

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.008

花岗岩在氦气成藏中的双重作用:氦源与储集

李玉宏¹, 张文², 周俊林^{1,*}, 李济远³, 张云鹏¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:氦气是重要战略性稀有气体资源, 寻找富氦天然气藏是解决氦气资源短缺的关键。目前工业利用的氦资源主要是壳源氦气, 有效氦源岩是富氦天然气藏形成的基础, 储层是氦气聚集的必须条件。资料调研表明已知富氦天然气藏与花岗岩关系密切, 为研究花岗岩生氦、排氦及储氦能力, 利用花岗岩铀钍含量与赋存状态、分段加热释氦、氦离子抛光扫描电镜等实验分析数据, 结合前人成果综合研究表明:①渭河盆地南缘(北秦岭)花岗岩和银额盆地蒙额地1井花岗岩均富铀、钍, 生氦能力较强。②花岗岩中的铀、钍有铀钍独立矿物和铀钍类质同象矿物等2种赋存状态。③温度是控制花岗岩中氦气释放的首要因素, 不同矿物对氦气的封闭温度差异较大, 晶质铀矿中⁴He封闭温度最低, 为27℃~76℃, 而磁铁矿封闭温度最高, 可达250℃, 即花岗岩在温度大于250℃时对⁴He无封闭能力, 27℃~250℃具有部分封闭能力, 27℃以下具有完全封闭能力。④花岗岩纳米级孔隙大小优于页岩(页岩气储层), 微裂缝发育, 具有氦气运移和储存能力。可见, 花岗岩不仅是有效氦源岩, 也可以是氦气储集岩。与在烃源岩中找页岩气类似, 可在花岗岩等氦源岩中寻找氦气聚集。

关键词:花岗岩; 氦气; 氦源岩; 释放; 储层

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)04-0095-08

Dual Contribution of Granites in Helium Accumulation: Source and Reservoir

LI Yuhong¹, ZHANG Wen², ZHOU Junlin^{1,*}, LI Jiyuan³, ZHANG Yunpeng¹

(1. Xi'an Geological of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: As a strategically important noble gas resource, the exploration of helium in natural gas reservoirs is the key to solving the shortage of helium resources. Industrial use of helium resources is currently dominated by crust-derived helium. Effective helium source rocks are the foundation for the generation of helium-rich natural gas reservoirs, whereas reservoirs are necessary for the accumulation of helium. Previous researches have shown that the known helium-rich

收稿日期:2022-08-08;修回日期:2022-09-16;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:吕鹏瑞

基金项目:国家自然科学基金项目“壳源氦气有效氦源岩研究”(41572131)、中国地质调查局项目“全国氦气资源潜力评价与战略选区调查”(DD20221665)联合资助。

作者简介:李玉宏(1968-),男,博士,正高级工程师,主要从事油气及非常规能源地质调查工作。E-mail: L1763@tom.com。

* 通讯作者:周俊林(1986-),男,工程师,主要从事油气及非常规能源地质调查工作。E-mail: zjunlin@mail.cgs.gov.cn。

natural gas reservoirs are strongly associated with granites. To understand the helium generation, release and storage capacity in granites, this research analyzes the concentration and occurrence states of uranium(U) and thorium(Th), stepwise heating, argon ion polishing technique and scanning electron microscope, combined with previous results, it has been shown that: ①The granites in the southern margin of the Weihe basin(North Qinling) and from the Meng'erdi 1 well in the Yingen-Ejinaqi basin are both abundant in uranium and thorium, resulting in good helium production capacity. ②U and Th in granites have two states of occurrence, including, U-Th independent minerals and U-Th isomorphic minerals. ③Temperature is the primary factor controlling the release of helium from granites. The closure temperature for helium differs widely among minerals. Uraninite has the lowest closure temperature for ^4He at $27^\circ\text{C} \sim 76^\circ\text{C}$, while magnetite has the highest temperature and reaches 250°C . In other words, granite cannot block ^4He inside above 250°C , $27^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ suggests a partial closure range, and below 27°C has complete closure capacity. ④Granite has better nanoscale pore size than shale(shale gas reservoirs), and develops microfractures, therefore it has a good helium transport and storage capacity. In summary, granites are not only effective helium source rocks, but can also be helium reservoirs. Just like exploring shale gas in hydrocarbon source rocks, it is also possible to find helium accumulations in helium source rocks such as granites.

