

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

何发岐¹, 王付斌¹, 王杰^{2,3}, 邹彦荣¹, 安川¹, 周小勇¹,
马亮帮^{2,3}, 赵永强^{2,3}, 张瑾¹, 刘棣民¹, 姜海健^{2,3}

1. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450006;

2. 中国石油化工集团有限公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126

摘要:近年来,随着鄂尔多斯盆地北缘杭锦旗地区东胜气田勘探开发进程的逐步推进,发现在该地区天然气中普遍伴生具有工业价值的氦气。通过对东胜气田166口井天然气样品分析发现,氦气含量为0.045%~0.487%,达到含氦-富氦气田标准。气田中部独贵汗区带及北部什股壕区带2个基底断裂发育区氦气含量较高,平均含量大于0.1%,具有较大的氦气勘探开发潜力。纵向上从下(盒1段)到上(盒3段)氦气含量依次降低,盒1段和盒2段氦气含量较高,均大于0.1%,为主要的氦气勘探开发层系。根据氦气同位素组成发现,东胜气田氦气为典型的壳源成因,主要来源于基底的太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系,氦气分布受基底岩相和深大断裂双重控制,高值区主要沿泊尔江海子等通基底断裂两侧分布,在二级断裂的通氦源断裂与四级断裂的输导体系交汇处和太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系基底发育区富集。通过对东胜气田重点天然气井中短期内氦气含量随气井生产动态的变化特征研究,发现天然气在较长的开发时期内氦气含量保持稳定;按照体积法计算,其氦气探明储量为 $2.444 \times 10^8 \text{ m}^3$,三级储量为 $8.304 \times 10^8 \text{ m}^3$,是目前我国第一大特大型含氦—富氦气田,资源潜力巨大。建议选取东胜气田作为氦气资源开发利用的先导试验区,加快论证建设氦气战略储备基地的可行性;同时加强主要含油气盆地天然气中氦气成藏规律、资源潜力评价以及氦气等伴生资源的综合利用研究,指导氦气资源勘探开发和综合利用。

关键词:氦气丰度;氦气储量;特大型富氦气田;东胜气田;杭锦旗地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE132.3

文献标识码: A

Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field

HE Faqi¹, WANG Fubin¹, WANG Jie^{2,3}, ZOU Yanrong¹, AN Chuan¹, ZHOU Xiaoyong¹,
MA Liangbang^{2,3}, ZHAO Yongqiang^{2,3}, ZHANG Jin¹, LIU Dimin¹, JIANG Haijian^{2,3}

1. SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China

Abstract: With the developments of exploration and production of natural gas in the Dongsheng gas field of Hangjinqi area, northern part of Ordos Basin, industrial valued helium has been discovered in this area. Natural gases from 166 wells in the Dongsheng gas field were analyzed in this study and results show that the helium contents of these gases range from 0.045% to 0.487%, with an average value of 0.118%, indicating industrial value for the helium resource. Two basement-faults developed zones of Duguijiahan and Shiguhao in the center of the gas field have relative higher content of helium, with an average value higher than 0.1%, indicating a great exploration potential. The average helium contents decrease from the lower stratum (the first member of Xiashihezi Formation, P_1x^1) to the upper stratum (the third member of Xiashihezi Formation, P_1x^3), indicating that the P_1x^1 and P_1x^2 are potential targets for helium exploration and development. According to helium isotopic compositions, helium in the Dongsheng gas field has of a typical crust source, mainly from Archean-Proterozoic metamorphic rock-granite series in the

收稿日期: 2021-10-06; 修订日期: 2022-01-04。

作者简介: 何发岐(1967—),男,博士,教授级高级工程师,从事石油地质综合研究及油气勘探开发研究。E-mail: hefq.hbsj@sinopec.com。

通信作者: 安川(1987—)男,硕士,工程师,从事油气勘探研究。E-mail: anchuan.hbsj@sinopec.com。

基金项目: 中国石化重点科技项目“鄂尔多斯盆地大中型气田目标评价及勘探关键技术”(P17009)资助。

basement. It is clear that helium distribution in the Dongsheng gas field was controlled by both basement lithofacies and deep fractures. Helium is enriched mainly along deep basement fractures such as Borjianghaizi and Wulanjilinmiao, and at the intersection of second-level fractures communicating helium source and fourth-level faults being migration pathways, and in the areas of Archean-Proterozoic metamorphic rock-granite series basement distribution. The variation of helium content with gas well production performance in short and medium term of key natural gas wells in the Dongsheng gas field showed that the helium contents in natural gases are stable in a relatively long term. The proved helium reserves are $244.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ and the 3P reserves are approaching $830.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ by volume method. Thus, the Dongsheng gas field is considered as the first supergiant helium-rich gas field in China. It is suggested that the Dongsheng gas field in the Ordos Basin should be regarded as a pilot test area for the development and utilization of helium resources, and the feasibility of building helium strategic reserve base should be accelerated. The research on helium accumulation mechanism, resource potential evaluation and comprehensive utilization of helium and other associated resources in natural gas should be strengthened in major oil and gas bearing basins, in order to guide the exploration, development and comprehensive utilization of helium resources.

