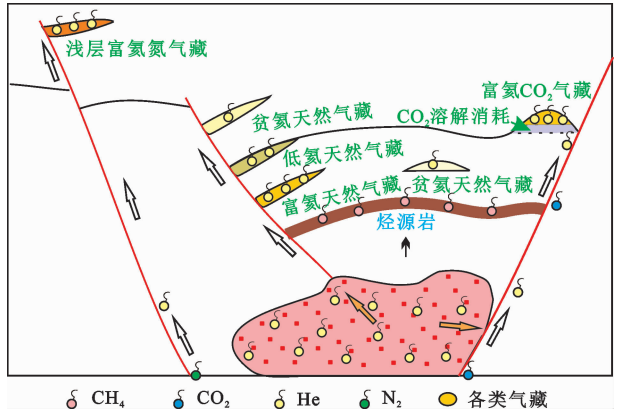


图 3 流体脱氮充注于载体气藏示意图

Fig. 3 Cartoon Illustrating the Fluid-derived Helium into the Carrier Gas Reservoir

离法,以含有 He 的天然气为原料液化分馏得到纯氦;②合成氨法,在合成氨中,从尾气经分离提纯可得到 He;③空气法,从液态空气中用分馏法从氮氦混合气中提出;④铀矿石法,将含 He 的铀矿石经过焙烧,分离出气体,再经过化学方法,除去水蒸气、氢气和二氧化碳等杂质提纯出 He。天然气分离法是目前工业氦气生产的主要来源,又分为富氦天然气提氦和液化天然气尾气提氦。富氦天然气直接提氦的氦气工业品位一般认为是 0.1%,多数工业利用的富氦天然气 He 含量(体积分数,下同)在 0.3%左右,高含氦天然气很少。液化天然气(LNG)尾气(不凝气,BOG)提氦发展潜力巨大,LNG 所用原料气 He 含量在 0.04%左右即可提氦利用(图 4),如卡塔尔北方气田、中国宁夏盐池地区。

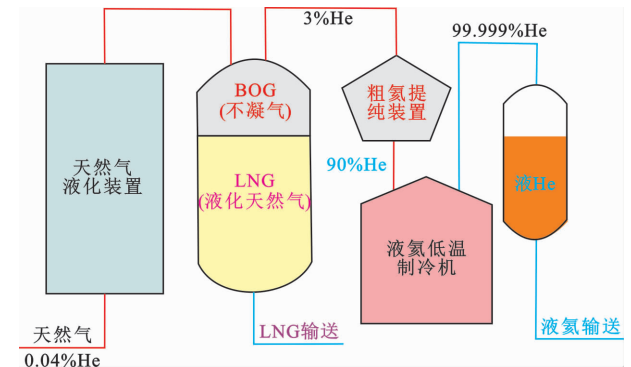


图 4 宁夏盐池地区 LNG-BOG 提氦流程图

Fig. 4 Schematic View of Helium Purified by LNG-BOG Process Flow in Yanchi Area of Ningxia

1.6 氦气富集地质背景及中国氦气资源前景

已知富氦天然气藏多位于克拉通内隆起及克拉通边缘活化带,陆内裂谷盆地是目前的勘探热点(表 2)。富氦天然气藏的形成需要有 2 个条件的适当匹配。一是作为异源同储气藏的氦源和载体气气源合理配置,没有载体气藏,氦气难以脱溶成藏,而有限的氦资源注入到大气藏中,则因过度稀释而丰度不足(有量无质),载体气藏太小则难以维持合理的生产时间,不利于工业开发(有质无量),只有氦资源与载体气资源配合适当,才能形成相对量(品位)与绝对量(体量)均衡的工业性富氦天然气藏。二是合适的地质活动性,既发育运移通道,还具有保存条件。氦源一般较气藏埋藏更深,生成的氦资源更分散,没有一定的地质活动性和断裂等高效运移通道,深部氦资源难以有效运移到载体气藏处完成充注、富集,而地质活动太强则没有保存条件。因此,富氦天然气成藏需要活动性与稳定性恰当配置,即富氦天然气藏多发育于稳定区的活动带或活动区的稳定带,