Keywords: granite; helium; helium source rock; diffusion; reservoir

氦气作为重要的稀有战略资源,近年来逐步得到广泛重视。目前工业利用的氦气主要为壳源氦气,以 ^4He 为主。地壳中 ^4He 主要由放射性元素 U、Th 等衰变形成的 α 粒子捕获电子形成。U 的天然放射性同位素包括 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{234}U ,但 ^{234}U 只占 U 总量的 0.005%,可忽略;Th 主要由 ^{232}Th 组成,占 Th 总量的 99.995%。氦源是形成富氦气藏的物质基础,美国 Hugoton-Panhandle 气田、中国威远气田、阿尔及利亚 Hassi R'Mel 气田等世界富氦气藏均发育有花岗岩基底;渭河盆地南缘及基底花岗岩体是盆地氦气的重要源岩。氦离子抛光扫描电镜等分析表明花岗岩微孔隙和裂缝发育,参照页岩气储层特征,花岗岩不仅是有效氦源岩,也可以成为氦气储集岩。

1 壳源氦气藏与花岗岩的关系

早在 1929 年,Ruedemann 和 Oles 就提出油气藏中大部分氦气是由 U、Th 的放射性衰变产生,并认为美国 Panhandle 气田中的氦气衰变自盆地浅部伟晶岩和花岗岩,Kansas 气田中的氦气来自盆地内沉积岩(Ruedemann et al.,1929)。Pierce 等(1964)认为 Panhandle 气田中的氦气来自基底,但基底生

氦的理论值应低于盆地的氦气富集量,因此不得不承认沉积岩对气田中的氦气有所贡献。Katz(1969)也认为沉积岩对气藏中氦气有所贡献。Ballentine 等(2002)的研究表明,全球最大富氦气藏 Panhandle 气田的氦气来自浅部地壳。Broadhead(2005)研究发现美国新墨西哥洲 Permian Basin 气藏的氦气来源于盆地前寒武纪花岗岩。Johnson(2012)研究发现加拿大不列颠哥伦比亚省东北部的氦气来源于基底花岗岩的热液卤水。总之,不同学者对壳源氦气来自 U、Th 等氦源元素的放射性衰变的观点是一致的,但具体来自哪种类型的岩石,不同学者仍存在争议,可能来自于花岗岩(伟晶岩)、沉积岩或盆地基底(李玉宏等,2022a)。

世界富氦气藏美国 Hugoton-Panhandle 气田(Ballentine et al.,2002)、中国威远气田(张健等,2015)和阿尔及利亚 Hassi R'Mel 气田(Sabaou et al.,2009)均发育有花岗岩基底。渭河盆地南缘秦岭造山带有大量花岗岩出露(Wang et al.,2015),而且盆地内显示有 11 个磁性体异常,其中盆地南缘磁性体与秦岭南缘花岗岩密切相关,武功-咸阳附近的磁性体代表隐伏花岗岩(李玉宏等,2011)。柴达木盆地北缘的周边山区广泛发育花岗岩体,且盆地内东坪和马北气田均钻遇花岗岩基底(付锁堂等,

2015;周伟,2016;Tian et al.,2018;李红哲等,2018)。鉴于花岗岩一般富铀钍,可通过放射性衰变生成较多的氦气(李玉宏等,2022a)。因此,花岗岩是一种潜在“氦源岩”。