Key words: helium content; proved helium reserves; supergiant helium-rich gas field; Dongsheng gas field; Hangjinqi area; Ordos Basin

氦(He)是一种无色、无味、不燃烧也不助燃的稀有惰性气体,鉴于其特殊的物理、化学性质,氦气在国防军工、航空航天、核工业、临床医学、深海潜水、低温科学等高科技领域都有广泛应用,是一种不可替代、关系国家安全和高新技术产业发展的重要稀缺战略资源。美国、澳大利亚、欧盟等西方国家和地区先后把氦列为国家战略安全关键矿产资源之一。氦气在地球中含量极少,且在世界范围内的分布非常不均匀。据 USGS 2017 年公布的数据,全球氦气资源量为 $519 \times 10^8 \text{ m}^3$, 储量为 $74.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产量为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年需求量约为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。全球氦气资源主要分布在美国、阿尔及利亚、卡塔尔、俄罗斯和加拿大等国,其中美国是世界上氦气资源最丰富的国家,氦气资源量约占世界氦气资源量 40%, 储量和产量占 50% 以上;而中国的氦气资源量仅为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ [1-3], 仅占世界的 2% 左右,氦气资源相当匮乏。近年来我国氦气需求快速增长,2020 年我国氦气消费量约为 $2\ 240 \times 10^4 \text{ m}^3$ (据前瞻产业研究院调研报告,2020 年),自产仅为 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 自给率不足 1%, 其余主要从卡塔尔、美国、澳大利亚进口,资源安全形势十分严峻,存在被“卡脖子”的风险。

地球上的氦气含量极为稀少,最主要的来源是以游离态存在的富氦天然气藏,其具有工业经济价值的含量下限为 0.05% [4-5], 其次还有少量水溶氦。工业价值的氦气藏往往与载体气(烃类或二氧化碳、氮气)一起以游离态赋存于地层圈闭中,形成含氦油气藏或非烃气藏 [6-8]。我国氦气资源主要分布在我国东部的郯庐断裂带两侧的含油气

盆地、中西部的四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地及柴达木盆地等,此外部分地区的地热井/温泉中也有一定的氦气发现 [9-14]。我国对氦气资源的研究程度低,资源家底不清,仅在四川自贡威远气田进行了小规模提氦利用,部分地层中氦气含量约为 0.218%~0.342% 左右 [15-16], 而且现在已经基本枯竭。近年来,随着鄂尔多斯盆地油气勘探开发的深入,发现杭锦旗东胜气田上古生界天然气中氦气含量高,已测天然气中氦气含量为 0.045%~0.487%, 绝大部分气井氦气含量可以达到工业标准,具有较大的开发利用价值;但氦气分布特征、规律及资源量还不清楚,严重制约了氦气的勘探开发利用。东胜气田位于鄂尔多斯盆地北部,在区域构造上横跨伊盟隆起、伊陕斜坡、天环坳陷 3 个构造单元;气田主要产气层自上而下为二叠系下石盒子组盒 3 段、盒 2 段、盒 1 段,山西组山 2 段、山 1 段;气源岩主要为石炭系太原组、二叠系山西组的煤层、暗色泥岩与碳质泥岩,其中煤为主力生气源岩;盖层主要为二叠系上石盒子组及石千峰组的粉砂质泥岩、泥岩,泥岩盖层中含有较多的膨胀性矿物蒙脱石和伊利石-蒙脱石,具备较好的封阻能力,因此该区具有较好的生储盖组合条件 [17-24]。

1 样品采集与氦气测定

1.1 气样采集

根据杭锦旗地区东胜气田的天然气成藏区带、气藏单元、赋存砂体及层位等地质特征,结合气井生产动态,本文选取 59 口天然气生产井开展了为期一个月的连续动态监测;同时结合近 5 年的长期

氦气含量监测井,共计对166口生产井开展了天然气样品采集,基本上做到了区块、区带、层位上的全覆盖。由于东胜气田什股壕、独贵加汗区带氦气含量较高,且为目前主力开发区块,故以什股壕、独贵加汗区带天然气藏为研究重点,兼顾十里加汗、新召东区带,气样分布见表1和图1。为了最大限度地减少空气的影响,采用双阀耐高压钢瓶作为取样容器,正式取样前用拟采集的天然气对钢瓶进行多次反复冲洗,每次冲洗3~5 min,若井口压力小,增加冲洗次数,尽可能减少空气污染。

1.2 天然气中氦气含量及同位素测定

天然气中氦气含量和同位素分析由中国石化油气成藏重点实验室开发的天然气中稀有气体浓度与同位素比值联测仪器完成。天然气中氦气含量和同位素比值测定采用峰高比法。天然气中氦气成分检测采用气相色谱法,分析方法参照《天然气的组成分析——气相色谱法:GB/T 13610—2020》。天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值采用同位素质谱峰高比测定法分析,参照《稀有气体同位素比值测定方法:SY/T 7359—2017》。氦气含量分析采用Agilent7890气相色谱仪,色谱柱为HP-分子筛4 m×1/8 in;载气为高纯氮气(99.999%);检测器温度150℃,柱温80℃,进样器温度100℃;N₂柱流量19 mL/min。稀有气体同

位素分析采用Noblesse质谱仪,高压7.0 kV, Trap电流400 mA(测Ne、Ar、Kr、Xe时),500 mA(测He时); ^4He 、Ne、Ar用法拉第杯检测, ^3He 、Kr、Xe用电子倍增器和离子计数器检测。

以江苏无锡市惠山顶的空气样品作为实验室标准,采用峰高比法比较天然气样品与标样的进样量和峰高,氦气含量测定的相对标准偏差为 $\pm 2.9\%$,氦气同位素测定的相对标准偏差为 $\pm 5.0\%$ ^[25]。

2 氦气含量监测及分布特征

选取东胜气田重点气井,分别开展了为期一个月的连续动态监测以及5年内的连续年度动态监测,重点研究了天然气中氦气含量随气井生产动态的变化特征,并在此基础上分析东胜气田氦气含量的分布特征。

2.1 单井氦气含量稳定性分析

选取15口天然气生产井开展了为期一个月的连续取样分析,统计同一口井氦气含量数据并计算相对标准偏差来评价在一个月范围内单井氦气含量的变化趋势。经过系统取样分析,15件气样中同一口井氦气含量的相对标准偏差为0.96%~2.91%,均小于3%,表明在近一个月内氦气含量稳定,无明显变化(图2)。

选取4口产气井开展了近5年内的氦气含量连续动态监测,数据对比分析表明,同一口井氦气含量相对标准偏差为1.11%~3.34%,表明东胜气田单井氦气含量在相对长的时间内保持稳定(图3),进而可以用测得的氦气含量来估算氦气资源量。

2.2 氦气含量分布特征

通过对166口产气井的气样分析结果可以看出,氦气含量为0.045%~0.487%(均值0.118%),

表1 鄂尔多斯盆地东胜气田气样分布及特征

Table 1 Distribution of gas samples collected from Dongsheng gas field, Ordos Basin

