

中国氦气勘探开发进展与展望

刘成林^{1,2},洪思婕^{1,2},王馨佩^{1,2},范立勇³,王海东^{1,2},陈践发^{1,2},朱玉新⁴,
丁振刚^{1,2},张雪^{1,2},胡浩然^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;
3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院,陕西 西安 710018;4. 中国石油油气和新能源分公司,北京 100007]

摘要:氦气是重要的具有战略意义的资源,分析中国氦气勘探与开发进展及其勘探前景具有重大意义。研究分析了中国氦气勘探发现现状,梳理了中国典型含氦天然气田(藏)的地质条件,展望了中国氦气发展前景。研究认为:①氦气在中国主要与烃类或者非烃类气藏伴生,且富氦天然气藏具有多层、多类型分布特征,鄂尔多斯盆地、四川盆地和塔里木盆地是中国3大氦气富集盆地。②中国西部挤压型盆地以壳源氦气为主,少量为幔源氦气,与烃类和非烃类气藏伴生;中部盆地主要为壳源氦气,与烃类气藏伴生;东部拉张型盆地以壳-幔源氦气为主,主要与非烃类气藏伴生。③结合盆地构造背景,划分出7种氦气生运聚模式。④特殊的地质条件与构造演化史使中国具有不同于世界其他地区的氦气地质条件、资源潜力与分布特征。适合中国地质条件的氦气富集理论、对氦气资源潜力准确的认识和创新性的氦气勘探开发技术是中国氦气产量快速上升并稳定发展的关键。

关键词:需求量;产量;勘探;资源潜力;氦气;天然气

中图分类号:TE132.3

文献标识码:A

Progress and prospects of helium exploration and production in China

LIU Chenglin^{1,2}, HONG Sijie^{1,2}, WANG Xinpei^{1,2}, FAN Liyong³, WANG Haidong^{1,2}, CHEN Jianfa^{1,2},
ZHU Yuxin⁴, DING Zhengang^{1,2}, ZHANG Xue^{1,2}, HU Haoran^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Oil, Gas & New Energies Company, PetroChina, Beijing 100007, China]

Abstract: Helium is recognized as an important strategic resource, and analyzing the progress and prospects of helium exploration and development in China holds great significance. In this study, we analyze the current situation of helium exploration and development in China, organize the geological conditions of its typical helium-bearing gas fields (reservoirs), and discuss the prospects for helium development therein. The results indicate that associated with hydrocarbons or non-hydrocarbons, helium are usually found in both conventional and unconventional gas reservoirs. Helium-rich gas reservoirs in China span multiple strata and types, with the Ordos, Sichuan, and Tarim basins identified as three major helium-rich basins. In the compressional basins of western China, crust-derived helium predominates, followed by a small quantity of mantle-derived helium, both associated with hydrocarbons and nonhydrocarbons. In central China, the basins are dominated by crust-derived helium associated with hydrocarbons. In the extensional basins of eastern China, mixed crust-mantle-derived helium is predominant and is primarily associated with nonhydrocarbons. Furthermore, seven distinct helium generation-migration-accumulation patterns are identified in line with tectonic settings. Compared to other countries and regions worldwide, China exhibits unique geological conditions, resource potential, and distribution patterns for helium due to its special geological background and tectonic

收稿日期:2024-07-15;修回日期:2024-10-25。

第一作者简介:刘成林(1970—),男,教授、博士研究生导师,油气成藏与资源评价。E-mail: liucl@cup.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA071900);国家自然科学基金项目(41872127);重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2024NSCQ-LZX0108)。

evolutionary history. The helium enrichment theories tailored to China's geological conditions, an accurate understanding of helium resource potential, and innovative technologies for helium exploration and development are critical to the rapid increase in production and stable development of helium in China.

Key words: demand, production, exploration, resource potential, helium, natural gas

引用格式:刘成林,洪思婕,王馨佩,等. 中国氦气勘探开发进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 777-789. DOI: 10. 11743/ogg20250306.

LIU Chenglin, HONG Sijie, WANG Xinpei, et al. Progress and prospects of helium exploration and production in China[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 777-789. DOI: 10. 11743/ogg20250306.

氦气作为稀有气体的一种,具有无色、无味和不可燃烧的强化学惰性、自然界沸点最低(-268.95°C)、唯一不能在标准大气压下固化的特有物理和化学性质,这使其在高科技行业有着很高的应用价值,属于重要的战略资源,被称为“黄金气体”。氦气在诸多高精尖领域得到应用,是国家安全和高技术产业发展的基本物资,属于全球重要的战略性资源^[1-6],其战略地位得到全球主要国家的高度重视。

从富氦天然气中分离出氦气是目前唯一成熟的工业提取方法。在绝大多数天然气藏中,氦气的含量都不超过0.05%,这类天然气藏被普遍认为是贫氦天然气藏。相对地,如果氦气的含量超过0.10%,这种天然气藏就会被定义为富氦天然气藏^[6]。截止2022年年底,世界氦气资源量为 $489.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,储量为 $144.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。2023年世界氦气产量为 $1.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,氦气需求量为 $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计未来亚太地区氦气需求旺盛,可能导致世界氦气整体供不应求的局面。中国天然气提氦工业起步较晚,随着高科技产业的迅速发展,近几年中国氦气消耗量迅速增加,2023年氦气消费量 $2\,618 \times 10^4 \text{ m}^3$,进口量为 $2\,230 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中85%依赖进口,主要来自卡塔尔、美国和澳大利亚等氦气生产大国^[8-12]。鉴于氦气具有独特的应用价值且无可替代,同时考虑到当前全球供需状况,中国氦气安全形势已变得极为严峻。若不能及时制定相应措施,未来中国在此领域的发展将面临更为严重的制约^[13]。

氦气尽管是天然气的共生资源,但其形成、起源以及富集和运移的机制与常规天然气(烃类气体)显著不同。世界上富氦天然气田(藏)通常以基底花岗岩为氦源岩,分布在较为古老的克拉通内部或周边。美国是目前世界上氦气资源量、储量和产量最大的国家,其氦气资源主要集中在中部和落基山的胡果顿-潘汉德(Hugoton-Panhandle)、堪萨斯州的巴拿马(Panoma)等气田^[14-17]。依据构造位置、氦气来源及伴生气类型,美国主要的氦气成藏模式主要有以下3种:①位于克拉

通古隆起之上-以基底花岗岩为氦源岩-与烃类伴生模式;②位于克拉通边缘活动带前-以基底花岗岩为氦源岩-与二氧化碳伴生模式;③位于克拉通边缘活动带-以基底花岗岩为氦源岩-与氦气伴生模式^[13]。

已有研究表明,中国富氦天然气田(藏)数量众多、类型丰富且资源前景广阔。然而,氦气资源整体探明率及研究程度很低,其地质条件、富集机制、资源潜力与分布规律需要深入研究和评价^[18-22]。鉴于氦气的无机成因特性,参照烃类天然气成藏理论,结合正在承担的国家重点研发项目,本文分析中国近年来氦气勘探开发进展、氦气地质背景与地质条件、氦气资源潜力与分布,预测氦气产量,厘定氦气勘探开发面临的问题,为中国氦气勘探开发提出建议,展望发展前景。