2 花岗岩中氦源元素

2.1 花岗岩中氦源元素丰度

氦源元素主要包括 U、Th 2 种元素。秦岭 7 大岩体花岗岩 U 和 Th 平均含量分别为 5.8×10^{-6} 和 19.2×10^{-6} ,银额盆地井下花岗岩 U、Th 平均含量为 4.62×10^{-6} 和 7.04×10^{-6} 。各岩体样品中 U、Th 的含量变化相对较大,最大值分别为 55.1×10^{-6} 和 53.5×10^{-6} ,而最小值分别仅为 1.0×10^{-6} 和 2.5×10^{-6} (张文,2019;李玉宏,2022b)。

2.2 花岗岩中氦源元素赋存状态

花岗岩中的 U 和 Th 元素可富集在铀钍独立矿物中,包括晶质铀矿(UO_2)、铌钽铀矿($\text{Ti}-\text{Nb}-\text{Y}-\text{U}$)、铀钍石($\text{Th}-\text{U}$)、钍石(ThO_2)等,这些矿物中 UO_2 含量高于 10%;也可以以类质同象等分散状态存在于其他副矿物中,包括铌-钽-钇-铁矿物、独

居石、磷钇矿、锆石、磷灰石、褐帘石、榍石、金红石等(张文,2019;李玉宏,2022b;张乔等,2022)。

3 花岗岩中氦气释放

3.1 富铀钍矿物中氦气的扩散行为

常见富铀钍矿物中⁴He 封闭温度见图 1。张文等(2019)曾通过重矿物分离方式对秦岭翠华山岩体花岗岩样品中的铌钽铀矿进行了分段加热实验,获得到其封闭温度为 125℃。根据 Roudil 等(2018)的数据计算,晶质铀矿(UO_2)中⁴He 的封闭温度为 27~76℃,低于铌钽铀矿的 125℃(张文等,2019)。除磷灰石外($75\pm7^\circ\text{C}$)(Wolf et al.,1996),其他含铀钍类质同象矿物的封闭温度较高,依次为赤铁矿(>90~180℃)(Wernicke et al.,1997)、锆石(170~190℃)(Reiners,2002)、榍石(191~218℃)(Reiners,1999)、独居石(平均 241℃)(Boyce,2005)、磁铁矿(250℃)(Blackburn,2007)等。此外,含 Ca 矿物的封闭温度较低,如萤石(47~143℃)(Wolff,2016),碳酸盐矿物($70\pm10^\circ\text{C}$)(Copeland,2007)。