编号	区带	主要产层	气样数量/个
1	什股壕	盒2段、盒3段	34
2	独贵加汗	盒1段、盒3段	93
3	新召东	盒1段、山2段	28
4	十里加汗	盒1段、盒3段	11

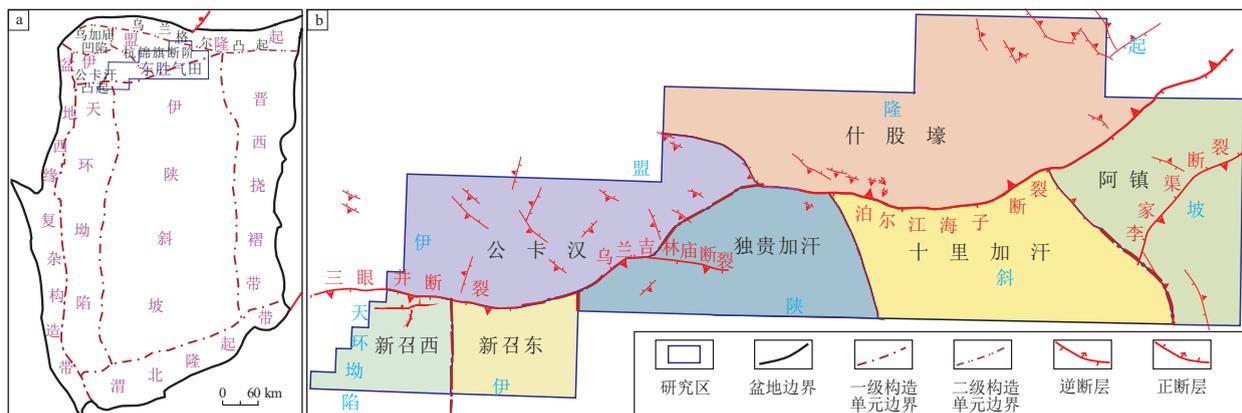


图1 鄂尔多斯盆地东胜气田构造位置(a)及区带划分(b)

Fig.1 Location (a) and zone division (b) of Dongsheng gas field, Ordos Basin

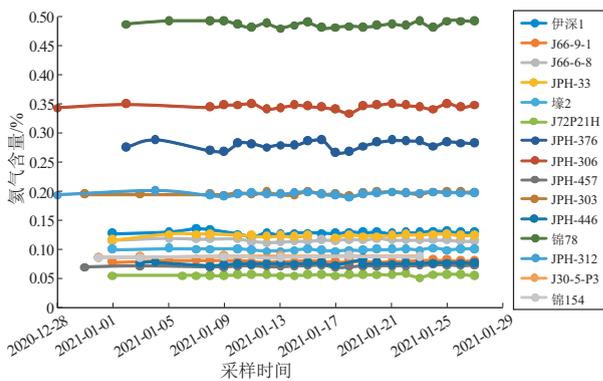


图 2 鄂尔多斯盆地东胜气田 15 口重点气井在一个月内的天然气中氦气含量变化特征

Fig.2 Variation characteristics of helium contents in natural gases of 15 wells within one month, Dongsheng gas field, Ordos Basin



图 3 鄂尔多斯盆地东胜气田 4 口重点井近 5 年内氦气含量变化

Fig.3 Variation curves of helium contents in natural gases of 4 key wells in recent 5 years, Dongsheng gas field, Ordos Basin

基本上都具有工业价值。独贵加汗区带氦气含量为 0.061% ~ 0.487%，氦气含量平均值较高，为 0.138%；其次为什股壕区带，其氦气含量为 0.072% ~ 0.158%，均值为 0.113%；新召和十里加汗区带氦气含量较低，分别为 0.066% ~ 0.094%（均值为 0.081%）和 0.043% ~ 0.076%（均值为 0.063%）（表 2，图 4）。氦气含量大于 0.1% 的井数占比最高为什股壕区带（占井数的 67.7%），其次为独贵加汗区带（占井数的 59.1%），说明这 2 个区带具有较大的氦气勘探开发潜力。

从生产层位分析，纵向上从下（盒 1 段）到上

表 2 鄂尔多斯盆地东胜气田不同区带氦气含量统计

Table 2 Statistics of helium contents in different zones of Dongsheng gas field, Ordos Basin

区带	样品井数/口	He 含量大于 0.1%井数/口	He 含量大于 0.1%井数占比/%	He 平均含量/%
什股壕	34	23	67.7	0.113
独贵加汗	93	55	59.1	0.138
新召东	28	0	0	0.081
十里加汗	11	0	0	0.063
合计	166	78	47.0	0.118

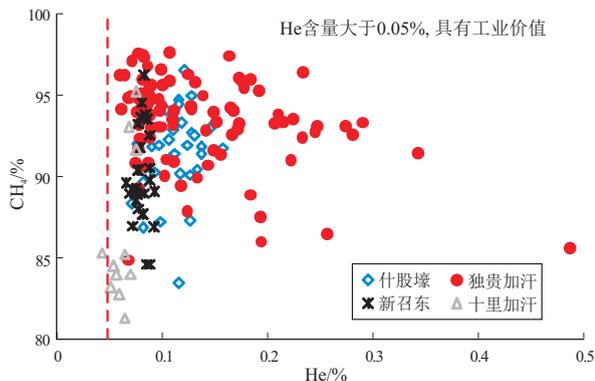


图 4 鄂尔多斯盆地东胜气田不同区带天然气中氦气含量分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of helium contents in different zones in Dongsheng gas field, Ordos Basin

（盒 3 段）氦气平均含量依次降低，平均值分别为 0.129%，0.123%，0.098%，除山西组和太原组混合产层外，其他混合产层的氦气平均含量均低于 0.1%（表 3，图 5）。上述特征说明，盒 1 段和盒 2 段氦气含量高，为主要的氦气勘探开发层系。

