中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田 ——鄂尔多斯盆地东胜气田特征

彭威龙^{1,2}, 刘全有^{1,2*}, 张英², 贾会冲³, 朱东亚², 孟庆强², 吴小奇², 邓尚^{2,4}, 马永生^{4,5}

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006;

4. 马永生科学家工作室, 北京 100083;

5. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728

* 通讯作者, E-mail: qyouliu@sohu.com; liuqy.syky@sinopec.com

收稿日期: 2021-08-30; 收修改稿日期: 2022-01-17; 接受日期: 2022-02-07; 网络版发表日期: 2022-03-25

国家自然科学基金项目(批准号: U20B6001、42141021、41625009、U19B6003、41902160、42172149和41872112)、中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA14010404)和中国博士后科学基金项目(编号: 2019M650967、2020T130721)资助

摘要 氦气是一种重要的战略稀缺资源, 通常与天然气伴生. 中国目前仅发现塔里木盆地和田河气田一例特大型富氦气田. 本文报道了鄂尔多斯盆地东胜气田新的实例, 该气田为首例致密砂岩型特大富氦气田. 鄂尔多斯盆地东胜气田92个天然气样品中氦气相对含量数据统计分析表明, 该气田天然气中氦气平均含量为0.133%, 其中有65个样品氦气含量不小于0.1%, 占比70.7%. 按照东胜气田探明天然气储量折算, 探明氦气地质储量约 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为我国首个特大致密砂岩型富氦天然气藏. 结合东胜气田5个天然气样品中氦气同位素组成分布区间为 $3.03 \times 10^{-8} \sim 3.44 \times 10^{-8}$, 认为该气田氦气为典型壳源成因, 氦气源为基底富含铀、钍的花岗质基岩. 富氦天然气成藏受到区域构造活动控制, 沟通基底的断裂开启使得源岩中氦气释放, 沿断裂进入上覆地层与常规烃类气体混合聚集成藏. 结合鄂尔多斯盆地构造背景以及氦源岩分布特征, 该盆地北部与中部深层可能是氦气富集主要区域, 具勘探潜力.

关键词 氦气含量, 基底花岗岩, 放射性成因, 东胜气田, 鄂尔多斯盆地

1 引言

氦是目前已发现的沸点最低的元素, 也是最难液化的气体, 其具有密度低、易扩散、化学惰性、导热性强、黏度低等独特的性质, 因此, 在军工、航空、医疗、半导体及核工业等高科技领域有着不可替代的

应用(Cai等, 2010; Anderson, 2018). 尽管在整个宇宙中氦气含量仅次于氢气, 但在地球上氦气却很稀缺, 当前工业用氦气仅能从天然气中提取. 一般认为天然气中氦气相对含量达到0.05~0.1%以上就具有制氦价值, 工业品位一般要求氦气相对含量不少于0.1%(徐永昌等, 1996). 据USGS相关资料估算, 全球氦气总资源量约

中文引用格式: 彭威龙, 刘全有, 张英, 贾会冲, 朱东亚, 孟庆强, 吴小奇, 邓尚, 马永生. 2022. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田——鄂尔多斯盆地东胜气田特征. 中国科学: 地球科学, 52(6): 1078–1085, doi: 10.1360/SSTe-2021-0277

英文引用格式: Peng W, Liu Q, Zhang Y, Jia H, Zhu D, Meng Q, Wu X, Deng S, Ma Y. 2022. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China. Science China Earth Sciences, 65(5): 874–881, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9898-y>