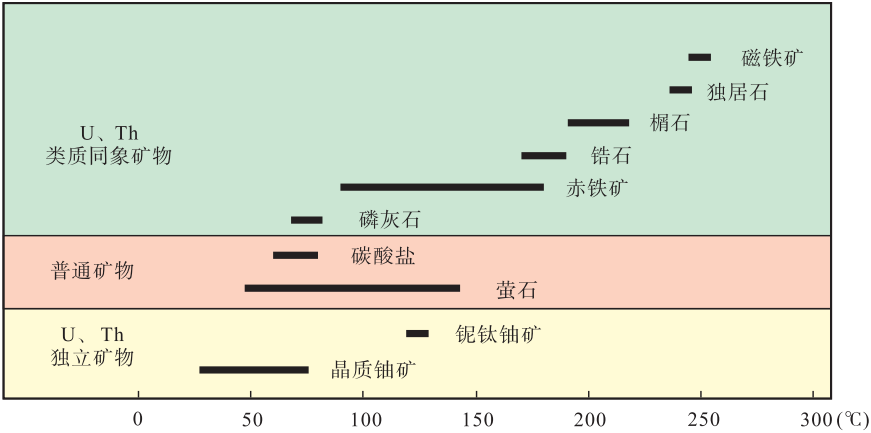


图 1 不同矿物⁴He 的封闭温度图

Fig. 1 ⁴He Closure temperatures in different minerals

3.2 花岗岩中氦气释放模式

根据氦气释放研究的结果,张文等(2019)以渭河盆地为代表提出了花岗岩中氦气释放模式(图 2)(Zhang et al.,2020)。

3.2.1 花岗岩能释放大部分氦气

通过分步加热熔融实验,对比花岗岩中氦气生成量和现今保存量,只有 1.5 %~17.4%的氦气还保存在花岗岩中,即 80%以上的⁴He 已经从花岗岩

中释放出去。

3.2.2 温度是控制花岗岩中氦气释放的首要因素

对 100 目的花岗岩颗粒而言,250℃时,花岗岩中⁴He 的扩散系数为 $1.86\times10^{-12}\sim2.89\times10^{-11}\text{ cm}^2/\text{s}$,丢失 90%的⁴He 需要 6.4~4.1 d;到 1 300℃时,扩散系数增大到 $6.79\times10^{-10}\sim1.08\times10^{-9}\text{ cm}^2/\text{s}$,丢失 90%的氦气仅需 0.1~0.2 d。按照封闭温度公式(Dodson,1973)计算,250~1 300℃下,氦气封闭