如克拉通内隆起及克拉通边缘活化带(表 2)。

中国含油气盆地具有碎(块体碎小)、动(活动性强)、热(热事件频繁)、小(中小型气藏发育)的地质特点,富 U、Th 岩体及古老基底(生氦累积时间长)等氦源岩丰富,高效运移通道发育,天然气成藏类型多样,能够形成一些规模适中的载体气藏,有利于富氦天然气藏形成,特别是大型克拉通盆地的隆起区及边缘活化带等。中国氦气资源调查程度极低,认识不够,家底不清,发现的氦气资源极少,但是中国氦气资源成藏基本条件良好^[1]。已有地质调查成果也表明,中国氦气资源分布广泛(一区一带,以壳源氦为主的中西部地区叠合盆地及幔源氦贡献较大的郯庐断裂带周缘盆地),层位众多(表 3)^[16-17,32-35],急需将点上发现在面上展开,形成和扩大资源规模。

1.7 氦气赋存状态与水溶气利用前景

气体赋存状态有游离态、溶解态、吸附态、水合态。与氦气相关的有 2 种:①常规气,He 与载体气一起以游离态赋存于圈闭中,是目前工业利用的主要原料气;②水溶气,He 等以非饱和溶解态赋存于地层水中,开采时压降越大可释放气量越多^[1,36]。

游离态含氦天然气的价值这里不再赘述。与温泉系统相关的水溶性氦资源分布广泛,是重要的氦气找矿线索和氦气资源理论研究领域。温泉气中 He 丰度一般偏高,得到较高的关注度。但从工业利用价值来看,此类资源品位高,产量低,尽管资源总量丰富,但资源丰度低,经济性差,属于“有质无量”的资源。如果没有工艺方面的重大突破,工业利用前景有限。而且水溶气中 He 丰度较高也是相对从水中脱出的气体而言,相对于地热水(地质流体)的氦气丰度并不一定高,地质流体相当于稀释剂,脱气过程相当于氦气的一次富集。同理,天然气藏中 He 丰度低于水溶气是因为地质流体中氦气遇到天然气藏脱溶进入天然气藏后,因被天然气稀释而丰度降低。

渭河盆地地热井每个采暖季有 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 伴生氦气资源供综合利用,且地热水伴生气氦气体积分数平均高达 2%,但按 1:10 的气水比换算成地热水氦气体积分数平均仅为 0.2%,气水分离还需增加成本,工业利用效益并不乐观,特别是目前生产条件下平均单井日产氦气量仅为 2 m^3 ,缺乏规模,分离、集输难题导致无法有效利用^[36]。

1.8 氦气资源调查评价方法探索

通过近年的勘探实践,初步探索了地质指方向、重力-电法探结构、化探圈定富集区、磁法识别氦源

表 2 世界典型富氦天然气田相关参数

Table 2 Related Parameters of Typical Helium-rich Natural Gas Fields Worldwide

成因	构造分类	气田名称	大地构造位置	He 含量/%	³ He/ ⁴ He 值/ 10 ⁻⁸	幔源份额/%	二氧化碳碳同位素值/‰	甲烷碳同位素值/‰	文献来源
壳源氦	克拉通边缘型	Panhandle-Hugoton	北美克拉通南缘	0.490	14.00~36.40	1.01~3.13		-43.40	[37]
		Keyes	北美克拉通南缘	2.200					
		Cliffside	北美克拉通南缘	1.800					
		Hassi R'Mel	撒哈拉板块北缘	0.190					
		North Dome	阿拉伯板块东南缘	0.090~0.200			-23.09~-12.51	-45.0~-30.37	[38]
		威远气田	上扬子板块西南缘	0.210~0.340	2.90~3.00	0.08~0.09	-14.60~-11.16	-35.70~-31.96	[39]
		雅克拉	塔里木盆地北缘	0.220	21.60	1.79			[40]
		和田河	塔里木巴楚隆起	0.249	11.60~12.70	0.87~0.97			[41]
		Hogback	落基山脉南段	7.170				-35.80	[37]
		Bitlebito	落基山脉南段	8.900					
		Table Mesa	落基山脉南段	5.700					
		Rattlesnake	落基山脉南段	7.810					
		Tosito	落基山脉南段	7.270				-48.70~-48.40	
		Navajo-Chambers	落基山脉南段	8.000~10.000					
		Pinta Dome	落基山脉南段	8.000					
		Boulder Butte	落基山脉南段	3.790					
		Riley Ridge	落基山脉北段	0.550					
		Harley Dome	落基山脉北段	7.020	14.00	1.09			
	陆内裂谷型	North Tanzania	东非裂谷东支	2.700~10.600	5.46~7.42	0.32~0.49			[42]、[43]
		Eyasi	东非裂谷东支	5.700	6.44	0.40			
		华县 2 号	汾渭地堑	0.395	17.64	1.42		-33.47	[11]
		Idindiro	东非裂谷南段	0.040	96.60	8.62			[42]
幔源氦	走滑断裂型	Bravo Dome	落基山脉南段	0.005~0.140	93.80~596.00	8.36~54.10			[44]
		黄桥浅层氦气田	郯庐断裂带	1.330	371.00	33.61	-8.09	-40.13	[45]
		万金塔气田	松辽盆地	0.100	687.00	62.38	-8.83	-45.37	[46]