$51.9 \times 10^9 \text{ m}^3$, 主要分布在美国、卡塔尔、俄罗斯、阿尔及利亚等国家, 其中美国氦气资源量最高, 达 $20.6 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占比 39.69%, 国外学者估算的中国氦气资源量仅为 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Peterson, 2021). 随经济社会发展, 中国对氦气的需求量以每年超过 10% 的速率增加 (赵芸鑫等, 2012; Anderson, 2018), 致使我国氦气供应面临严峻形势, 属于典型“卡脖子”领域. 目前业界认为氦气主要来自深部幔源流体以及富含放射性元素的花岗质岩石中铀钍衰变 (徐永昌等, 1990; Ballentine 和 Sherwood Lollar, 2002; Dai 等, 2017; Li 等, 2017). 美国的 Panhandle-Hugoton 气田是全球知名的富氦大气田, 该气田位于阿纳达科盆地西部, 储层为二叠系碳酸盐岩和砂岩, 该气田下伏规模巨大的花岗岩体推测为氦气源岩 (Ballentine 和 Sherwood Lollar, 2002). 近年来我国也涌现出一批氦气相关研究成果 (Zhang 等, 2015; Li 等, 2017, 2020; Zhang 等, 2019; Wang 等, 2020a, 2020b). 尤其是陶小晚等 (2019) 报道了我国首个特大型富氦天然气储量——和田河气田, 该气田折算氦气探明地质储量 $1.9591 \times 10^8 \text{ m}^3$. 和田河气田位于塔里木盆地台盆区, 其中氦气为典型壳源成因, 可能主要来自下伏岩体. 近年来, 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界天然气勘探不断取得突破, 探明了东胜大气田 (Wu 等, 2017; 倪春华等, 2018). 该气田多口钻井在致密砂岩气中发现了含量相对较高 ($\geq 0.1\%$) 的氦气, 揭示了可能存在致密砂岩型富氦天然气. 本次工作通过对东胜气田致密砂岩气中氦含量和同位素组成的分析, 明确氦的地球化学特征, 探讨氦气的来源和成藏富集特征. 相关工作不仅可望为揭示东胜气田氦的富集规律提供科学依据, 而且可望为我国后续氦气资源勘探与普查提供借鉴.

2 地质概况

鄂尔多斯盆地当前已经发现了以苏里格、乌审旗、大牛地、米脂、子洲、神木、东胜等为代表的一批上古生界致密砂岩气田, 和以下古生界海相碳酸盐岩为储层的靖边气田 (Liu 等, 2009; Dai, 2016). 该盆地构造较为稳定, 盆地主体区 (伊陕斜坡) 断裂体系相对不发育, 但是靠近盆地边缘的次级构造单元上断裂体系发育, 例如伊盟隆起、天环坳陷等构造单元 (李良等, 2000; 王明健等, 2011; 何发岐等, 2020). 鄂尔多斯

盆地为克拉通型基底之上发育的大型含油气盆地, 该盆地天然气资源潜力巨大.

东胜气田位于鄂尔多斯盆地北部, 跨伊陕斜坡、天环坳陷以及伊盟隆起三大构造单元, 主体位于伊盟隆起构造上 (图 1a). 沿三眼井、乌兰吉林庙和泊尔江海子断裂两侧多口钻井先后获得工业气流, 探明了东胜气田 (图 1b). 2021 年 4 月 27 日华北油气分公司部署在鄂尔多斯盆地北缘东胜气田的重点开发井——JPH-489 井, 试获日产无阻流量 $105 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流, 创该地区最高纪录, 突显鄂尔多斯盆地北部隆起天然气勘探潜力较大. 当前东胜气田探明天然气储量 $1474 \times 10^8 \text{ m}^3$, 截至 2019 年底保有天然气三级储量 $9777 \times 10^8 \text{ m}^3$ (何发岐等, 2020). 研究表明, 东胜气田主要发育上古生界石炭-二叠系致密砂岩气 (图 1c), 储层具有低孔低渗特征 (王明健等, 2011; 何发岐等, 2020). 该气田天然气主要来源于石炭-二叠系煤系烃源岩 (包含煤、暗色泥岩), 具有近源成藏特征 (彭威龙等, 2017; 何发岐等, 2020). 东胜气田的侧封和顶封条件为紧邻发育的泥岩, 二叠系上石盒子组以及石千峰组泥岩及含砂泥岩是该盆地上古生界致密砂岩气的区域盖层 (王明健等, 2011; Wu 等, 2017; 何发岐等, 2020).