表 3 鄂尔多斯盆地东胜气田不同层位氦气含量统计

Table 3 Statistics of helium contents in different layers of Dongsheng gas field, Ordos Basin

层位	井数/口	He 含量大于 0.1%井数/口	He 含量大于 0.1%井占比/%	He 平均含量/%
盒 3 段	23	11	47.8	0.098
盒 2 段	29	22	75.9	0.123
盒 1 段	85	39	45.9	0.129
盒 1+盒 2+盒 3 段	13	4	30.8	0.085
山西组+下石盒子组	11	1	9.1	0.084
山西组	4	0	0	0.082
山西组+太原组	1	1	100.0	0.487
合计	166	78	47.0	0.118

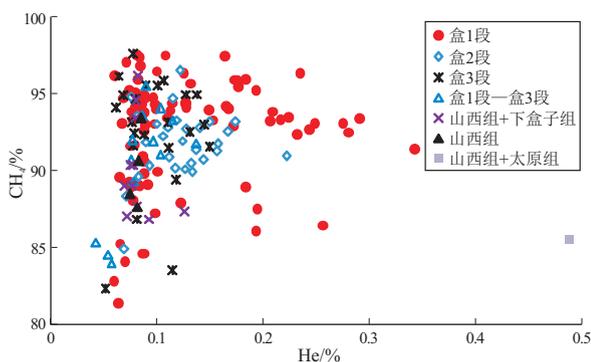


图 5 鄂尔多斯盆地东胜气田不同产层天然气中氦气含量分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of helium contents in different layers in Dongsheng gas field, Ordos Basin

3 氦气成因及分布规律

3.1 氦气成因及来源

自然界天然气中的氦气主要来自壳源、幔源、大气, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为这3种不同来源的氦提供了鉴别标志^[26]。幔源成因氦典型 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.1×10^{-5} , 主要是通过地幔的岩浆活动脱气产生;典型壳源氦 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(2\sim 3)\times 10^{-8}$, 主要有两种来源,一种主要是由盆地基底的伟晶岩、花岗岩等富含铀钍衰变产生,另一种是盆地内沉积岩(富有机质泥页岩等)中的铀钍衰变产生,但很难形成工业聚集;大气氦 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.4×10^{-6} , 大气中氦体积含量很低,仅为 5.24×10^{-6} , 所以,一般情况下工业气井中大气氦的影响可忽略不计。因此,工业气井中的氦来源主要为壳源氦和幔源氦。从图6可以看出,东胜气田天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布于 $(1.83\sim 6.25)\times 10^{-8}$, 属于典型的壳源成因氦。

为了明确东胜气田氦气来源,选择了本区富含放射性元素U、Th的潜在氦源岩,如太古宇的花岗片麻岩、石英砂岩、石英岩,中新元古界的变质石英岩、石英砂岩、深灰色泥岩、片麻岩,石炭—二叠系煤和碳质泥岩以及延长组长7段油页岩进行脱附气分析,分析脱附气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值,并与东胜气田上古生界天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值进行对比(图6)。东胜气田上古生界天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值变化不大, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化较大,其与基底太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系岩石脱附气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值具有相似的变化趋势,二者所分布的范围也比较一致,而与石炭—二叠系煤系烃源岩以及长7段的油页岩脱附气处于不同范围内,反映出东胜气田上古生界天然气中氦来源于太古宇—元古宇基底岩石,而与上古

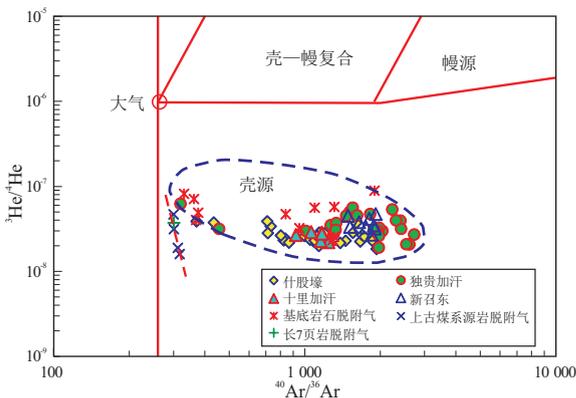


图6 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气成因及来源判别

Fig.6 Origin and source identification of helium gas in Dongsheng gas field, Ordos Basin

生界煤系烃源岩和延长组烃源岩等沉积岩无关。这也从侧面证实含油气盆地内的沉积岩中铀钍衰变产生的氦气很难形成工业聚集。沉积岩的岩石脱附气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值具有负相关特征,即随着 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值增加, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值降低,氦、氩同位素特征体现出了沉积岩衰变产生的特点^[27],与太古宇—元古宇基底岩石脱附气的氦、氩同位素特征具有明显的差异。

综合研究表明,东胜气田上古生界天然气中的氦气为典型的壳源成因,主要来源于基底的太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系衰变产生,与石炭—二叠系煤系烃源岩和长7段富含放射性元素U、Th的沉积岩无关。

3.2 氦气分布规律及成藏主控因素

富氦天然气中He成藏必须具有3个必要条件:一是有效氦源(花岗岩、变质岩、地幔玄武岩等);二是断裂形成高效运移通道;三是稳定的圈闭封盖条件,形成氦气富集的气藏载体^[28-30]。氦气由深部氦源岩运移至浅层成藏需要有效的大断裂、不整合等运移通道,元古宙以来杭锦旗地区经历了多期伸展—挤压构造旋回,发育了一系列形态各异的断裂,各期构造运动发育的断裂在性质、展布特征等方面有很大差异,区内断裂构造类型丰富、空间展布复杂多样,表现出明显的分期、分区、分带、分段及分层差异活动特征。