岩、地震测量落实有利圈闭、氦气录井标定富集层段的调查技术方法^[1,47]。

在具有氦气资源潜力的地区,通过非震物探探测地质结构,利用航磁异常可初步显示隐伏磁性体(重要氦源岩之一)的大致分布,结合已有成果预测远景区,通过进一步物化探工作圈定有利区。例如,用 1:50 000 磁测可进一步查证和圈定磁性体分布范围;氦气土壤化探可以用于氦气远景区圈定与评价。当化探样品氦气丰度大于空气中氦气丰度((4.6~5.2)×10⁻⁶)时,说明有高浓度壳源氦供给,即深部有壳源氦气源供应。根据柴达木盆地北缘团鱼山地区化探样品分析结果,氦气含量与氦气来源关系密切(图 5),当氦同位素比值接近空气时,样品氦气含量也接近空气;而壳源氦贡献增加,氦同位素

比值减小时,样品氦气含量增加。接下来在物化探工作圈定有利区,部署地震测量落实圈闭目标,进行钻探发现。氦气钻探时在综合录井仪上增加“氦气道”进行氦气录井,是发现氦气富集层段的重要手段之一。

1.9 中国氦气资源评价现状与工作方向

中国未开展过全国性氦气资源评价工作,近年来石油系统按照天然气普通伴生气,通过采样分析来筛查现有天然气井中的 He 含量,以含量法(基于天然气储量容积法)进行了部分气藏氦气资源评价。但因为对氦气成藏特殊性的认识不足,现有工作缺乏目标性,平面上远景区不清,纵向上目前层未必含氦最好,所以发现富氦气藏极少,多数气藏贫氦。这是寻找良好烃类气的天然气勘探思路的必然

表 3 中国有含氦天然气显示的盆地统计结果

Table 3 Statistical Results of Helium-bearing Natural Gas Basins in China

盆地	凹陷	产气层	产氦气量	成因	地质背景特征
松辽	北部多个凹陷	中生界	0.102%~0.404%, 最高 2.104%	壳幔混源, 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
苏北		新生界	0.080%~1.340%	壳幔混源, 幔源为主	靠近郯庐断裂;燕山期、喜山期岩浆活动强烈; 形成幔源二氧化碳气藏
海拉尔	乌尔逊断陷	中、新生界	0.003%~0.198%	壳幔混源, 幔源为主	均分布于深大断裂、燕山期花岗岩侵入体附近
渤海湾	济阳拗陷	新生界	最高 3.080%	壳幔混源, 幔源为主	控制气藏形成的高青断层自中生代以来持续活动, 深大断裂是其主要控制因素;与岩浆活动密切相关
塔里木		古、中生界	0.050%~2.190%	壳源为主	二叠纪火山活动提供了氦源;盆地内有深大断裂
渭河		新生界	最高 9.000%	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
汾河		古生界	最高 18.000%	壳源为主	富铀钍铝土岩广泛发育
四川	威远气田	震旦系	0.200%左右	壳源为主	发育在前震旦纪花岗岩之上;储层富 U,断层、裂隙发育
柴达木	北缘	中、新生界	0.210%~0.720%	壳源	花岗质基底及基岩气藏;断裂发育