3 样品与实验方法

本次工作中利用带双阀门的不锈钢气瓶采集了东胜气田 X 井区以及 Y 井区共计 92 个天然气样品开展地球化学分析, 相关测试均在中国科学院油气资源重点实验室进行. 氦气含量和同位素组成分析采用 Noblesse SFT 稀有气体同位素质谱仪进行, 烷烃气碳同位素组成分析采用 Finnigan MAT-252 稳定同位素质谱, 具体测试流程分别详见 Cao 等 (2018) 和 Liu 等 (2014). 此外, 本次工作中还收集了鄂尔多斯盆地苏里格、大牛地、榆林、米脂、乌审旗、子洲以及靖边气田 58 个天然气中氦气含量等资料 (Dai, 2016; Dai 等, 2017) 用于对比分析.

4 东胜气田氦气地球化学特征

4.1 氦气含量

统计分析表明, 东胜气田 X 井区有 24 个样品中氦气相对含量超过 0.1% (图 2), 占比 64.9% (X 井区共统计

图1 鄂尔多斯盆地东胜气田位置(a)、井位分布(b)和地层综合柱状图(c)

图2 鄂尔多斯盆地东胜气田以及其他典型大气田中氦气含量分布

37个样品); Y井区39个样品中氦气含量分布在0.1~0.3%之间(图2), 占比70.9%(Y井区共统计55个样品), 并且有两个样品中氦气含量超过0.3%。东胜气田

两个井区中共计65个样品氦气含量大于0.1%, 占比70.7%, 两个井区氦气平均含量为0.133%, 氦气含量达到工业品位价值。Dai等(2017)提出了天然气中富氦程度的标准, 其中氦气含量介于0.15~0.50%的为富氦天然气, 氦气含量达到0.5%则为特富氦天然气。东胜气田X井区和Y井区分别有6个和22个样品氦气含量大于0.15%, 达到了富氦天然气的标准。

对鄂尔多斯盆地其他古生界气田中氦气含量分析表明, 氦气相对含量整体偏低, 氦气含量小于0.05%占据绝对优势, 58个样品中仅12个氦气含量分布在0.05~0.1%之间(图2)。鄂尔多斯盆地大气田中氦气含量分析表明, 盆地北部的东胜气田氦气相对含量较高, 氦气相对含量达到工业提氦丰度值, 相对靠近东胜气田的苏里格和乌审旗气田中氦气相对含量也较高, 表明该盆地北部氦气勘探潜力较大, 应予以重点关注。

4.2 氦同位素组成及成因

He具有两种稳定的同位素 ^3He 和 ^4He 。 ^3He 是地球形成时捕获的原始氦, 地球上的 ^4He 是铀、钍等放射性元素发生 α 衰变形成(Oxburgh等, 1986; Ballentine和Burnard, 2002)。天然气中的氦气一般认为有3种来源: 幔源、壳源以及大气来源。由于空气中的氦气含量极低, 仅为5.24ppm(1ppm=1 $\mu\text{g g}^{-1}$), 所以一般认为气藏中的氦为壳源或者幔源成因(张子枢, 1992; 徐永昌等, 1996; 李玉宏等, 2011; 陶小晚等, 2019)。壳源氦气是指矿物中的铀、钍元素发生 α 衰变形成的氦气(^4He)(Oxburgh等, 1986; Ballentine和Burnard, 2002); 幔源氦气指通过深大断裂或者强烈的构造活动从地幔运移至气藏的中氦, 与壳源氦气相比其相对富集 ^3He (Oxburgh等, 1986; 徐永昌等, 1990; Liu等, 2016)。幔源氦气一般多发现于构造活动区, 例如在我国东部沿郯庐断裂带分布的裂谷盆地发现的气藏中氦气有相对较多的幔源贡献(徐永昌等, 1996; 陶小晚等, 2019)。壳源及幔源氦同位素组成有显著的差异, 可以根据 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值差异判别氦气的来源。壳源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般为 10^{-8} 量级, 常用的端元值为 2×10^{-8} , 幔源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 端元值为