断裂分期差异活动具体主要表现为:①中新元古代—裂陷槽发育期,独贵加汗区带西侧发育大量北北西向正断层;②加里东期,三眼井、乌兰吉林庙、泊尔江海子和李家渠—掌岗图西斯断裂等初具雏形,并对沉积地层具有控制作用;③太原组—山西组沉积期,盆内发育弱伸展裂陷与末期弱挤压改造(小型高角度断层);④盒1段沉积初期—盒2段沉积前,继承性弱伸展、挤压逆冲与反转改造;⑤延安组沉积末期发生挤压隆升;⑥侏罗纪末期发生强烈挤压逆冲;⑦早白垩世发生区域性沉降与弱伸展;⑧始新世—新近纪,盆内发生右旋张扭,末期发生弱挤压,盆地逐渐消亡。

断裂分段差异性主要指三眼井断裂、乌兰吉林庙断裂、泊尔江海子断裂、李家渠—掌岗图西断裂等大型断裂活动具有分段性。其中泊尔江海子断裂早期分段活动特征最为明显,燕山期强烈挤压逆冲并形成现今几乎连为一体的巨型断裂构造带,而在晚期的构造反转期也具有分段差异活动特征,即中西段呈现出明显的张扭活动特征,而东段呈现出轻微的压扭活动特征^[31]。李家渠—掌岗图西断裂

也是由多条断裂首尾相连组成,晚期的构造反转期也具有分段差异活动特征,表现为北部的李家渠断裂张扭活动,而南部的掌岗图西断裂呈压扭活动,中间地区地层相对稳定,无断裂构造发育。上述断裂在研究区内活动强烈,也是本区拉张或挤压应力释放的主要场所,其断裂活动强度、时间、方式等与其他众多断裂有显著差异^[32]。

断裂分层差异性表现为:①深层中新元古界断裂主要发育于独贵裂陷槽,以正断层为主,部分正断层后期遭受挤压改造;②中深层古生界断裂主要分布于泊尔江海子断裂带及其北侧的什股壕地区、苏布尔嘎断裂带、李家渠断裂带、独贵加汗及十里加汗区带,该层段断裂既有海西晚期形成的众多高角度正断层,也有燕山期形成的大量逆断层及走滑(扭动)断层;③浅层中生界断裂主要分布于三眼井、乌兰吉林庙和泊尔江海子断裂带,此外在苏布尔嘎断裂带、李家渠断裂带、什股壕区带及十里加汗区带南部也有发育。

杭锦旗地区氦气含量高值区主要沿泊尔江海子等通基底断裂的两侧分布(图7),最高值区位于独贵加汗东部(锦78井 He 含量 0.487%, JPH-306 井 He 含量 0.343%)。杭锦旗地区太古宇—古元古界基底主要以片麻岩、花岗岩、石英岩为主,中元古界基底以泥岩、石英砂岩、砾岩为主,气源对比分析认为,东胜气田氦气来源于基底的太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系,经过氦气含量平面分布研究

发现,氦气含量分布与该区太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系分布区具有较好的一致性。因此,东胜气田氦气分布受基底岩相和深大断裂双重控制,主要在二级断裂的通氮源断裂与四级断裂的输导体系交汇处和太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系基底发育区富集(图7)。氦气含量高值区南北分别临近泊尔江海子和乌兰吉林庙二级大断裂,同时发育元古宇正断层;另外四级断裂具有很好的输导作用,有效沟通了基底氮源岩和储集层,控制了氦气在平面和纵向上的分布;氦气在向上运移过程中优先在烃类、其他非烃类气藏的圈闭中聚集,与上古生界常规气藏储、盖、圈组合具有良好的时空配置关系,进而形成了富氦天然气藏(图8)。

综合剖析杭锦旗地区构造—断裂演化、基底岩相发育特征、天然气成藏地质要素动态演化,明确指出氦气成藏需要苛刻的地质条件、时空和物质上的复杂配置关系,东胜气田氦气成藏主控因素为:基底富 U、Th 岩石发育是基础,断裂活动是核心,储盖圈保条件是必备,时空配置是关键。

4 东胜气田氦气资源量评价

作为一种伴生气体,单独针对氦气资源量计算方法的研究相对较少。目前,国内外学者对氦气资源量的计算方法主要有2种:一是根据气藏的圈闭范围、气体成分等参数进行资源量估算^[33-34];二是基于放射性衰变原理,从氦气生成方面进行资源量

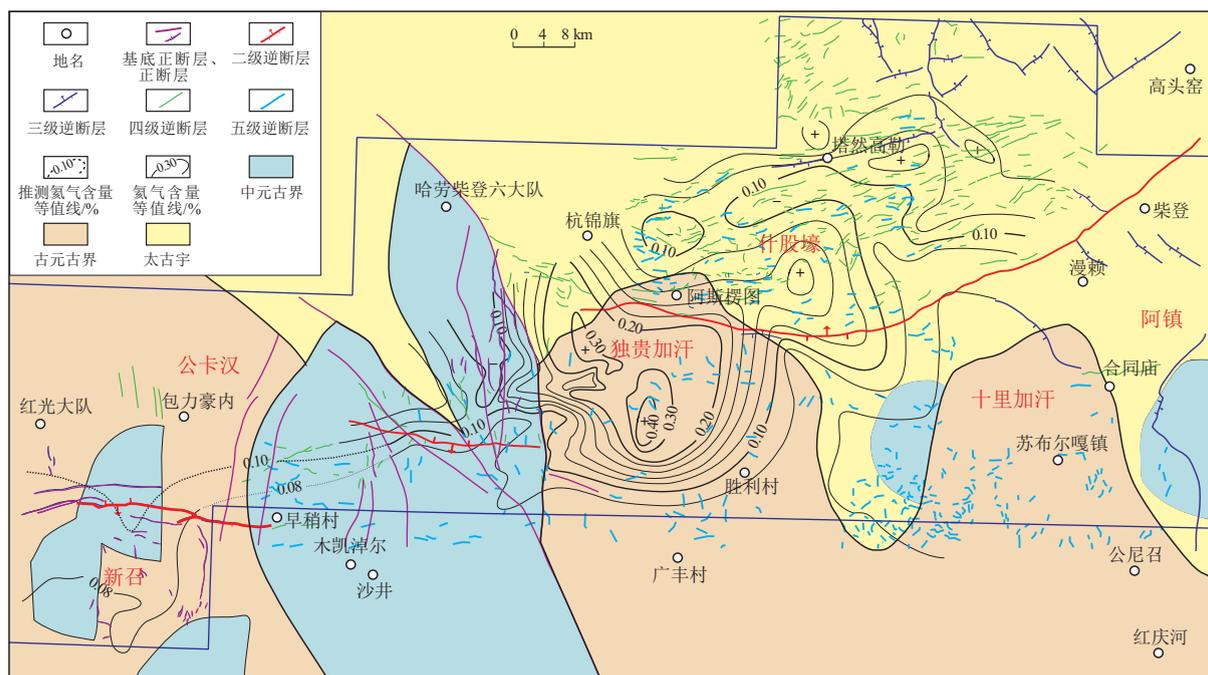


图7 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气含量平面分布和断裂分布对比

Fig.7 Distribution of fractures and helium contents in Dongsheng gas field, Ordos Basin