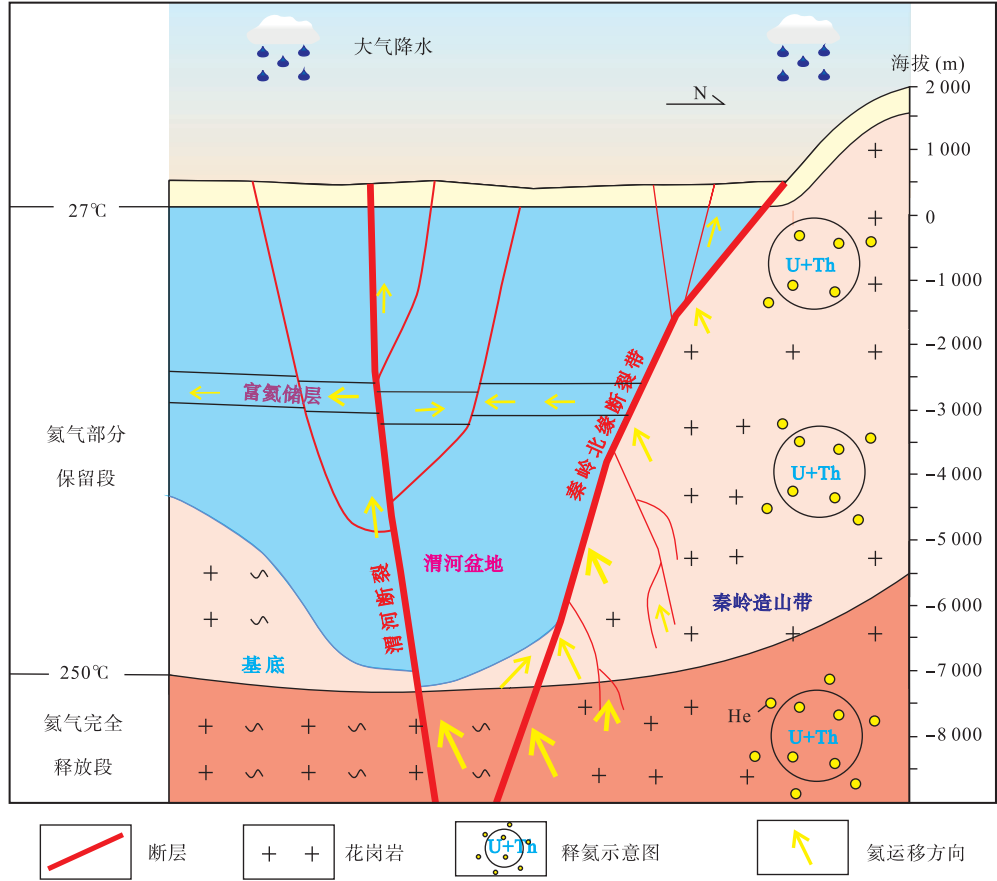


图 2 花岗岩中⁴He 释放模式图
Fig. 2 ⁴He releasing pattern in granite

温度计算值低于 0℃,即表示 250℃ 及以上花岗岩对⁴He 无封闭能力。

对花岗岩中富 U、Th 矿物而言,如品质铀矿、萤石、碳酸盐、磷灰石、赤铁矿、铌钽铀矿、锆石、榍石、独居石和磁铁矿等对⁴He 的封闭温度在 27~250℃,即 27~250℃ 范围内花岗岩中富 U、Th 矿物对⁴He 部分封存;低于 27℃ 时,⁴He 完全封存;高于 250℃,⁴He 不封存。

根据地表温度 15℃、地温梯度 3℃/100 m 计算,27℃ 和 250℃ 分别对应地下 400 m 和 7 800 m,即 400 m 以浅为⁴He 完全封闭区,400~7 800 m 为⁴He 部分封存区,7 800 m 以深为⁴He 不封存区。

3. 2. 3 断裂是释放花岗岩中不受温度封存氦气的通道

在部分封存区和不封存区(>400 m)⁴He 不受晶格制约而能部分或全部运移至矿物晶格外,如果有断层、断裂或微裂隙等发育,能进一步将矿物间的⁴He 运移至地壳浅部流体系统中。

4 花岗岩的氦气储集作用

以花岗岩风化壳为储层的油气藏较为广泛,如柴达木盆地的东坪气田,多个基岩天然气藏样品中氦气含量大于 0.05%,其中最小值为 0.068%,最大值为 0.81%。花岗岩类基岩裂缝为气藏储集空间,主要为溶蚀缝、节理缝、结构缝及细小的微裂缝,裂缝角度一般较大且裂缝交织成网状。侏罗纪煤系地层为气源的烃类天然气藏是氦气的载体气藏,富铀、钍花岗岩类基岩为重要氦源岩(张文,2019;韩伟,2020;张晓宝,2020)。成藏过程中,位于构造低部位的煤系烃类气向构造高部位的花岗岩风化壳储层运移过程中,可按照亨利定律“吸取”运移路径附近的氦气一起进入储层,形成含氦天然气藏,气藏及其下伏花岗岩类基岩中生成的氦气通过水循环,经过赋存状态转换不断进入天然气藏,长期积累形成富氦天然气藏(图 3)。