1.1×10^{-5} (Lupton, 1983; Liu和Xu, 1993; 徐永昌等, 1996; Ballentine和Burnard, 2002; Kennedy和van Soest, 2007)。

鄂尔多斯盆地苏里格、乌审旗、子洲、大牛地、米脂、榆林、靖边气田等典型大气田中58个天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值分布区间为 $2.07\times 10^{-8}\sim 13.64\times 10^{-8}$, 为典型壳源成因氦气, 壳幔氦气端元值计算结果表明壳源氦贡献超过99%。东胜气田X井区5个天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布区间为 $3.03\times 10^{-8}\sim 3.44\times 10^{-8}$, 表明氦气为壳源成因, 计算得知壳源氦贡献也超过99%, 即东胜气田天然气中的氦气主要为铀、钍元素放射性衰变成因。作者认为鄂尔多斯盆地幔源氦相对不发育与该盆地整体上构造稳定且深大断裂相对不发育有关。

5 东胜气田氦气来源、富集模式及勘探潜力

5.1 氦气来源

天然气中乙烷碳同位素组成主要受到母质的继承效应影响, 因此乙烷碳同位素组成经常被运用于天然气成因类型的判别, 即 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值大于 -28‰ 为煤成气, 反

图3 鄂尔多斯盆地 $\delta^{13}\text{C}_2$ vs. He含量(a)、 $\delta^{13}\text{C}_2$ vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ (b)、He含量 vs. $\delta^2\text{H}-\text{C}_1$ (c)及He含量 vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ (d)关系图

之为油型气(Dai等, 2005, 2009; Dai, 2016; Liu等, 2019). 东胜气田天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值大于 -28‰ , 为典型煤成气, 但是东胜气田中氦气含量相对较高, 而其他煤成气气田中氦气相对含量较低, 并且靖边气田下古生界油型气中氦气含量与上古生界煤成气中氦气含量有重合(图3a). 随着氦气含量增加, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值没有表现出任何规律性变化, 即烷烃气成因与氦气含量之间没有内在联系. 煤成气与油型气的氦气同位素组成具有明显的重合区间, 烷烃气成因同样也表现出与氦同位素组成没有明显关系(图3b).

烷烃气氢同位素组成主要受到源岩沉积环境及热演化程度影响, 一般认为天然气中甲烷氢同位素值($\delta^2\text{H}-\text{C}_1$)大于 -180‰ 时, 其源岩形成于咸水环境(Liu等, 2008), 而甲烷氢同位素值小于 -190‰ 时, 其源岩形成于淡水环境(Schoell, 1980); 甲烷氢同位素值介于 -190‰ 与 -180‰ 之间时, 其源岩形成于过渡相的沉积环境(Liu等, 2008). 东胜气田以及鄂尔多斯盆地其他气田天然气中氦气含量与甲烷氢同位素组成不具有明显的相关性(图3c), 这一方面表明氦气含量不受烃源岩水体盐度的影响, 另一方面也反映了氦气和烷烃气在成因上不具有明显相关性. 在鄂尔多斯盆地天然气中, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与氦气含量也没有明显关系(图3d). 尽管天然气中氦气为典型壳源成因, 但是氦气含量变化较大. 鄂尔多斯盆地天然气中氦气与源岩母质类型、沉积环境均没有明显关系. 由于壳源氦主要来自岩石矿物中铀、钍的衰变(Anderson, 2018), 因此推测东胜气田中高含量的氦气可能与基底岩石中铀、钍元素含量相对较高、经历的放射性衰变时间较长等因素有关. 塔里木盆地和田河气田天然气中的氦也为典型壳源氦(陶小晚等, 2019), 因此, 不同气田天然气中氦含量的不同除了受控于氦源岩中放射性元素铀、钍含量和衰变时间等差异外, 也与氦的聚集过程有一定的关系.