注:数据引自文献[1]。

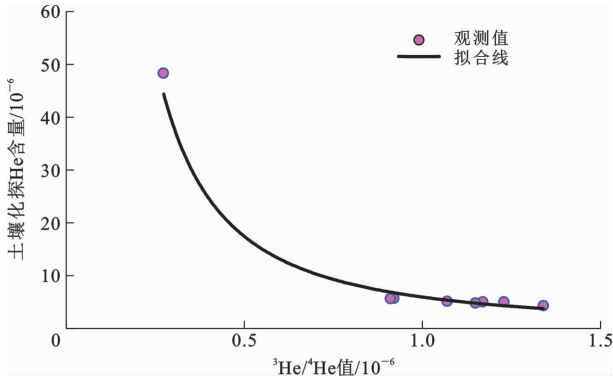


图 5 土壤化探 He 含量与氦同位素比值的关系

Fig. 5 Relationship Between Helium Content of Soil Geochemical Exploration and Helium Isotope Ratio

结果。

国家层面和未来工作方向则更需要参考油气成因法进行氦气资源评价。以氦源岩为基础进行氦气资源量评价,摸清资源家底,在氦源较强、烃源较弱地区寻找中小型富氦天然气藏,是氦气资源调查的重要方向之一。目前,成因法氦气资源量评价从理论、方法到参数值选取都近乎空白,机理、方法有待探索,特别是氦源岩资料严重缺乏。急需建立全国氦气资源潜力评价方法体系,开展全国氦气资源潜力评价。

(1)建立全国氦气资源评价方法体系。以成因法氦气资源量预测和评价方法为基础,全面梳理不同类型盆地或区带氦气成藏地质条件,通过物化探、综合研究和实验测试等手段获取氦气源岩规模、时代、放射性物质含量、氦气运聚系数、保存条件等关

键技术参数。

(2)全国氦气资源潜力评价。依据不同类型盆地氦源岩、成藏、保存特点的差异性,实施分区、分带、分类型评价,明确中国富氦天然气资源前景。

(3)氦气成藏远景区优选。通过资源潜力评价,对各盆地进行资源前景排序;在资源远景较好的盆地,根据氦气成藏理论,圈定氦气成藏有利区带,编制重点有利区带氦气资源评价报告,指导油企气-氦兼探。

1.10 中国氦气调查为何进展缓慢?

氦气是重要的工业气体之一,战略意义和经济价值极高。中国也有较好的富氦天然气成藏地质条件,但国内氦气上下游产业发展缓慢。其原因有:①重视不够。氦气成藏特殊性认识不足,氦气富集规律、成藏模式等研究薄弱,尚未建立系统的氦气成藏理论和找矿模型,氦气与天然气的关联性、差异性认识有限,勘查技术缺乏,资源调查缺乏理论指导和技术支撑,点上发现未能在面上展开,未形成规模和有效利用。②体制机制不合理。产业链不健全,投资主体和产业扶持政策缺乏,国家和社会投资不足;天然气勘探中未关注气-氦兼探工作,液化天然气(LNG)尾气提氦利用未得到足够重视。③专业队伍和实验室建设严重滞后。长期缺乏专业调查队伍和专家团队;氦气测试专业实验室不足,天然气中氦气含量分析不足,测试结果可靠性较差。

在政策研究方面,急需开展全球氦气资源开发跟踪与政策保障研究,跟踪国内外氦气资源勘探利

用动态,形成多元保障建议,提出产业扶持和激励政策建议。应调研国外氦气资源保护法律法规,推进中国氦气资源保护的法律法规建设。需要相应的人才政策凝聚有限的技术力量形成拳头,支撑科技攻关与调查突破;制定氦气资源勘查技术规范和技术标准,促进氦气资源的勘探、开发和利用。

2 中国氦气资源保障途径

根据中国氦气资源调查评价现状,提出“用旧、找新、合作、储备”的“四维”资源保障途径。

(1)用旧。开展中国现有大中型天然气田氦气含量调查(老区调查评价),明确各大盆地天然气含氦情况,发现富氦天然气藏,直接提氦利用,形成产能;不具有经济效益的低含氦气田,通过指导 LNG 布局与 BOG 提氦装置建设,推进低含氦天然气有效利用。