1 勘探开发进展

在前人已有工作和认识基础上,本次研究开展了国内重点盆地天然气样品采集和分析测试工作,确定氦气含量大于0.1%的富氦气田(藏)22个,主要分布于中、西部构造稳定区,如四川盆地、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地和塔里木盆地等,以及东部岩浆构造活动区,如松辽盆地、海拉尔盆地、苏北盆地、渤海湾盆地和三水盆地等。由于氦气通常与天然气伴生,而中、西部大型叠合盆地天然气资源丰富,因此鄂尔多斯盆地、四川盆地和塔里木盆地是中国目前的3大氦气富集盆地。从储层角度分析,氦气可以与常规天然气和非常规天然气(页岩气、煤层气、水溶气等)伴生。从天然气类型角度分析,氦气可以与烃类和非烃类气体(二氧化碳、氮气)伴生。因此,中国富氦天然气田(藏)呈现出平面广、层系跨度大和类型多的分布特征。

鄂尔多斯盆地氦气分布广泛,盆地边缘和盆地内部均有含氦气田分布,主要产气层位为上古生界石炭系-二叠系,主力氦源岩为基底花岗岩、花岗片麻岩及上古生界石炭系-二叠系的煤岩、泥岩和铝土岩。根据氦气含量,可将盆地分为3个区域:①富氦-中氦区,

主要分布在中央古隆起和伊盟古陆,以东胜气田和庆阳气田为主,氦气含量为0.045%~0.487%;②低氦区,主要分布在伊陕斜坡边缘,以子洲-米脂气田为主,氦气含量为0.017%~0.062%;③贫氦区,主要分布在斜坡带,以榆林气田为主,基底断裂不发育,氦气含量为0.017%~0.040%。东胜气田存在断裂的分段差异性,形成了三眼井、乌兰吉林庙、波尔江海子和李家渠-掌岗图西断裂等,其中在伯尔江海子基底断裂的两侧具有较高氦气含量显示^[23-30]。

四川盆地及周缘氦气平面分布较广,纵向上涵盖震旦系、寒武系、石炭系、二叠系、三叠系至侏罗系等层系。川西南氦气丰度较高,氦气含量为0.018%~0.404%,主要分布在震旦系、寒武系、二叠系和三叠系,以威远气田为代表。川中氦气含量为0.005%~0.102%,震旦系和寒武系氦气丰度最高,以安岳气田为代表。川南氦气含量为0.011%~0.090%,含氦地层为二叠系和三叠系。川东、川东北—川北和川西氦气含量相对较低,含氦层位主要为中生界。除常规天然气外,四川盆地页岩气中也有氦气显示,威远气田龙马溪组页岩气中氦气含量为0.023%~0.129%,长宁页岩气中氦气含量为0.019%~0.047%。四川盆地及周缘地区基底及上覆多个层位的泥页岩中均富含铀、钍元素,为潜在氦源岩层系;基底断裂发育,为深源氦气提供输导体系,如威远气田毗邻的3处断裂带——华蓥山、龙泉山及威远基底断裂带,内部断层也比较发育^[31-36]。

塔里木盆地目前已发现的含氦气田主要有和田河、阿克莫木、罗斯2井及古城富氦天然气田,其中除阿克莫木气田为碎屑岩气田外其余皆为碳酸盐岩气田^[31]。塔西南地区氦气含量为0.090%~0.730%,巴什托普油气田石炭系-二叠系氦气含量为0.680%~0.730%,亚松迪气田石炭系氦气含量平均值为0.220%;塔北地区氦气含量为0.150%~0.940%,塔河油田沙6井寒武系氦气含量为0.340%;塔中地区氦气含量为0.160%~0.230%^[32]。和田河气田氦源岩为中元古代基底花岗岩,储层为碳酸盐岩和碎屑岩,奥陶系顶部发育风化壳,碳酸盐岩储层中溶蚀孔发育程度高,以裂缝和孔洞为储集空间。巴楚隆起南缘断裂体系发育,为氦气提供较好的输导通道^[37-40]。

柴达木盆地天然气、岩屑解析气和水溶气等氦气含量较高,为0.013%~1.140%,已发现的含氦气田(藏)主要分布在北缘,包括团鱼山、全吉山、马北、牛东、东坪和尖北,其中全吉山煤田、团鱼山氦气含量较高,东坪与马北含量次之。东坪气田是典型基岩气藏,

基岩位于构造高点接受风化成为储层,氦气成藏过程与烃类气体相伴,以烃类气体为载体气的可能性较大。区内多条南北向基底断裂是气体垂向输导体系,而奥陶系风化壳是气体横向运移输导体系。马北气田氦气运聚过程受地层水影响较大。在大柴旦和鄂博梁地区的温泉中发现了含量较高的水溶氦气^[41-47]。

渤海湾盆地的济阳、冀中、辽河及黄骅拗陷中见氦气显示,氦气含量为0.028%~3.080%。济阳拗陷花沟地区氦气含量最高,与非烃类气——氮气伴生,断层与地壳深部裂缝沟通,存在幔源成因氦,表现出壳-幔混源的特征^[48-49]。

松辽盆地北部氦气含量为0.100%~0.400%,主要分布在侏罗系和白垩系。盆地北部分布的2条基底断裂为氦气富集提供了优势运移通道,含氦气田(藏)大致沿断裂带分布,表现出壳-幔混源的特征^[50-51]。

苏北盆地发现多个含氦气田(藏),氦气含量为0.033%~0.571%,其中黄桥气田氦气含量最高。黄桥气田的氦气主要为幔源,以氮气、二氧化碳和烃类为载体气,通过基底断裂运移至浅层聚集成藏,氦气纵向分布,深层氦气含量少,浅层氦气含量逐渐变多,最浅层气藏盐城组氦气含量最高^[52-53](表1)。

中国氦气开发起步晚,20世纪70年代,中国建立起第一套氦气提炼设备。四川盆地威远气田震旦系气藏发现于1964年,作为附带工作,曾进行商业氦气评价和开采。近年来,国家和石油公司持续加快氦气调查与勘探,攻关氦气勘探开发关键技术、方法和装备,在全国,尤其是中、西部地区,发现了多个富氦和高氦天然气田,在四川盆地的威远气田、塔里木盆地的阿克莫木与和田河气田、鄂尔多斯盆地的东胜气田升级改造或建设新的氦气生产基地。由于氦气勘探开发需要较大的投入与较长的建产周期,初期氦气产量增速较慢,目前中国氦气开发总体处于起步阶段。

2 地质背景与地质条件

2.1 地质背景

在全球范围内,尤其是美国,富氦天然气田(藏)通常以基底花岗岩为氦源岩,分布在较为古老的克拉通内部或周边。与美国所在的规模大、构造稳定的北美地台相比,中国的华北地台、塔里木地台和扬子地台3个地台规模小,地史时间长,经历了多个构造旋回(如加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅期。)^[54]。氦气与烃类或者二氧化碳、氮气伴生,既赋存于常规天然气藏

表1 中国主要含氮天然气田(藏)地质-地球化学特征与氮气生-运-聚模式
Table 1 Geology, geochemistry, and helium generation-migration-accumulation patterns of major helium-bearing gas fields (reservoirs) in China