5.2 氦气富集模式

鄂尔多斯盆地北部的伊盟隆起构造单元上发育一定规模的铀矿床(图1a), 李子颖等(2009)、李有民和陈宏斌(2016)、冯晓曦等(2017)认为东胜铀矿主要来自盆地北部的基岩蚀源区, 并且为同沉积型铀矿. 由于该沉积铀矿主要赋存于侏罗系砂岩中(任战利等, 2006), 处于东胜气田的上覆地层. 铀、钍放射性衰变形成的氦气不易倒灌于下二叠统气藏中, 因此, 鄂尔多斯盆

地古生界气藏中氦气并非来源于侏罗系砂岩铀矿放射性衰变. 但沉积型铀矿发育说明盆地北缘剥蚀区岩石相对富含铀元素, 在东胜气田多口深井(J23、J32等)(图1b)钻遇了基底, 揭示了该区基岩为花岗岩或者是以花岗岩为母岩的变质岩. 该类岩石相对富含铀、钍元素(李玉宏等, 2011; Li等, 2017). 冯晓曦等(2017)利用伽马能谱测量解剖了鄂尔多斯盆地北部大桦背岩体铀矿异常发现, 该岩体铀平均含量超过 5×10^{-6} , 同时发现该岩体南缘黏土堆积物中铀含量高达 170×10^{-6} , 约是地壳中铀丰度的61倍. 结合前人对东胜铀矿(任战利等, 2006; 李子颖等, 2009; 杨伟利等, 2010; 李有民和陈宏斌, 2016; 冯晓曦等, 2017)、鄂尔多斯盆地北部基底富铀钍花岗岩以及东胜气田致密砂岩气成藏特点的研究(王明健等, 2011; 彭威龙等, 2017; 何发岐等, 2020), 作者认为东胜气田天然气中氦气主要为基底岩石中富含的铀、钍元素放射性衰变形成.

东胜气田所在区块主要发育三条近东西向从基底断至地表的一级主干断裂(三眼井断裂、乌兰吉林庙断裂以及泊尔江海子断裂)(图1b). 这些一级断裂形成于加里东期, 在燕山期以及喜山期发生强烈活动, 大量的小规模断裂仅从基底断至上古生界(何发岐等, 2020). 三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂为南倾正断层, 而泊尔江海子断裂为北倾逆断层(图1b). 断裂两侧上古生界烃源岩和天然气地球化学分析对比表明, 泊尔江海子断裂以北烃源岩发育程度相对较低, 烃类气主要是断裂以南的烃源岩所生成、并沿断裂运移到北侧聚集成藏(Wu等, 2017), 同时运移过程中经历了明显的散失(倪春华等, 2018). 这三条基底断裂沟通了氦源岩(花岗质基岩), 加上氦的分子直径小于甲烷, 使得氦气相对烃类气体更容易运移, 因而在地质历史时期, 这些断裂可以为氦气释放提供通道, 也难免会发生一定程度的散失. 烃类气体散失会使得甲烷、乙烷相对含量和同位素差值等出现明显的变化, 即发生组分分异和同位素分馏过程, 因此可以根据相关地球化学指标来判识散失过程(倪春华等, 2018); 但对氦气而言, 由于仅有 ^3He 和 ^4He 两个稳定的同位素, 且以 ^4He 含量占绝对优势, 因而没有有效的氦气含量和同位素等相关指标来直接判识散失过程.