(2)找新。在氦气成藏理论指导下,建立以成因法资源量预测为基础的氦气资源评价方法体系,加强国家公益性队伍对氦气资源调查工作的组织引领,通过全国氦气资源潜力评价与战略选区,获得不同盆地和区带关键评价参数,优选远景区和有利区,预测资源量,为国家规划提供依据。以富氦天然气发现为主要目标,引领油气企业在氦气成藏远景区开展气-氦兼探,按照资源类型开展分区、分带、分类、分级综合评价,形成不同类型和品位资源的利用方案。例如,当前具有经济效益的伴生氦气可以直接开发利用,效益不达标的部分含氦气田可作为战略储备暂缓开发,供国防军工等用户在特殊时期使用,稳步提高中国氦气资源保障水平。

(3)合作。跟踪研究全球氦气勘探开发进展,提出中国氦气多元化保障和产业扶持政策建议,服务中国氦气保障相关政策法规制定,形成民营资本在内的多元化投入机制,促进资源勘查国际化、国际供应多元化。

(4)储备。参考国家石油天然气资源战略储备体系,建立中国氦气资源战略储备体系。

与此同时,形成氦气资源调查评价与利用技术支撑体系:①建设调查评价与成藏研究分析测试支撑体系,形成理论创新和生产服务两种不同功能的实验支撑体系,保障氦气相关分析及时、有效开展,服务氦气成藏过程、资源评价参数优选、生产动态跟踪和储量参数核定等顺利开展;②富(含)氦天然气综合利用技术研究与应用支撑体系。在天然气开发中推进氦气综合利用研究与应用,对有条件的天然

气液化装置,增加提氦设备,进行 LNG 尾气提氦利用;利用膜分离技术和深冷分离技术相结合的方法(即联合法)探索管道气联合提氦。

3 结 语

(1)有效氦源、高效运移通道(断裂、不整合)和适度的载体气藏是氦气富集成藏的基本条件。氦气成藏与天然气成藏既有关联性又有差异性,弱源性使其成藏离不开天然气(载体气)藏。富有机质泥页岩类烃源岩多数是良好的氦源岩,但由于生烃能力更强,导致多数天然气藏含氦却不富氦。富氦天然气的形成需要再配备生氦能力较好,而不生烃或弱生烃的外部氦源。富氦天然气藏发育于稳定区的活动带或活动区的稳定带,如克拉通内隆起及克拉通边缘活化带,陆内裂谷盆地是目前勘探热点。

(2)天然气分离法是目前工业氦气生产的主要来源,细分为富氦天然气直接提氦和液化天然气尾气提氦 2 种方式,其中液化天然气尾气(LNG-BOG)提氦发展潜力巨大。

(3)“用旧、找新、合作、储备”是实现中国氦气资源多元保障的有效途径。低品位资源的有效利用是实现短期提升氦气资源保障水平的现实途径;公益性地质调查引领油气企业在氦气成藏远景区开展气-氦兼探,是中长期提高中国氦气资源保障水平的重要途径;开展国际合作,制定国内氦气产业扶持政策,建立中国氦资源战略储备体系,是形成氦气资源保障多元化、改善保障能力的有效途径。

恰逢西安地质调查中心组建六十周年,本中心氦气团队根据多年来氦气资源评价工作所取得的经验和认识撰写了这篇论文,以表达我们的衷心祝贺!西安地质调查中心十余年来坚持氦气资源调查研究工作,在氦气成藏理论和找矿技术方法探索等领域进行了开拓性工作,促成中国新一轮“氦气热”。祝愿西安地质调查中心在西北地区地质调查与科技创新中取得更大的成绩!