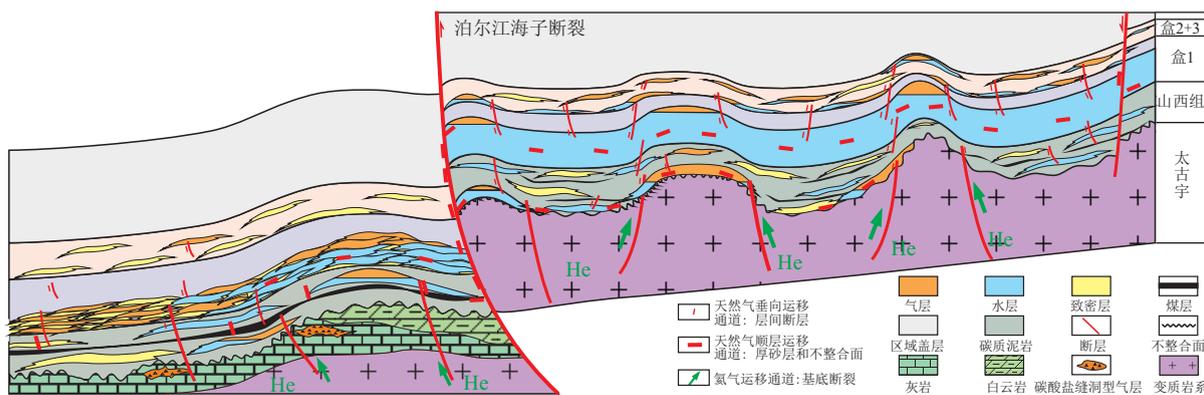


图 8 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气成藏模式

Fig.8 Helium accumulation model of Dongsheng gas field, Ordos Basin

估算^[35-36]。针对东胜气田的氦气成藏条件和天然气资源量,按照《氦气资源评价技术要求》,采用体积法计算氦气资源量,即 $Q_{He} = Q_{气} \cdot \alpha$ (Q_{He} 为氦气资源量; $Q_{气}$ 为含氦气藏天然气资源量; α 为含氦气藏中氦气的百分含量)。

根据东胜气田各区带天然气地质储量(截止2021年6月底)以及各区带天然气井氦气含量分析测试数据,按照上述氦气资源量计算方法,评价出东胜气田氦气探明储量为 $2.444 \times 10^8 \text{ m}^3$,控制储量为 $4.270 \times 10^8 \text{ m}^3$,预测储量为 $1.590 \times 10^8 \text{ m}^3$,合计地质储量为 $8.304 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表4)。

东胜气田氦气含量为 0.045%~0.487%,均值为 0.118%,基本上都具有工业开采价值。按照氦气田工业价值划分标准^[37],东胜气田属于含氦—富氦天然气田,其探明储量和三级储量远远大于和田河气田^[38],是目前我国第一大特大型含氦—富氦气田。东胜气田有望建成我国新的大型氦气资源基地。

5 氦气资源勘探开发的启示和建议

5.1 东胜气田应作为氦气资源开发利用的先导试验区

2020年,东胜气田天然气年产量约为 $15.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,测算氦气产量约为 $171 \times 10^4 \text{ m}^3$,但由于缺少氦气分离提取装置,无法进行氦气生产,按照2019年上半年中国进口氦气均价约为 63.6 元/ m^3 ^[39]来计算,造成的氦气相关经济损失约为 1.09 亿元。随着杭锦旗区块天然气的后续探明、投产,由氦气浪费导致的经济损失会更大,因此,建议选取东胜气田作为氦气资源开发利用的先导试验区,加快论证建设氦气战略储备基地的可行性。一方面,针对东胜气田氦气储量丰富,但相比国外已开采含氦天然气田其品位相对较低的特点,建议采用常温膜分离+变压吸附技术。该技术相对于传统深冷法提氦具有“常温、连续、低耗、高效、便捷”的技术特点和优

表 4 鄂尔多斯盆地东胜气田各区带氦气地质资源量

Table 4 Geological resources of helium in various zones of Dongsheng gas field, Ordos Basin 10^8 m^3

区带	层位	氦气平均含量/%	探明储量		控制储量		预测储量		氦气地质储量
			天然气	氦气	天然气	氦气	天然气	氦气	
什股壕	盒 2 段	0.116	54.33	0.063	418.22	0.485			1.276
	盒 3 段	0.121	108.54	0.131					
	盒 2+盒 3 段	0.110			542.32	0.597			
独贵加汗	盒 1 段	0.148	1 076.45	1.593					2.393
	太原组	0.138					241.33	0.333	
	盒 2+盒 3 段	0.103	452.64	0.467					
新召东	盒 1 段	0.082	123.90	0.102	630.29	0.517			1.108
	山 2 段	0.079	110.88	0.088	135.10	0.107	371.67	0.294	
	山 1 段	0.084			494.72	0.416			
十里加汗	山 2 段	0.079			1 271.81	1.005			3.231
	盒 1 段	0.069			1 656.60	1.143	798.16	0.551	
	盒 2+盒 3 段	0.052					222.8	0.116	
阿镇	盒 1 段	0.069					429.07	0.296	0.296
合计			1 926.74	2.444	5 149.06	4.270	2 063.03	1.590	8.304