气田名称	所属盆地及构造背景	天然气组分	氮含量/%	R/R_0	氮气探明地质储量/(10^8 m^3)	氮源岩	储-盖组合	生-运-聚模式
威远气田	四川盆地乐山-龙女寺古隆起核部的穹窿背斜	烃类、氮气	0.120 ~ 0.404/0.260	0.013 ~ 0.041/0.024	93.980	前震旦系花岗岩、寒武系筲竹寺组黑色页岩	储层为震旦系灯影组白云岩;盖层为下寒武统筲竹寺组泥页岩	以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氮源岩-主要与烃类伴生
庆阳气田	鄂尔多斯盆地中央古隆起		0.068 ~ 0.310/0.154	0.019 ~ 0.031/0.022	0.420	基底花岗岩、石炭系-二叠系煤、暗色泥岩、铝土岩	储层为二叠系太原组、山西组和下石盒子组砂岩;盖层为石千峰组厚层泥岩	
黄龙气田	鄂尔多斯盆地伊陕斜坡和渭北隆起交汇部位		0.015 ~ 0.226/0.130	—	0.040	古元古界结晶变质基底及上古生界本溪组煤岩、暗色泥岩	储层为二叠系太原组、山西组和下石盒子组碎屑砂岩;盖层为石千峰组厚层泥岩	
马北气田	柴达木盆地马海凸起		0.060 ~ 0.810/0.270	0.004 ~ 0.059/0.023	0.040	上志留统-下泥盆统花岗岩、花岗片麻岩及侏罗系沉积岩	储层为古近系砂岩;盖层为下干柴沟组上部泥岩	
牛东气田	柴达木盆地北缘阿尔金山前东段		0.050 ~ 0.060/0.055	0.009 ~ 0.026/0.017	—		储层为侏罗系砂岩;盖层为侏罗系泥岩	
东坪气田	柴达木盆地东坪斜坡,古近纪以来的大型盆缘鼻状古隆起		0.075 ~ 1.069/0.380	0.007 ~ 0.016/0.011	0.440		储层为基岩风化壳;盖层为古近系路乐河组含膏泥岩和膏质碳酸盐岩	
尖北气田	柴达木盆地尖北斜坡带,古近纪以来的大型盆缘鼻状古隆起		0.160 ~ 0.570	—	0.420		储层为基岩风化壳;盖层为古近系路乐河组含膏泥岩和膏质碳酸盐岩	
和田河气田	塔里木盆地巴楚隆起南缘玛扎塔格构造带		0.044 ~ 0.370/0.320	0.060 ~ 0.083/0.075	1.960	中元古界花岗岩、寒武系暗色泥岩	储层为石炭系生屑灰岩段及奥陶系潜山碳酸盐岩;盖层为石炭系含膏泥岩	
东胜气田	鄂尔多斯盆地伊盟隆起	烃类、二氧化碳、氮气、氦气	0.045 ~ 0.487/0.133	0.013 ~ 0.045/0.024	2.440	基底花岗岩、石炭系-二叠系煤和暗色泥岩	储层为二叠系山西组和下石盒子组砂岩;盖层为石千峰组厚层泥岩	以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氮源岩-主要与烃类、二氧化碳、氦气伴生
阿克莫木气田	塔里木盆地西南坳陷喀什凹陷北缘乌恰构造带		0.038 ~ 0.130/0.084	0.549 ~ 0.596	—	基底花岗岩与石炭系、二叠系及侏罗系泥岩	储层为下白垩统克孜勒苏群;盖层为白垩系和古近系泥岩	

续表 1 中国主要含氦天然气田(藏)地质-地球化学特征与氦气生-运-聚模式
Continue Table 1 Geology, geochemistry, and helium generation-migration-accumulation patterns of major helium-bearing gas fields (reservoirs) in China

气田名称	所属盆地及构造背景	天然气组分	氦气含量/%	R/R_a	氦气探明地质储量/(10^8 m^3)	氦源岩	储-盖组合	生-运-聚模式
金秋气田	四川盆地川中平缓褶皱带和川北低平褶皱带的过渡区域	烃类、氦气	0.050 ~ 0.100/0.071	0.010 ~ 0.080/0.033	1.500	三叠系须家河组煤系、侏罗系暗色泥岩	储层为侏罗系砂岩;盖层为侏罗系泥岩	以平缓褶皱带及斜坡为构造背景-以富铀、钍沉积岩为氦源-主要与烃类伴生
神木气田	鄂尔多斯盆地伊陕斜坡		0.017 ~ 0.116/0.052	—	1.730	石炭系-二叠系煤和暗色泥岩	储层为二叠系山西组和下石盒子组碎屑砂岩;盖层为石千峰组厚层泥岩	
太平庄气田	松辽盆地长春岭背斜带	烃类、氦气	0.140 ~ 0.190/0.157	0.310 ~ 0.480/0.390	0.002	壳-幔复合	储层为下白垩统泉头组;盖层为上白垩统青山口组和嫩江组下部泥岩	以背斜带为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源-主要与烃类伴生
花沟气田	渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷西南与惠民凹陷东南结合部位的断鼻带	氦气、氦气	2.080 ~ 3.080/2.580	3.100 ~ 3.190/3.145	—		储层为新近系明化镇组砂岩;盖层为明化镇组泥岩	以凹陷为构造背景-地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源-主要与氦气伴生
黄桥气田	苏北盆地南京凹陷北端黄桥复向斜带黄桥背斜	二氧化碳、氦气	0.109 ~ 0.571/0.340	1.960 ~ 3.240/2.600	—	幔源二氧化碳、氦气、氦气、高自然伽马砂层放射性成因的氦气、二叠系栖霞组灰岩变质成因的二氧化碳	储层为新近系下盐城组二段砂岩;盖层为下盐城组泥岩	以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源-主要与二氧化碳伴生
苏仁诺尔气藏、巴彦塔拉气藏	海拉尔盆地乌尔逊断陷苏仁诺尔和巴彦塔拉构造		0.003 ~ 0.198/0.101	1.200 ~ 1.490/1.345	—	壳幔复合	储层为白垩系南屯组、铜钵庙组砂岩、砂砾岩及基岩风化壳;盖层为白垩系南屯组泥岩	
宝月气藏	三水盆地宝月凹陷宝月背斜	烃类、二氧化碳、氦气、氦气	0.110 ~ 0.259/0.185	4.090 ~ 4.560/4.325	—	壳幔复合	储层为古近系布心组砂岩;盖层为布心组泥岩	以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源-主要与烃类、二氧化碳、氦气伴生

注: $R/R_a = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} / (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{大气}}$ 。氦气含量与 R/R_a 数值为“最小值~最大值/平均值”。“—”为无数据。

内,也分布于页岩气、煤层气和水溶气藏中,呈现出平面广、层系跨度大和类型多的分布特征(图1)。

依据大地构造背景,中国含油气沉积盆地自西向东划分为挤压型、过渡型和拉张型3种类型,氦气宏观分布受大地构造格局控制,西部、中部和东部的成因类型各异。西部挤压型含油气盆地地壳最厚,构造活动远弱于东部盆地而略强于中部盆地,以壳源氦气为主,少量幔源氦气,氦气主要与烃类和非烃气伴生^[47]。塔里木盆地和田河气田氦气含量平均值为0.320%, R/R_a ($R/R_a = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} / (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{大气}}$) 为0.075,柴达木盆地东坪气田氦气含量平均为0.380%, R/R_a 为0.011(表1),二者均以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型氦气生-运-聚模式。中部过渡型含油气盆地地壳厚度中等,构造最稳定,以典型的壳源氦气为主,氦气主要与烃类伴生。鄂尔多斯盆地东胜气田氦气含量平均值为0.133%, R/R_a 为0.024,以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型氦气生-运-聚模式。四川盆地金秋气田氦气含量平均为0.071%, R/R_a 为0.033,以斜坡为

构造背景-以富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型氦气生-运-聚模式。东部拉张型含油气盆地地壳最薄,构造活动性最强,成因与上地幔隆升有关,因而混有较多的幔源氦气,以壳-幔源氦气为主,氦气主要与非烃类伴生。渤海湾盆地花沟气田氦气含量为2.580%, R/R_a 为3.200,以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源-主要与氦气伴生型氦气生-运-聚模式^[48-56](图1;表2)。