前人研究表明鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气的主要成藏时期在晚侏罗世-早白垩世(何发岐等, 2020), 这期间受到燕山运动影响, 伴随着烃类气体运

图4 鄂尔多斯盆地东胜富氦致密砂岩气成藏模式简图

剖面A-B位置详见图1

聚成藏, 基底的氦气源(主要为富含铀、钍元素的太古界花岗岩质基岩)不断释放的氦气通过基底断裂向上运移并与烃类气体混合, 最终聚集于致密砂体中, 形成富氦气藏. 由于氦气具有弱源成藏特点, 而不能独立成藏(李玉宏等, 2011; Li等, 2017; 张文等, 2018), 氦气的运移聚集可能与烃类气体具有一定的协同性. 东胜气田烃类气体主成藏期为燕山期, 因此, 推测东胜气田中氦气也是燕山期富集. 上石盒子组厚层泥岩作为区域性盖层对东胜富氦气藏起到良好的保存作用, 在一定程度上减少了气藏中氦的散失(图4).

5.3 勘探潜力

Dai等(2017)提出了氦气田工业划分标准, 其中氦气储量达到 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的为特大型气田, 氦气储量介于 $0.5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的为大型气田. 按照东胜气田92个样品中氦气平均含量为0.133%, 并结合当前天然气探明地质储量估算, 探明氦气储量约为 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$, 达到了特大型气田的标准. 鉴于本次研究中东胜气田有26个天然气达到了富氦天然气的标准(氦气含量大于0.15%), 因此东胜气田为我国首个特大致密砂岩型富氦天然气藏. 东胜气田氦气储量规模大, 氦气平均含量达到工业制氦要求, 具备较高提氦价值. 鄂尔多斯盆地北部的特大致密砂岩富氦储量的发现, 表明该盆地北部具备富氦天然气大规模聚集成藏的条件. 广泛发育氦源岩、相对较发育的沟通源岩和储层的断裂体系, 有利于氦气释放和运移. 同时, 鄂尔多斯盆地北

部良好的天然气成藏组合也为氦气富集创造了条件. 东胜气田中氦气平均含量明显高于南部的苏里格、乌审旗、大牛地等气田, 可能是因为北部靠近物源区, 基底埋藏较浅, 并且构造也相对较为活动, 多方面因素都有利于基底放射性元素衰变形成的氦气运移到圈闭中富集. 因此, 应加大对鄂尔多斯盆地北部天然气中氦气的勘探普查工作. 同时, 重视全盆地天然气中氦气含量的实时动态检测, 开辟该盆地氦气勘探的新领域.

6 结论

(1) 东胜气田92个气样中氦气平均含量为0.133%, 其中有65口井氦气含量大于0.1%, 占比70.7%, 达到工业氦气提取标准. 该气田氦气探明地质储量约 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为我国首个特大致密砂岩型富氦天然气藏, 建议加快开展天然气提氦工作.

(2) 氦气同位素组成分析表明, 东胜气田氦气为典型壳源成因, 主要为基底岩石矿物中富含的铀、钍元素放射性衰变形成, 氦气沿基底断裂向上运移进入上覆致密砂岩地层中, 并与烃类气体混合聚集成藏.

致谢 中国石油勘探开发研究院戴金星院士给予了悉心指导, 陶小晚和刘丹高级工程师提供了相关资料并进行热情讨论, 中国石化华北油田分公司在样品采集和资料收集方面给予了大力协助, 在此一并深表谢意.

参考文献

冯晓曦, 金若时, 司马献章, 李建国, 赵华雷, 陈印, 陈路路, 汤超, 奥琼, 王心华. 2017. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义. *中国地质*, 44: 993–1005

何发岐, 王付斌, 张威, 安川, 齐荣, 马超, 陈英毅, 李春堂, 范玲玲, 归平军. 2020. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破. *中国石油勘探*, 25: 39–49

李良, 袁志祥, 惠宽洋, 刘树平. 2000. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律. *石油与天然气地质*, 21: 268–271