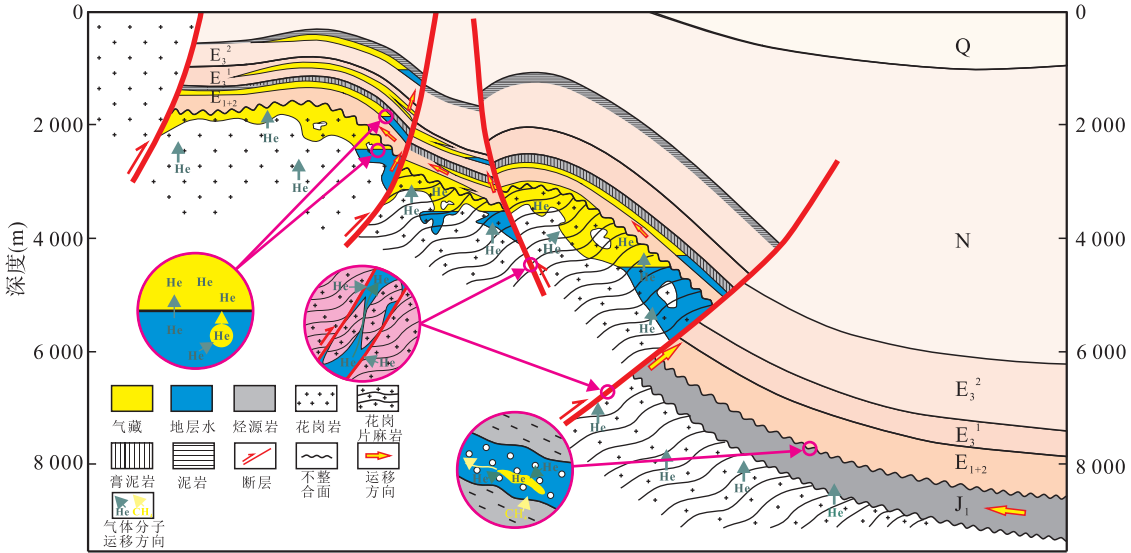


图 3 东坪富氦天然气成藏模式图

Fig. 3 Helium-rich gas reservoir pattern in the Dongping gas field

此外,内蒙古银额盆地钻探的蒙额参 3 井,在井深 2 712 m 钻遇侵入岩,但岩体顶面未见气测异常。钻至 2 769 m 才出现气测异常,到 2 796 m 进行了取心验证,获得含油岩心,证实了侵入岩岩腹型油气藏的存在。至 2 850 m 完钻,共钻探侵入岩 138 m(未穿),岩性以二长花岗碎裂岩、白云母花岗岩为主。锆石年龄为(299.2±1.3) Ma~(309.4±1.1) Ma,为晚

石炭世。油气主要显示段为 2 772.0~2 809.2 m 和 2 814.0~2 819.0 m,合计厚度为 42.2 m,均为裂缝含油。通过综合研究,笔者提出了银额盆地石炭纪侵入岩裂缝型油气成藏模式(图 4)。蒙额参 3 井试油为工业油流井,其伴生天然气中平均氦含量达到工业标准(表 1),值得进一步探索。可见花岗岩作为“内源型”氦源岩,可为山头风化壳型和岩腹裂缝

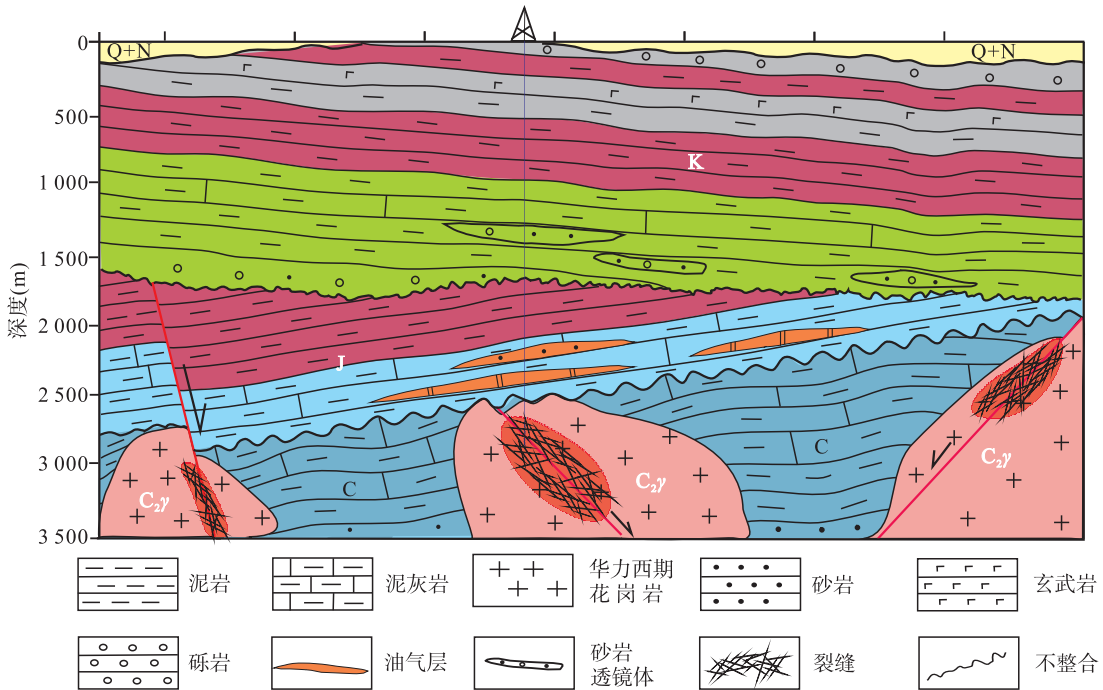


图 4 蒙额参 3 井侵入岩裂缝油气成藏模式示意图

Fig. 4 The hydrocarbon accumulation model of intrusive rock fractures for Meng'ercan 3 well