2.2 地质条件

通过对比国内外典型富氦天然气田(藏),认为氦气地质条件包括古隆起背景、氦源岩、储集层、盖层和断裂等,其中古隆起背景、氦源岩和断裂是氦气富集的关键因素。

2.2.1 古隆起有利于氦气聚集

作为油气运聚指向区,古隆起不仅是常规石油与天然气的聚集区,也是氦气的潜在富集区。在中国西部、中部和东部,存在不同年代、成因和规模的古隆起/凸起,如塔里木盆地塔中隆起、鄂尔多斯盆地中央古隆

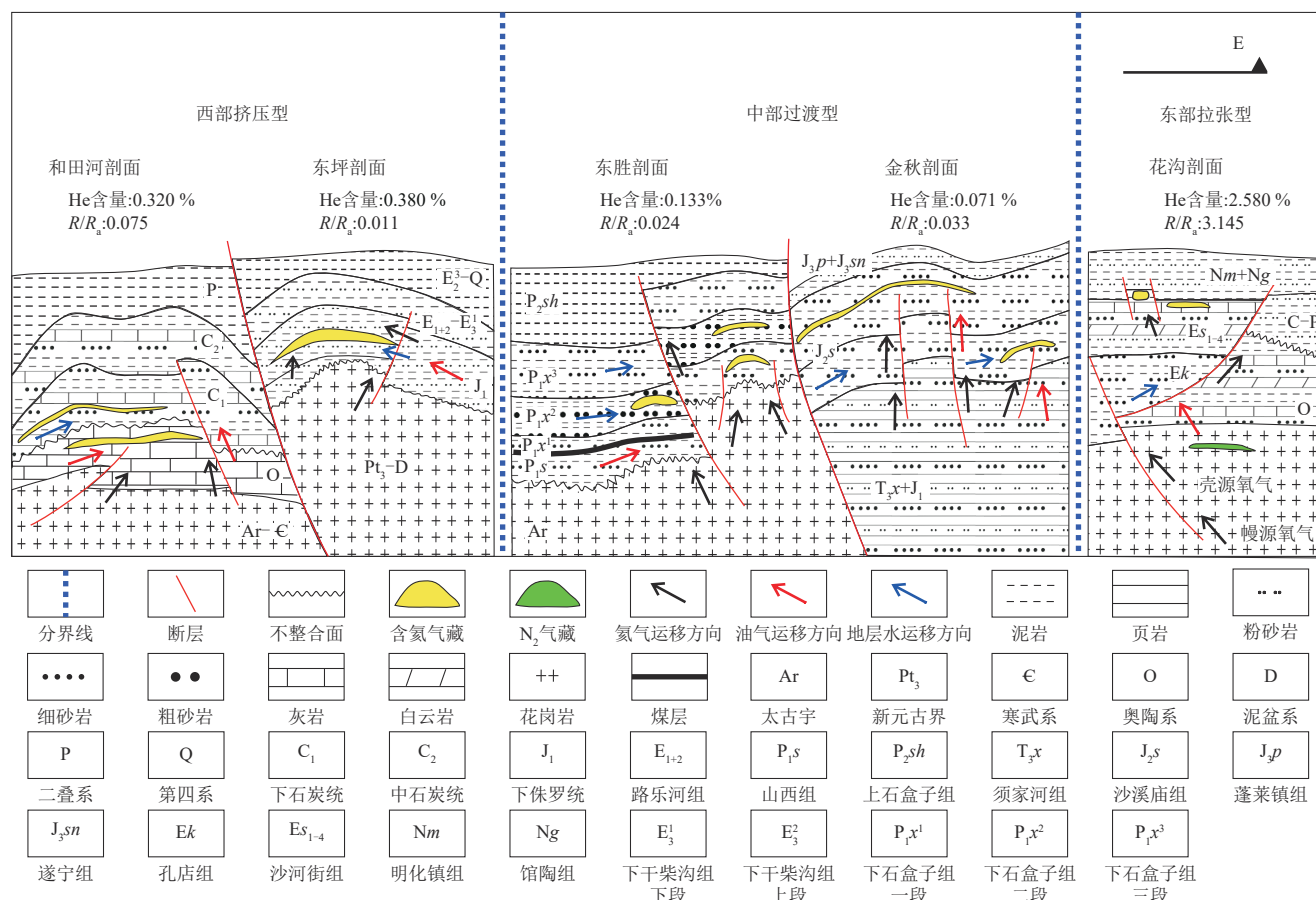


图1 中国氦气大地构造背景与典型富集模式对比剖面

Fig. 1 Section showing the correlation of the geotectonic settings and typical enrichment patterns of helium in China

表2 中国典型含氦盆地地质参数

Table 2 Geological parameters of typical helium-bearing basins in China

主要参数	挤压型含油气盆地		过渡型含油气盆地		拉张型含油气盆地	
	塔里木	柴达木	鄂尔多斯	四川	松辽	渤海湾
面积/(10 ⁴ km ²)	56	12	32	23	26	20
基底	Ar, Pt 结晶基底	Pz 褶皱基底	AnZ 结晶基岩	Pt 结晶基岩	Pz 褶皱基底	AnZ 结晶基岩
沉积盖层	Pz, Mz	Mz, R, Q	Z, Pz, Mz	Z, Pz, Mz	J, K, R, Q	Z, Pz, Mz, R, Q
沉积岩厚度/km	5 ~ 12	3 ~ 10	6 ~ 7	6 ~ 10	4 ~ 6	3 ~ 10
磁场特征	北东、东西、北西3组 磁场带	北西西宽缓正异常	宽缓磁场正异常	宽缓变化菱形磁场正异常	宽缓正异常	NE 向正、负异常
重力加速度/ (10 ⁻⁵ m/s ²)	-225 ~ -125	-350 ~ -325	-170 ~ -130	-170 ~ -90	10 ~ 20	10 ~ 20
地壳厚度/km	39 ~ 45	50 ~ 55	43 ~ 44	38 ~ 42	27 ~ 35	29 ~ 37
地温梯度/(°C/km)	17 ~ 20	20 ~ 28	22 ~ 27	25 ~ 30	37	33 ~ 45
岩浆活动	二叠纪辉绿岩、玄武岩	古生代花岗岩	晚三叠世凝灰岩	二叠纪玄武岩	第四纪玄武岩	新生代玄武岩
含气层系	新近系、古近系、侏罗系、石炭系、奥陶系	第四系、新近系、古近系、石炭系	二叠系、石炭系、奥陶系、寒武系	侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系、寒武系、震旦系	白垩系	新近系—震旦系
盆地构造类型	碰撞挤压带之间大型复合盆地	碰撞挤压带之间大型复合盆地	板内多旋回拗陷盆地	板内多旋回拗陷盆地	板内断—拗盆地	板内多旋回断—拗盆地
氦气来源	壳源为主, 少量幔源	壳源为主, 少量幔源	壳源	壳源	壳—幔复合	
主要氦气生—运—聚模式	以古隆起为构造背景—以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积层为氦源岩—主要与烃类、非烃气伴生		以古隆起为构造背景—以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积层为氦源岩—主要与烃类伴生, 以古隆起为构造背景—以上覆富铀、钍沉积层为氦源岩—主要与烃类伴生		以凹陷为构造背景—以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩—主要与非烃气伴生	

起、四川盆地乐山—龙女寺古隆起、渤海湾盆地与松辽盆地凹陷中发育的古凸起。目前已在这些古隆起上发现多个大中型油气田和高氦气田, 显示出其在常规油气和氦气上的资源潜力和勘探前景。