李有民, 陈宏斌. 2016. 东胜铀矿床直罗组天然气显示与铀矿化关系初探. *西部资源*, 5: 1–4

李玉宏, 卢进才, 李金超, 陈高潮, 魏仙祥. 2011. 渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(S1): 47–53

李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式. *铀矿地质*, 25: 65–70

倪春华, 刘光祥, 朱建辉, 吴小奇, 包建平. 2018. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气成因及来源. *石油实验地质*, 40: 193–199

彭威龙, 胡国艺, 黄土鹏, 房忱琛, 刘丹, 冯子齐, 韩文学, 蒋锐, 陈慧娟. 2017. 天然气地球化学特征及成因分析——以鄂尔多斯盆地东胜气田为例. *中国矿业大学学报*, 46: 74–84

任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 刘新社. 2006. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系. *石油与天然气地质*, 27: 187–193

陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 李立武, 朱文平, 邢蓝田, 苏法卿, 单秀琴, 郑红菊, 张立平. 2019. 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. *地球科学*, 44: 1024–1041

王明健, 何登发, 包洪平, 鲁人齐, 桂宝玲. 2011. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成藏条件. *石油勘探与开发*, 38: 30–39

徐永昌, 沈平, 陶明信, 刘文汇. 1996. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——I. 氦资源的新类型: 沉积壳层幔源氦的工业储集. *中国科学D辑: 地球科学*, 26: 1–8

徐永昌, 沈平, 陶明信, 孙明良. 1990. 幔源氦的工业储集和郯庐大断裂带. *科学通报*, 35: 932–935

杨伟利, 王毅, 王传刚, 孙宜朴. 2010. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布特征与协同勘探. *地质学报*, 84: 579–586

张文, 李玉宏, 王利, 赵峰华, 韩伟, 宋昌贵. 2018. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测. *天然气地球科学*, 29: 236–244

张子枢. 1992. 四川盆地天然气中的氦. *天然气地球科学*, 3: 1–8

赵荟鑫, 张雁, 李超良. 2012. 全球氦气供应和价格体系分析. *化学推进剂与高分子材料*, 10: 91–96

Anderson S T. 2018. Economics, helium, and the U.S. Federal Helium Reserve: Summary and outlook. *Nat Resour Res*, 27: 455–477

Ballentine C J, Burnard P G. 2002. Production, release and transport of noble gases in the continental crust. *Rev Mineral Geochem*, 47:

481–538

Ballentine C J, Sherwood Lollar B. 2002. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton-Panhandle giant gas field, USA. *Geochim Cosmochim Acta*, 66: 2483–2497

Cai Z, Clarke R H, Glowacki B A, Nuttall W J, Ward N. 2010. Ongoing ascent to the helium production plateau—Insights from system dynamics. *Resour Policy*, 35: 77–89

Cao C, Zhang M, Tang Q, Yang Y, Lv Z, Zhang T, Chen C, Yang H, Li L. 2018. Noble gas isotopic variations and geological implication of Longmaxi shale gas in Sichuan Basin, China. *Mar Pet Geol*, 89: 38–46

Dai J. 2016. Giant Coal-derived Gas Fields and Their Gas Sources in China. New York: Academic Press. 1–100

Dai J, Ni Y, Qin S, Huang S, Gong D, Liu D, Feng Z, Peng W, Han W, Fang C. 2017. Geochemical characteristics of He and CO₂ from the Ordos (cratonic) and Bohaibay (rift) basins in China. *Chem Geol*, 469: 192–213

Dai J, Yang S, Chen H, Shen X. 2005. Geochemistry and occurrence of inorganic gas accumulations in Chinese sedimentary basins. *Org Geochem*, 36: 1664–1688

Dai J, Zou C, Li J, Ni Y, Hu G, Zhang X, Liu Q, Yang C, Hu A. 2009. Carbon isotopes of Middle-Lower Jurassic coal-derived alkane gases from the major basins of northwestern China. *Int J Coal Geol*, 80: 124–134