势,氦气提取效率高、天然气压力不损失,且已在渭河盆地开展过水溶氦气提取现场试验并取得了成功。一旦该技术在东胜气田成功应用,可为国内含氦及贫氦气田提氦起到很好的示范作用,并可加速我国摘掉“贫氦国”的帽子。另一方面,也可利用周边已有的天然气液化厂,通过收购或合建提氦装置的方式生产氦气。

以2020年11月四川空分设备(集团)有限责任公司投资8000多万元建成的国内首套年产百万立方米级氦气的液化天然气闪蒸气提取高纯氦气工业示范装置为例,建设东胜气田氦气分离、液化装置的费用约为1.5亿元或者更少,按照2020年度东胜气田所产天然气中氦气经济价值约为1.09亿元计算,预计靠出售高纯氦气,一年多的时间就可收回建设成本,因此做好“气—氦”共采,经济效益和社会效益显著。

5.2 加强氦气成藏与资源潜力评价研究

为了更好地发现规模性的氦气储量,应聚焦国内四川、塔里木、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、苏北等含油气盆地,前期在上述中西部大型叠合盆地及东部邻庐断裂带已发现广泛的含氦天然气,部分具有工业价值,建议进一步落实鄂尔多斯盆地、塔里木盆地等重点盆地氦气资源潜力。如果达到一定规模可以尽快建成产能,防止氦气资源的损失。在重点含氦地区,通过典型含氦气田解剖,强化氦气赋存机理、富集与成藏规律研究,明确氦气富集主控因素,在此基础上,加强氦气品位评价、氦气资源潜力及勘探有利区评价。同时,进一步在全国各含油气盆地开展常规及非常规天然气中氦气含量普查,结合天然气资源和储量、产量数据,摸清氦气资源家底,为后期氦气开发产业布局提供资源保障,也为规模化提氦提供靶区方向。

5.3 加强氦气等伴生资源的综合利用研究

长期的勘探表明,我国部分油气藏、非烃气藏中天然气组分中氦气含量较高,氦气资源潜力较大,因此在开展油气勘探开发的同时,应重视和兼顾氦气的勘探和开发,建立严格的含氦气样采集流程和规范,加强对天然气中氦气组分的检测分析,对具有商业利用价值的氦气油气藏,应充分分离天然气中的氦气资源。由于我国大多数气田中氦气含量较低,急需开发低丰度氦气资源综合利用技术,降低氦气工业利用下限的浓度范围,最大限度地提高氦气资源开发和综合利用效率,这对于提高天然气勘探开发整体效益,保障我国氦气资源战略安全均具有重要意义。

6 结论与认识

(1)东胜气田氦气含量达0.045%~0.487%,基本上都具有工业价值。独贵加汗和什股壕区带氦气含量较高,平均值均大于0.1%,且这2个区带氦气含量大于0.1%的井数比例均在55%以上,具有较大的氦气勘探开发潜力;新召和十里加汗区带天然气中氦气含量相对较低,但其平均值都大于0.05%,也具有一定的工业价值。

(2)东胜气田氦气属于典型的壳源成因,主要来源于太古宇—元古宇基底变质岩—花岗岩系,氦气分布受基底岩相和深大断裂双重控制,高值区主要沿泊尔江海子等通基底断裂两侧分布,在二级断裂的通氦源断裂与四级断裂的输导体系交汇处和太古宇—元古宇变质岩—花岗岩系基底发育区富集。

(3)东胜气田天然气在较长的开发时期内氦气含量保持稳定,利用体积法计算出东胜气田氦气探明储量约为 $2.444 \times 10^8 \text{ m}^3$,三级储量约为 $8.304 \times 10^8 \text{ m}^3$,为我国第一大特大型含氦—富氦气田,因此应选取东胜气田作为氦气资源开发利用的先导试验区,加快建设提氦装置,联产液化天然气和氦气。

(4)基于杭锦旗东胜气田氦气勘探实践,在重点含氦地区应加强天然气中氦气成藏与资源潜力评价研究,重视氦气等伴生资源的综合开发利用技术攻关。

参考文献:

- [1] United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2017[M]. Washington DC: USGS, 2017: 78-80.
- [2] 刘佳宜, 黄晓伟. 深部油气资源将成勘探新领域[N]. 中国科学报, 2020-09-09(3).
LIU Jiayi, HUANG Xiaowei. Deep oil and gas resources will become a new field of exploration[N]. Chinese Science Daily, 2020-09-09(3).
- [3] 王熙庭, 任庆生. 氦资源、应用、市场和提取技术[J]. 天然气化工, 2012, 37(1): 73-78.
WANG Xiting, REN Qingsheng. Resources, application, market and extraction technologies of helium[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2012, 37(1): 73-78.
- [4] 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): 1506-1508.
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Helium isotope distribution of natural gas in petroliferous basins of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(16): 1505-1508.
- [5] 陶明信, 沈平, 徐永昌, 等. 苏北盆地幔源氦气藏的特征与形成条件[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(3): 1-8.
TAO Mingxin, SHEN Ping, XU Yongchang, et al. Characteristics