以鄂尔多斯盆地中央古隆起为例, 该构造对庆阳气田氦气富集具有显著影响。中央古隆起通过控制沉积相带和规模储集层的发育, 对庆阳气田氦气富集起到了基础性作用。中央古隆起在晚古生代继承性存在, 导致上、下古生界之间形成了特殊的源—储配置关系。加里东运动末期的构造抬升作用造成了奥陶系沉积后长时间的沉积间断, 形成了由东向西至古隆起区奥陶系顶部地层由新到老依次剥露的岩溶古地貌格局。这种特殊的源—储配置关系为后期天然气成藏奠定基础, 显著影响了天然气中氦气的含量和分布。此外, 中央古隆起的长期稳定存在为庆阳气田氦气的长期富集和保存提供了有利条件。古隆起区的长期隆起剥蚀作用, 形成了稳定的构造环境, 有利于氦气长期保留和富集。因此, 中央古隆起通过控制沉积格局、形成特殊的源—储配置关系、提供稳定的构造环境等多方面作用, 对庆阳气田氦气的富集起到了关键影响。古

隆起的两翼斜坡带不仅是油气聚集的有利区带, 也可能成为氦气富集的区域, 因为油气和氦气在地质过程中常常相伴生。庆阳气田的高含氦井大多分布在中央古隆起的翼部斜坡带(图2)。

2.2.2 基底花岗岩类为优质氦源岩

岩石中的铀以多种形式存在, 主要作为附属矿物的组成部分, 如亚山石、铀矿石、锆石、单氮石、异晶石、锐钛矿、金红石、赤铁矿和焦绿石, 也存在于各种岩石矿物的替代地点, 特别是长石、绿泥石、黑云母、角闪石、辉石和磷灰石, 其中铀主要替代钙。铀还与沉积物中的各种胶体和碳质有关, 吸附或存在于微小的矿物颗粒中, 如铀矿, 通常分布于晶体、间隙、小裂缝、裂缝和其他不连续点上, 这两种形式通常是岩石中容易浸出的铀的来源。

在正常的火成岩中, 大部分钍存在于副矿物中, 尤其是辉石、独居石、亚山石、锆石、锐钛石、金红石和钙钛矿; 其他矿物中有微量或少量钍, 如萤石、磷灰石、赤铁矿、石英、长石和云母(主要在夹杂物中); 钍在沉积岩和变质岩中的位置与火成岩相似, 在某些沉积岩中,

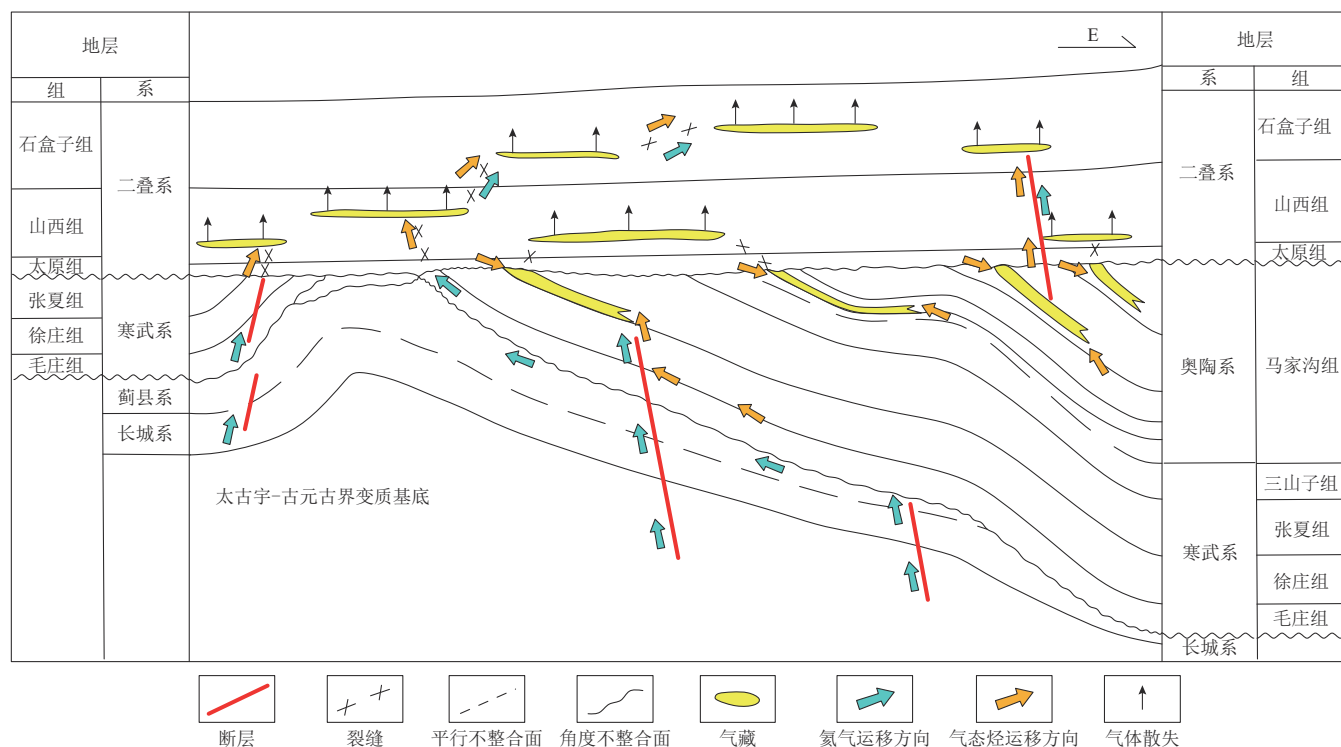


图2 鄂尔多斯盆地庆阳富氦气田形成关键因素配置

Fig. 2 Configuration of key elements for the formation of Qingyang helium-rich gas field in the Ordos Basin

独居岩和其他胶体材料中也可能有大量的钍结合。

铀、钍等放射性元素在各类岩石中广泛分布,不同类型的岩石中其含量差异明显。一般认为,富有机质页岩和花岗岩中铀、钍等放射性元素含量较高,可视为潜在氦源岩,而灰岩和砂岩的铀含量普遍在 2.2×10^{-6} 以下,钍含量在 2.0×10^{-6} 以下,低于上地壳中平均含量,不具备良好的生氦潜力。

以鄂尔多斯盆地庆阳气田为例,磁力异常分析揭示了盆地基底的地质特征,表明其具有多阶段拼合的地质历史。高磁异常条带主要对应太古宇与古元古界片麻岩和变粒岩等基底强磁性变质岩及基性火山岩,低磁异常条带主要对应板岩、千枚岩和片岩等基底弱磁性变质岩。这些强磁性岩体不仅产生了磁力异常,也是氦气的源岩。庆阳气田基底整体显示高磁异常,通常磁感应强度在 $20 \sim 400$ nT,局部区域甚至高达 400 nT。庆深1井(地质年龄约为 $2\,045\text{ Ma} \pm 23\text{ Ma}$)中发现了含有黑云母的角闪片麻岩和片麻质花岗岩。通过测井数据和对应的岩石样本微量元素分析,铀和钍平均含量分别为 3.44×10^{-6} 和 18.42×10^{-6} ,生氦强度为 $0.94 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{a} \cdot \text{g})$,显示出良好的生氦潜力。