Kennedy B M, van Soest M C. 2007. Flow of mantle fluids through the ductile lower crust: Helium isotope trends. *Science*, 318: 1433–1436

Li Y, Qin S, Wang Y, Holland G, Zhou Z. 2020. Tracing interaction between hydrocarbon and groundwater systems with isotope signatures preserved in the Anyue gas field, central Sichuan Basin, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 274: 261–285

Li Y, Zhang W, Wang L, Zhao F, Han W, Chen G. 2017. Henry's law and accumulation of weak source for crust-derived helium: A case study of Weihe Basin, China. *J Nat Gas Geosci*, 2: 333–339

Liu Q Y, Worden R H, Jin Z J, Liu W H, Li J, Gao B, Zhang D W, Hu A P, Yang C. 2014. Thermochemical sulphate reduction (TSR) versus maturation and their effects on hydrogen stable isotopes of very dry alkane gases. *Geochim Cosmochim Acta*, 137: 208–220

Liu Q, Chen M, Liu W, Li J, Han P, Guo Y. 2009. Origin of natural gas from the Ordovician paleo-weathering crust and gas-filling model in Jingbian gas field, Ordos Basin, China. *J Asian Earth Sci*, 35: 74–88

Liu Q, Dai J, Jin Z, Li J, Wu X, Meng Q, Yang C, Zhou Q, Feng Z, Zhu D. 2016. Abnormal carbon and hydrogen isotopes of alkane gases from the Qingshen gas field, Songliao Basin, China, suggesting abiogenic alkanes? *J Asian Earth Sci*, 115: 285–297

Liu Q Y, Dai J X, Li J, Zhou Q H. 2008. Hydrogen isotope composition of natural gases from the Tarim Basin and its indication of

- depositional environments of the source rocks. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 51: 300–311
- Liu Q, Wu X, Wang X, Jin Z, Zhu D, Meng Q, Huang S, Liu J, Fu Q. 2019. Carbon and hydrogen isotopes of methane, ethane, and propane: A review of genetic identification of natural gas. *Earth-Sci Rev*, 190: 247–272
- Liu W, Xu Y. 1993. Significance of the isotopic composition of He and Ar in natural gases. *Chin Sci Bull*, 20: 1726–1730
- Lupton J E. 1983. Terrestrial inert gases: Isotope tracer studies and clues to primordial components in the mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 11: 371–414
- Oxburgh E R, O’Nions R K, Hill R I. 1986. Helium isotopes in sedimentary basins. *Nature*, 324: 632–635
- Peterson J B. 2021. Mineral Commodity Summaries 2021: Helium. Washington DC: United States Geological Survey
- Schoell M. 1980. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins. *Geochim Cosmochim Acta*, 44: 649–661
- Wang X, Liu W, Li X, Liu Q, Tao C, Xu Y. 2020a. Radiogenic helium concentration and isotope variations in crustal gas pools from Sichuan Basin, China. *Appl Geochem*, 117: 104586
- Wang Y, Liu Y, Zhao C, Li Q, Zhou Y, Ran H. 2020b. Helium and carbon isotopic signatures of thermal spring gases in southeast Yunnan, China. *J Volcanol Geotherm Res*, 402: 106995
- Wu X, Ni C, Liu Q, Liu G, Zhu J, Chen Y. 2017. Genetic types and source of the Upper Paleozoic tight gas in the Hangjinqi area, northern Ordos Basin, China. *Geofluids*, 2017: 4596273
- Zhang J, Yang W, Yi H, Xie W, Xie Z, Zeng F, Cen Y. 2015. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata, Sichuan Basin. *Nat Gas Industry B*, 2: 88–94
- Zhang W, Li Y, Zhao F, Han W, Li Y, Wang Y, Holland G, Zhou Z. 2019. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China. *Geochim Cosmochim Acta*, 251: 229–246

(责任编辑: 朱茂炎)