- and formation conditions of mantle-derived helium reservoirs in Northern Jiangsu Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1997, 8(3): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨振宁,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.
- [12] 柳永刚,张翔,刘子锐,等.甘肃省首个高品位氦气盆地的发现及勘探前景[J]. *甘肃地质*, 2020, 29(3/4): 29-36.
LIU Yonggang, ZHANG Xiang, LIU Zirui, et al. The first discovery and exploration prospect of high grade helium basin in Gansu Province [J]. *Gansu Geology*, 2020, 29(3/4): 29-36.
- [13] 张健,杨威,易海永,等.四川盆地前震旦系勘探高含氦天然气藏的可行性[J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 45-52.
ZHANG Jian, YANG Wei, YI Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 45-52.
- [14] 杨方之,王金渝,潘庆斌.苏北黄桥地区上第三系富氦天然气成因探讨[J]. *石油与天然气地质*, 1991, 12(3): 340-345.
YANG Fangzhi, WANG Jinyu, PAN Qingbin. Discussion on origin of Upper Neogene helium-rich gases in Huangqiao, north Jiangsu [J]. *Oil & Gas Geology*, 1991, 12(3): 340-345.
- [15] 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.
- [16] WEI Guoqi, WANG Dongliang, WANG Xiaobo, et al. Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti-Moxi gas field in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 585-590.
- [17] 李功强,贾会冲,潘和平,等.内蒙古杭锦旗探区石炭—二叠系天然气成藏模式[J]. *现代地质*, 2017, 31(3): 587-594.
LI Gongqiang, JIA Huichong, PAN Heping, et al. The Permian-Carboniferous gas reservoir forming model of Hangjinqi exploration area in northern Ordos Basin, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 2017, 31(3): 587-594.
- [18] 倪春华,朱建辉,刘光祥,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 826-834.
NI Chunhua, ZHU Jianhui, LIU Guangxiang, et al. Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 826-834.
- [19] 曹桐生,罗龙,谭先锋,等.致密砂岩储层成因及其孔隙演化过程:以杭锦旗十里加汗地区下石盒子组为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 598-603.
CAO Tongsheng, LOU Long, TAN Xianfeng, et al. Genesis and pore evolution of tight sandstone reservoir: taking Lower Shihezi Formation in the Shilijahan block of Hangjinqi area as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(5): 598-603.
- [20] 罗开平,杨帆,陆永德,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 557-568.
LUO Kaiping, YANG Fan, LU Yongde, et al. Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 557-568.
- [21] 张威,丁晓琪,李春堂,等.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗马家沟组四段碳酸盐岩储层分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 615-626.
ZHANG Wei, DING Xiaoqi, LI Chuntang, et al. Distribution of paleo-karst reservoirs in Ma 4 Member, Hangjinqi area, northern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 615-626.
- [22] 张倚安,田景春,张翔,等.构造—沉积格局控制下的砂体展布规律:以杭锦旗地区二叠系为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2): 187-193.
ZHANG Yian, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. The sand body distribution law controlled by tectonic-sedimentary pattern: a case study of Permian in Hangjinqi area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(2): 187-193.
- [23] 谭东萍,罗龙,谭先锋,等.东胜气田二叠系下石盒子组致密砂岩成岩作用及成储效应[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(1):

- 68-76.
TAN Dongping, LUO Long, TAN Xianfeng, et al. Diagenesis and reservoir formation effect of tight sandstone in lower permian Shihezi Formation, Dongsheng gasfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28 (1): 68-76.
- [24] 张威, 李良, 贾会冲. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区十里加汗区带下石盒子组 1 段岩性圈闭成藏动力及气水分布特征 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 189-196.
ZHANG Wei, LI Liang, JIA Huichong. Reservoir-forming dynamics and gas-water distribution characteristics of lithologic traps in the 1st Member of Xiashihezi Formation in the Shilijiahan zone, Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 189-196.
- [25] 陶成, 杨华敏, 刘文汇. 同位素质谱法测定天然气中 He 含量及其同位素组成 [J]. 质谱学报, 2014, 35(2): 138-143.
TAO Cheng, YANG Huamin, LIU Wenhui. Analysis of helium abundance and isotope composition in natural gas by isotopic mass spectrometry [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2014, 35(2): 138-143.
- [26] 王杰, 陈践发, 王铁冠, 等. 双城-太平川地区稀有气体同位素特征 [J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 24-26.
WANG Jie, CHEN Jianfa, WANG Tieguan, et al. Isotopic characteristics of rare gas in Shuangcheng-Taipingchuan area in the Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 24-26.
- [27] 王杰, 刘文汇, 陶成, 等. 海相油气成藏定年技术及其对元坝气田长兴组天然气成藏年代的反演 [J]. 地球科学, 2018, 43(6): 1817-1829.
WANG Jie, LIU Wenhui, TAO Cheng, et al. Key dating methods of reservoir accumulation in marine strata and their applications to natural gas of the Changxing Formation in Yuanba Gas Field [J]. Earth Science, 2018, 43(6): 1817-1829.
- [28] 杨振宁, 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.
- [29] 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.
- [30] 张健, 杨威, 易海水, 等. 四川盆地前震旦系勘探高含氦天然气藏的可行性 [J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 45-52.
ZHANG Jian, YANG Wei, YI Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 45-52.
- [31] 徐立涛, 石万忠, 吴睿, 等. 泊尔江海子断层分段演化特征及其对太原-山西组的控制作用 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(4): 884-891.
XU Litao, SHI Wanzhong, WU Rui, et al. Segmented evolution of Borjiangaizi faults and their control on Taiyuan-Shanxi formations [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 884-891.
- [32] 秦雪霏. 杭锦旗地区东胜气田构造及断裂特征研究 [J]. 河南科技, 2014(7): 187-188.
QIN Xuefei. Study on structure and fracture characteristics of Dongsheng gas field in Hangjinqi area [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(7): 187-188.
- [33] PACHECO N, ALI S F. Helium resources of the United States-2007 [R]. Denver, Colorado: U. S. Department of the Interior Bureau of Land Management, 2008.
- [34] DANABALAN D, GLUYAS J G, MACPHERSON, et al. New high-grade helium discoveries in Tanzania [C]//Goldschmidt Conference. Yokohama, Japan: [s.n.], 2016.
- [35] 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.
- [36] BROWN A A. Formation of high helium gases; a guide for explorationists [C]//AAPG Convention. Louisiana, New Orleans, USA: [s.n.], 2010.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 朱琳慧. 2019 年氦气行业市场发展现状分析 [OL]. 2020-02-24. <https://xw.qianzhan.com/analyst/detail/220/200223-572380bc.html>.
ZHU Linhui. Analysis of the development status of the helium industry market in 2019 [OL]. 2020-02-24. <https://xw.qianzhan.com/analyst/detail/220/200223-572380bc.html>.

(编辑 徐文明)