2.2.3 断裂促进氦气释放与运移

构造活动形成的断层和裂隙提供了氦气迁移通

道,降低了地层压力,使得含氦流体能够更有效地迁移。断层带内的岩石破碎产生了大量裂缝和裂隙,这些裂缝和裂隙降低了地层压力,有利于含氦流体的定向流动。这种地质环境为氦气的释放和迁移提供了理想的条件,使得氦气能够从源岩中释放出来,沿着断层通道迁移,并最终在有利的储层中聚集形成富氦天然气藏。

在鄂尔多斯盆地,断裂分布与氦气含量之间存在着直接联系。这种关系主要体现在,断裂作为氦气迁移的主要通道,同断裂活动一起,共同对氦气富集区的形成起到了关键作用。庆阳气田基底断裂发育,地下流体有良好的运移条件。城探3井区存在2条与基底相连的断裂,最东侧的断层从元古届穿透至奥陶系,表明早古生代的断裂活动仍在持续,为地壳生成的氦气提供了向上垂向迁移的通道。氦气在基底生成后,沿着断裂迁移至寒武系和奥陶系风化壳附近,并通过不整合面进入石炭系-二叠系储层。相较之下,中央古隆起核部区域的庆探2井区和陇47井区的基底断裂发育不完全,这可能是城探3井区氦气丰度相对较高的主要原因^[23-29]。

在中国东部,尤其是郯庐断裂带,幔源氦气主要分布在板块构造缝合线、基底断裂带及裂谷盆地区。在地壳相对富含氦元素的地幔部分,其释放的气体物质

会通过沟通地幔的基底断裂,从深层逐渐迁移至浅层,聚集形成以非烃类气体为主的富氦气藏,形成了不同于中、西部的氦气生运聚模式(图1)。

2.3 生-运-聚模式

特殊的地台规模与构造演化史使中国具有不同于北美或其他地区的氦气地质条件。笔者系统梳理了典型含氦天然气田(藏)的地质条件,明确氦源岩与储-盖组合,结合盆地构造背景,进一步分析氦气聚集机制,划分出7种氦气生-运-聚模式。

1) 以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型。天然气主要组分为烃类和氦气;氦气含量较高,储量大;构造背景为中、西部克拉通盆地古隆起;氦源岩为基底花岗岩类和上覆古生界、中生界泥岩、煤、铝土岩;储层主要为基岩风化壳、前寒武系与下古生界碳酸盐岩、上古生界、中生界与新生界砂岩;盖层主要为泥岩、膏质泥岩和膏质碳酸盐岩。典型气田如塔里木盆地和田河气田,柴达木盆地尖北气田、东坪气田和马北气田,四川盆地威远气田,鄂尔多斯盆地庆阳气田和黄龙气田。

2) 以古隆起为构造背景-以基底花岗岩类与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类、二氧化碳和氮气伴生型。天然气组分为烃类、二氧化碳、氮气和氦气;氦气含量较高,储量较小;构造背景、氦源岩、储-盖组合与克拉通古隆起基底及沉积层多元供氦气-烃类伴生型相似。典型气田如鄂尔多斯盆地东胜气田和塔里木盆地阿克莫木气田。

3) 以平缓褶皱带及斜坡为构造背景-以富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型。天然气主要组分为烃类和氦气;氦气含量较高,储量较大;构造背景为构造过渡区或斜坡;氦源岩为古生界和中生界泥岩、煤和铝土岩;储层主要为上古生界和中生界砂岩;盖层主要为厚层泥岩。典型气田如四川盆地金秋气田和鄂尔多斯盆地神木气田。

4) 以背斜带为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类伴生型。天然气主要组分为烃类和氦气;氦气含量较高,储量小;构造背景为裂谷盆地古隆起;氦源岩为壳-幔多元复合;储层主要为中生界砂岩;盖层主要为厚层泥岩。典型气田如松辽盆地太平庄气田。

5) 以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与氮气伴生型。天然气主要组分为氮气和氦气;氦气含量高,储量小;位于裂谷盆地断鼻带;氦源岩为壳-幔多元复合;储层主要为新生界砂岩;盖层

主要为厚层泥岩。典型气田如渤海湾盆地花沟气田。

6) 以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与二氧化碳伴生型。天然气主要组分为二氧化碳和氦气;氦气含量高,储量小;位于裂谷盆地复向斜带;氦源岩为壳-幔多元复合;储层主要为新生界砂岩;盖层主要为厚层泥岩。典型气田如苏北盆地黄桥气田。

7) 以凹陷为构造背景-以地幔与上覆富铀、钍沉积岩为氦源岩-主要与烃类、二氧化碳和氮气伴生型。天然气主要组分为烃类、二氧化碳、氮气和氦气;氦气含量低,储量小;位于裂谷盆地凹陷;氦源岩为壳-幔多元复合;储层主要为新生界砂岩;盖层主要为厚层泥岩。典型气田如三水盆地宝月气田(表1)。

3 资源潜力与产量预测

如前所述,与美国和世界其他地区不同,中国地台规模较小,构造演化史漫长、多期且复杂,因此氦气呈现平面广、层系跨度大和类型多的分布特征。这使得氦气勘探发现和氦气资源潜力认识过程更为曲折,目前尚无公开发表的中国政府相关部门或石油公司评价的全国氦气资源量数据。根据氦气含量超过0.01%的标准,初步估算,中国氦气资源量约为 $78.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,以西部塔里木盆地和柴达木盆地以及中部四川盆地和鄂尔多斯盆地为主要分布区^[20]。

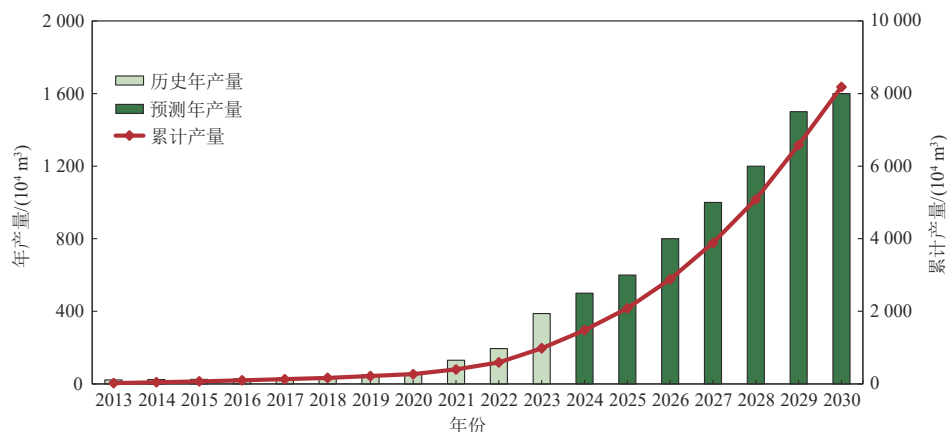
以2013—2023年中国氦气年产量为历史数据,以氦气资源量为约束,综合国家和石油公司的氦气发展规划,预测出2024—2030年中国氦气产量。2025年中国氦气年产量将达到 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其后,随着氦气勘探开发理论的完善和关键技术方法的突破,发现并投入生产的富氦和高氦天然气田将持续增加,氦气生产将进入快速增长阶段。到2030年,全国氦气年产量将达到 $1\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$,2013—2030年中国氦气累计产量将达到 $8\,182 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图3)。

4 面临的问题和前景展望

4.1 面临的问题

4.1.1 氦气富集理论研究

近年来,国家高度重视氦气地质理论攻关,学者们在氦气地质条件与分布特征研究方面取得较大进展,支撑了氦气调查与评价,但对富氦天然气成藏条件、形

图3 中国2024—2030年氦气年产量和累计产量预测^[13]Fig. 3 Predicted annual and cumulative helium production from 2024 to 2030 in China^[13]