参考文献:

References:

- [1] 李玉宏,周俊林,张 文.渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M].北京:地质出版社,2018.
LI Yu-hong,ZHOU Jun-lin,ZHANG Wen,et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in Weihe Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House,2018.
- [2] 秦胜飞,李济远.氦气到底有什么用? [J].石油知识,

- 2021(4):44-45.
- QIN Sheng-fei, LI Ji-yuan. What's the Use of Helium? [J]. *Petroleum Knowledge*, 2021(4):44-45.
- [3] BROWN A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[R]. New Orleans: AAPG, 2010.
- [4] 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- WANG Xian-bin. Noble Gas Isotope Geochemistry and Cosmochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [5] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- XU Yong-chang, SHEN Ping, LIU Wen-hui, et al. Noble Gas Geochemistry in Natural Gas[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [6] 孔令昌. 自然界中的氦同位素[M]. 北京: 专利文献出版社, 1997.
- KONG Ling-chang. Helium Isotopes in Nature[M]. Beijing: Patent Literature Publishing House, 1997.
- [7] 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 Ming-xin, XU Yong-chang, HAN Wen-gong, et al. Active Characteristics and Accumulative Effects of Mantle-derived Fluids in Eastern China[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 2001, 25(3):265-270.
- [8] 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 Yong-chang, SHEN Ping, TAO Ming-xin, et al. Distribution of Helium Isotopes in Natural Gas from Petroliferous Basins in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(16):1505-1508.
- [9] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学: II. 幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1996, 26(2):187-192.
- XU Yong-chang, SHEN Ping, LIU Wen-hui, et al. Geochemistry of Mantle-derived Volatiles from Natural Gas in Eastern Oil and Gas Region: II. Helium, Argon and Carbon Compounds in Mantle-derived Volatiles[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1996, 26(2):187-192.
- [10] 徐永昌, 刘文汇, 沈平, 等. 天然气地球化学的重要分支: 稀有气体地球化学[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(3):157-166.
- XU Yong-chang, LIU Wen-hui, SHEN Ping, et al. An Important Branch of Gas Geochemistry: Noble Gas Geochemistry[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(3):157-166.
- [11] ZHANG W, LI Y H, ZHAO F H, et al. Using Noble Gases to Trace Groundwater Evolution and Assess Helium Accumulation in Weihe Basin, Central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 251:229-246.
- [12] 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地天然气成因特征及其意义[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(5):11-16.
- LI Yu-hong, LU Jin-cai, LI Jin-chao, et al. Genetic Characteristics of the Natural Gas in Weihe Basin and Its Significance[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 2011, 26(5):11-16.
- [13] ZHANG W, LI Y H, ZHAO F H, 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.
- [14] ZHANG W, LI Y H, ZHAO F H, et al. Quantifying the Helium and Hydrocarbon Accumulation Processes Using Noble Gases in the North Qaidam Basin, China[J]. *Chemical Geology*, 2019, 525:368-379.
- [15] 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):476-486.
- ZHANG Xue, LIU Jian-chao, LI Rong-xi, et al. President Situation and Progress in the Study of Helium Gas Resources in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(2):476-486.
- [16] 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 Xiao-bao, ZHOU Fei, CAO Zhan-yuan, et al. Finding of the Dongping Economic Helium Gas Field in the Qaidam Basin, Helium Source and Exploration Prospect[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(11):1585-1592.
- [17] 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 Xiao-wan, LI Jian-zhong, ZHAO Li-bin, et al. Helium Resources and Discovery of First Supergiant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3):1024-1041.
- [18] 陈践发, 刘凯旋, 董劭伟, 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 Jian-fa, LIU Kai-xuan, DONG Qing-wei, 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.
- [19] 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 Fa-qi, WANG Fu-bin, 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 and Experiment*, 2022, 44(1):1-10.
- [20] 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(增 1):47-53.
- LI Yu-hong, LU Jin-cai, LI Jin-chao, 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.
- [21] 蒙炳坤, 周世新, 李 靖, 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 Bing-kun, ZHOU Shi-xin, 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]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(4):102-113.
- [22] 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 Yuan-hong, LUO Hou-yong, XUE Yu-ze, et al. Genesis and Helium Enrichment Mechanism of Geothermal Water-associated Gas in Weihe Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(2):277-287.
- [23] 黄 元, 黄泽平, 张全震, 等. 寻找氦资源的新思路及初步实践[J]. *科学通报*, 2021, 66(33):4212-4217.
- HUANG Yuan, HUANG Ze-ping, ZHANG Quan-zhen, et al. New Ideas and Preliminary Practice for Searching Helium Resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(33):4212-4217.
- [24] 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.
- [25] MAMYRIN B A, TOLSTIKHIN I N. Helium Isotopes in Nature[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984.
- [26] 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 Yu-hong, ZHANG Wen, WANG Li. Henry's Law and Accumulation of Crust-derived Helium: A Case from Weihe Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(4):495-501.
- [27] 李玉宏, 张 文, 王 利, 等. 壳源氦气成藏问题及成藏模式[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(4):565-572.
- LI Yu-hong, ZHANG Wen, WANG Li. Several Issues in the Accumulation of Crust-derived Helium and the Accumulation Model[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(4):565-572.
- [28] SATHAYE K J, LARSON T E, HESSE M A. Noble Gas Fractionation During Subsurface Gas Migration[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 450:1-9.
- [29] BALLENTINE C J, SHERWOOD LOLLAR B. 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.
- [30] BALLENTINE C J, O'NIONS R K, OXBURGH E R, et al. Rare Gas Constraints on Hydrocarbon Accumulation, Crustal Degassing and Groundwater Flow in the Pannonian Basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 105(1/2/3):229-246.
- [31] DANABALAN D. Helium: Exploration Methodology for a Strategic Resource[D]. Durham: Durham University, 2017.
- [32] 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 Yu-hong, 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.
- [33] 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):364-371.
- ZHANG Yun-peng, LI Yu-hong, LU Jin-cai, 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):364-371.
- [34] 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 Wen-jin, LI Yu-hong, et al. Charac-