成机理与分布规律的认识仍需要不断深入。

因此,需要深入开展氦源岩潜力和有效性表征与氦气释放机制、复杂地质介质中氦气的运聚及富氦气藏封盖机制研究和富氦天然气藏动态富集成藏机制研究。建立并不断完善适合中国地质条件的作为天然气伴生资源的氦气成藏理论,提出以氦气为核心的生成、迁移和聚集的无机气富集理论。

4.1.2 氦气资源潜力评价

由于氦气调查与勘探起步较晚,积累的氦气地质资料和数据较少,导致对中国氦气地质条件与资源潜力评价基础较为薄弱。

因此,需要深入开展氦气资源评价方法与关键参数研究,评价重点盆地和地区氦气资源量。构建以氦源强度-聚集效率-封盖能力为核心的氦气资源评价和有利区带预测技术,寻找更多富氦天然气勘探有利区带和目标。

4.1.3 氦气勘探开发技术研发

与常规天然气不同,氦气具有低分子量、高活性、“惰性”和难以察觉的特性,需要针对性的勘探开发技术。

因此,需要围绕氦气有效勘探开发,深入研发地球物理采集、处理与解释技术,惰性气体组分与同位素精准检测技术,氦气释放与运移物理模拟及动力学数值模拟技术,氦气人工智能勘探开发等技术并及时应用到生产实践中。

4.2 前景展望

现阶段,中国自产氦气仅占总需求的小部分,绝大多数需依赖进口,中国对氦气的需求仍将持续上升。

2030年前,中国氦气需求主要依靠国内、国际两个渠道,尤其要依靠国内氦气产量的不断提升和突破。为此,要持续稳定增加中国氦气勘探开发投入,发现富氦及高氦气田(藏)、提交氦气探明储量,制定适合的氦气开发方案并投入生产,这是确保中国氦气资源供应的基础。此外,国际上,美国对氦气出口实施一系列限制政策,对中国氦气进口带来前所未有的挑战,需要不断拓展氦气供应渠道,实现长期稳定供氦,确保中国氦气需求能得到有效满足。

5 结论

1) 氦气与烃类或者非烃类(二氧化碳、氮气)伴生,既可以赋存在常规天然气藏中,也可赋存在非常规天然气藏(页岩气、煤层气、水溶气等)中。中国氦气含量大于0.10%的富氦气田(藏)主要分布于中、西部构造稳定区的四川盆地、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地等,东部岩浆构造活动区的松辽盆地、渤海湾盆地和苏北盆地等。

2) 中国西部挤压型盆地以壳源氦气为主,少量幔源氦气,与烃类和非烃气伴生。中部过渡型盆地主要为壳源氦气,与烃类伴生。东部拉张型盆地以壳-幔源氦气为主,氦气主要与非烃类气伴生。氦气生-运-聚模式可划分为7种。

3) 与世界其他地区不同,中国地台规模较小且构造演化史漫长、多期且复杂,氦气呈现平面广、层系跨度大和类型多的分布特征。这使得氦气勘探发现过程曲折、面临更多的科学问题与技术挑战。因此,提出并不断完善适合中国地质条件的氦气富集理论、准确评价氦气资源潜力及分布规律、创新氦气勘探开发技术是中国氦气产量快速上升与稳定发展的关键。

参 考 文 献

- [1] NUTTALL W J, CLARKE R H, GLOWACKI B A. The future of helium as a natural resource[M]. London: Routledge, 2012.
- [2] CAI Zhiming, CLARKE R H, GLOWACKI B A, et al. Ongoing ascent to the helium production plateau—Insights from system dynamics[J]. Resources Policy, 2010, 35(2): 77–89.
- [3] ANDERSON S T. Economics, helium, and the U. S. federal helium reserve: Summary and outlook [J]. Natural Resources Research, 2018, 27(4): 455–477.
- [4] HAMAK J E. 2015 Minerals yearbook-helium [R]. Virginia: United States Geological Survey, 2017.
- [5] 郝旭平. 关于我国氦气资源立法保护问题的建议[J]. 石油与天然气化工, 2009, 38(5): 393–395.
HAO Xuping. Discuss on domestic legislation protection for helium gas resource [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2009, 38(5): 393–395.
- [6] 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 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.
- [7] USGS. Mineral commodity summaries 2023[EB/OL]. [2023–12–19]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>.
- [8] PIERCE A P, GOTT G B, MYTTON J W. Uranium and helium in the Panhandle gas field, Texas, and adjacent areas: Professional paper 454-G[R]. Washington, D. C. : U. S. Government Printing Office, 1964: 57.
- [9] OZIMA M, IGARASHI G. The primordial noble gases in the Earth: a key constraint on Earth evolution models[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 176(2): 219–232.
- [10] 张哲, 王春燕, 王秋晨, 等. 中国氦气市场发展前景展望[J]. 油气与新能源, 2022, 34(1): 36–41.
ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Development prospects of China's helium market [J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(1): 36–41.
- [11] BRADSHAW A M, HAMACHER T. Nuclear fusion and the helium supply problem [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9/10): 2694–2697.
- [12] 王晓锋, 刘文汇, 李晓斌, 等. 氦气资源的形成聚集与中国氦资源前景[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集, 杭州, 2019. 贵阳: 中国矿物岩石地球化学学会, 2019: 1154–1155.
WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. The formation and accumulation of helium resources and the prospects of helium resources in China [C]//Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry. Summary Collection of Papers at the 17th Academic Annual Conference of Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, Hangzhou, 2019. Guiyang: Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2019: 1154–1155.
- [13] 刘成林, 张亚雄, 王馨佩, 等. 中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比及启示[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 1–10.
LIU Chenglin, ZHANG Yaxiong, WANG Xinpei, et al. Comparison and enlightenment of helium geological conditions and resource potential between China and the United States [J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 1–10.
- [14] BROWN A. Origin of helium and nitrogen in the Panhandle-Hugoton field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(2): 369–403.
- [15] DANABALAN D. Helium: Exploration methodology for a strategic resource[D]. Durham: Durham University, 2017.
- [16] FAIRHURST B, EWING T, LINDSAY B. West Texas (Permian) Super Basin, United States: Tectonics, structural development, sedimentation, petroleum systems, and hydrocarbon reserves [J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(6): 1099–1147.
- [17] CHENG Anran, SHERWOOD LOLLAR B, GLUYAS J G, et al. Primary N₂-He gas field formation in intracratonic sedimentary basins [J]. Nature, 2023, 615(7950): 94–99.
- [18] 陈悦, 陶士振, 杨怡青. 中国氦气地球化学特征、聚集规律与前景展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 145–167.
CHEN Yue, TAO Shizhen, YANG Yiqing. Geochemistry characteristics, accumulation regularity and development prospect of helium in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 145–167.
- [19] 陶士振, 吴义平, 陶小晚, 等. 氦气地质理论认识、资源勘查评价与全产业链一体化评价关键技术[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 351–367.
TAO Shizhen, WU Yiping, TAO Xiaowan, et al. Helium: Accumulation model, resource exploration and evaluation, and integrative evaluation of the entire industrial chain [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1): 351–367.
- [20] 李剑, 王晓波, 徐朱松, 等. 中国氦气资源成藏规律与开发前景[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(5): 851–868.
LI Jian, WANG Xiaobo, XU Zhulong, et al. Helium resources accumulation regulations and their development prospects in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(5): 851–868.
- [21] 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, 2022, 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, 2022, 42(7): 125–134.
- [22] 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.
- [23] 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 Yuhong, LU Jincan, LI Jinchao, et al. Genetic characteristics of the natural gas in Weihe Basin and its significance [J]. Journal