- teristics 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.
- [35] 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 Zhen-ning, LI Yong-hong, LIU Wen-jin. 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.
- [36] 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): 372-378.
LI Yu-hong, WANG Xing-yun, HAN Wei. Mode of Occurrence of Helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and Its Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2): 372-378.
- [37] YAKUTSENI V P. World Helium Resources and the Perspectives of Helium Industry Development[J]. *Neftegazovaya Geologiya Teoriya i Praktika*, 2014, 9(1): 11.
- [38] 胡安平,周庆华.世界上最大的天然气田:北方-南帕斯气田[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(6): 753-759.
HU An-ping, ZHOU Qing-hua. The Largest Gas Field in the World: North-south Pars Gas Field[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(6): 753-759.
- [39] 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 Jin-xing. Pool-forming Periods and Gas Sources of Weiyuan Gas Field[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2003, 25(5): 473-480.
- [40] 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 Qi-xiang, SHI Zheng, WANG Deng-gao, et al. Analysis on Helium Enrichment Characteristics and Reservoir Forming Conditions in Northwest Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 215-222.
- [41] 刘全有,戴金星,金之钧,等.塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2009, 83(1): 107-114.
LIU Quan-you, DAI Jin-xing, JIN Zhi-jun, et al. Geochemistry and Genesis of Natural Gas in the Foreland and Platform of the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 107-114.
- [42] DANABALAN D, GLUYAS J G, MACPHERSON C G, et al. New High-grade Helium Discoveries in Tanzania[C]// The Geochemical Society. The 26th Goldschmidt Conference. Yokohama: The Geochemical Society, 2016: 595.
- [43] MACHEYEKI A S, DELVAUX D, BATIST M D, 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.
- [44] BRENNAN S T. Chemical and Isotopic Evidence for CO₂ Charge and Migration Within Bravo Dome and Potential CO₂ Leakage to the Southwest[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 2996-3005.
- [45] 郭念发,尤孝忠,徐俊.苏北盆地溪桥含氦天然气田地质特征及含氦天然气勘探前景[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(5): 24-26.
GUO Nian-fa, YOU Xiao-zhong, XU Jun. Geological Characteristics and Exploration Prospect of Helium-bearing Natural Gas Field in Xiqiao, Subei Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(5): 24-26.
- [46] 戴金星,宋岩,洪峰,等.中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 1994(4): 3-10.
DAI Jin-xing, SONG Yan, HONG Feng, et al. Inorganic Genetic Carbon Dioxide Gas Accumulations and Their Characteristics in East Part of China[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 1994(4): 3-10.
- [47] 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 Yu-hong, WANG Xing-yun, HAN Wei. Progress and Achievements of Helium Gas Resources Survey in Weihe Basin[J]. *Geological Survey of China*, 2015, 2(6): 1-6.