- of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2011, 26 (5): 11-16.
- [24] 李玉宏, 张国伟, 周俊林, 等. 氦气资源调查理论与技术研究现状及建议[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 1-10.
- LI Yuhong, ZHANG Guowei, ZHOU Junlin, et al. Research status and suggestions on helium resource investigation theory and technology[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 1-10.
- [25] 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.
- [26] 张雪. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHANG Xue. Accumulation conditions and resource prediction of nature gas and helium gas in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [27] 刘成林, 丁振刚, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地含氮天然气地球化学特征与富集影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45 (2): 384-392.
- LIU Chenglin, DING Zhengang, FAN Liyong, et al. Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45 (2): 384-392.
- [28] 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 and Experiment, 2022, 44(1): 1-10.
- [29] 刘成林, 丁振刚, 陈践发, 等. 鄂尔多斯盆地氦源岩特征及生氦潜力[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1546-1554.
- LIU Chenglin, DING Zhengang, CHEN Jianfa, et al. Characteristics and helium-generating potential of helium source rocks in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1546-1554.
- [30] 王杰, 贾会冲, 陶成, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区东胜气田氦气成因来源及富集规律[J]. 天然气地球科学, 2023, 34 (4): 566-575.
- WANG Jie, JIA Huichong, TAO Cheng, et al. Source and enrichment regularity of helium in Dongsheng Gas Field of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 566-575.
- [31] 魏国齐, 王东良, 王晓波, 等. 四川盆地高石梯—磨溪大气田稀有气体特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 533-538.
- WEI Guoqi, WANG Dongliang, WANG Xiaobo, et al. Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti-Moxi Gas Field in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 533-538.
- [32] 作宗涛, 刘兴旺, 李孝甫, 等. 稀有气体同位素在四川盆地元坝气藏气源对比中的应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28 (7): 1072-1077.
- WU Zongtao, LIU Xingwang, LI Xiaofu, et al. The application of noble gas isotope in gas-source correlation of Yuanba reservoir, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1072-1077.
- [33] 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 sources of Weiyuan gasfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25 (5): 473-480.
- [34] 刘凯旋, 陈践发, 付饶, 等. 威远气田富氮天然气分布规律及控制因素探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46 (4): 12-21.
- LIU Kaixuan, CHEN Jianfa, FU Rao, et al. Discussion on distribution law and controlling factors of helium-rich natural gas in Weiyuan Gas Field [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 12-21.
- [35] 张宝收, 张本健, 汪华, 等. 四川盆地金秋气田: 一个典型以中生界沉积岩为氦源岩的含氮-富氦气田[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 185-199.
- ZHANG Baoshou, ZHANG Benjian, WANG Hua, et al. The Jinqu Gas Field in the Sichuan Basin: A typical helium-bearing to helium-rich gas field with the Mesozoic sedimentary rocks as helium source rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 185-199.
- [36] 赵安坤, 王东, 时志强, 等. 四川盆地及周缘地区氦气资源调查研究进展与未来工作方向[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 74-84.
- ZHAO Ankun, WANG Dong, SHI Zhiqiang, et al. Exploration status and helium resource potential of the helium-bearing natural gas field in Sichuan Basin and its surrounding areas [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 74-84.
- [37] 彭威龙, 林会喜, 刘全有, 等. 塔里木盆地氦气地球化学特征及有利勘探区[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 576-586.
- PENG Weilong, LIN Huixi, LIU Quanyou, et al. Geochemical characteristics of helium and favorable exploration areas in the Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 576-586.
- [38] 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-He pool in the Carboniferous of Xiaohaizi Formation of Bashitou structure [J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(2): 18-20.
- [39] 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 Quanyou, DAI Jinxing, JIN Zhijun, 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.
- [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 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.
- [41] 马明, 范桥辉. 常规天然气伴生氦气成藏条件——以柴达木盆地北缘地区为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 587-600.
MA Ming, FAN Qiaohui. Accumulation conditions of helium in natural conventional gas reservoirs: Case study of the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34 (4): 587-600.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 刘军, 王波, 周飞, 等. 柴达木盆地东坪气田氦源岩成因及其对天然气藏中氦气的影响[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34 (4): 601-617.
LIU Jun, WANG Bo, ZHOU Fei, et al. Genesis of helium source rock in Dongping Gas Field, Qaidam Basin and its influence on helium in natural gas reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 601-617.
- [45] 谢菁, 陈建洲, 李青, 等. 柴达木盆地北缘富氦天然气分布与成藏模式[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(3): 486-495.
XIE Jing, CHEN Jianzhou, LI Qing, et al. Helium accumulation model in the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(3): 486-495.
- [46] 刘雨桐, 段堃, 张晓宝, 等. 基岩型富氦气藏形成条件——以柴达木盆地东坪气田和美国中部潘汉德—胡果顿气田为例 [J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 618-627.
LIU Yutong, DUAN Kun, ZHANG Xiaobao, et al. Formation conditions of helium-rich gas in bedrock reservoirs: Taking Dongping Gas Field in Qaidam Basin and Panhandle-Hugoton Gas Field in central United States as examples [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 618-627.
- [47] 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(增刊 1): 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(S1): 364-371.
- [48] 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.
- [49] 顾延景, 张保涛, 李孝军, 等. 济阳坳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 Huagou area of Jiyang Depression: Taking Well Hua 501 as an example [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 257-266.
- [50] 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.
- [51] 杨春, 陶士振, 侯连华, 等. 松辽盆地火山岩储层天然气藏He同位素组成累积效应[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 109-115.
YANG Chun, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Accumulative effect of helium isotope in gas volcanic reservoirs in Songliao Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 109-115.
- [52] 刘金华, 葛政俊, 李晓凤. 苏北盆地CO₂气藏成藏规律及富氦成因[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(3): 477-485.
LIU Jinhua, GE Zhengjun, LI Xiaofeng. The accumulation law and helium rich genesis of CO₂ gas reservoir in Subei Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(3): 477-485.
- [53] 王杰, 刘文汇, 秦建中, 等. 苏北盆地黄桥CO₂气田成因特征及成藏机制[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(6): 826-834.
WANG Jie, LIU Wenhui, QIN Jianzhong, et al. Reservoir forming mechanism and origin characteristics in Huangqiao carbon dioxide gas field, north Jiangsu Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 826-834.
- [54] 李德生. 中国含油气盆地的构造类型[J]. *石油学报*, 1982, 3 (3): 1-12.
LI Desheng. Tectonic types of oil and gas basins in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(3): 1-12.
- [55] 王平在, 李明生, 王江. 海拉尔盆地乌尔逊含氦二氧化碳气藏石油地质特征及勘探前景[J]. *特种油气藏*, 2003, 10(6): 9-12.
WANG Pingzai, LI Mingsheng, WANG Jiang. Petroleum geology and exploration potential of Wuerxun helium-bearing CO₂ gas reservoir in Hailaer Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2003, 10(6): 9-12.
- [56] 沈鹏飞, 张振国, 姜正龙, 等. 三水盆地油气成藏条件[J]. *河北理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(3): 102-106.
SHEN Pengfei, ZHANG Zhenguo, JIANG Zhenglong, et al. Preliminary analysis of hydrocarbon accumulation condition in Sanshui Basin [J]. *Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2010, 32(3): 102-106.

(编辑 王迪)