表 1 蒙额参 3 井氦气含量数据表
Tab. 1 Helium concentration in Meng'ercan 3 well

组分(%)	He	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	CO ₂
蒙额参 3-1	0.098	52.27	13.68	15.75	1.35
	0.104	52.15	12.43	19.50	0.80
蒙额参 3-2	0.127	58.85	11.75	15.43	2.91
	0.131	57.86	11.27	17.85	2.49

型花岗岩天然气藏提供氦气供应,花岗质基岩天然气藏是寻找富氦气藏的重要领域。

以上花岗岩类基岩气藏氦气富集模式与常见的沉积岩储层气藏氦气富集模式类似,只是氦源更近,更有利于氦富集,但都存在载体气(烃类气)稀释,氦

丰度不会太高。

氦离子抛光扫描电镜分析表明,花岗岩内部纳米级孔隙发育,孔隙大小可优于页岩(页岩气储层)(图 5)。花岗岩微裂缝发育,具有氦气运移和储存条件(图 6),表明花岗岩不仅是有效氦源岩,也可以是储集岩。

花岗岩的储集能力可以形成氦气运移的中转站,使氦气在一定的预聚集后集中发生运移,从而提高流体中氦气溶解量或形成局部游离态氦气富集,有利于进一步形成富氦天然气藏。当花岗岩 U、Th 含量足够高,氦气积累时间足够长,且温度、应力变化匹配时,在这些花岗岩内连通性差的储集空间中,将有可能形成“内源氦”的聚集,由于缺乏“载体气”

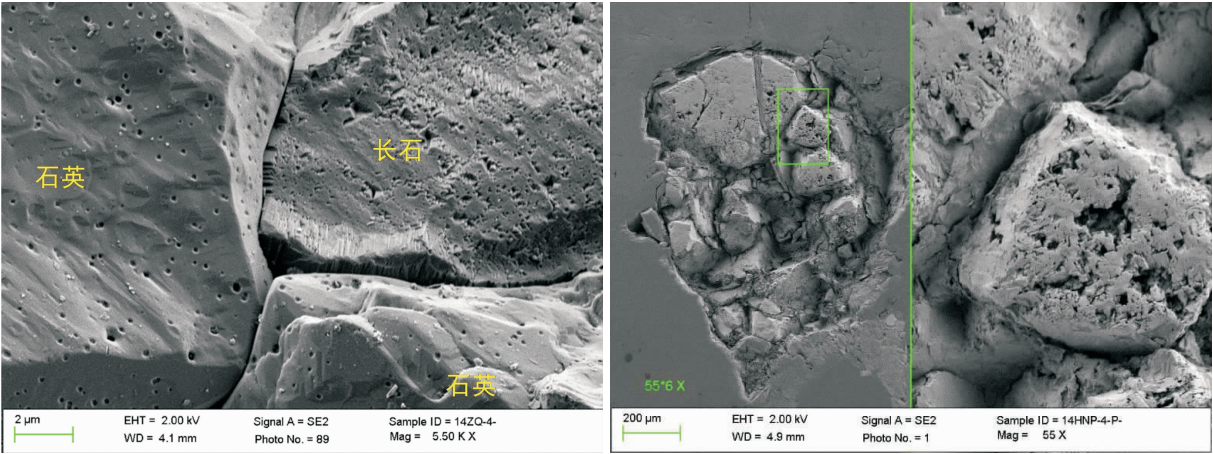


图 5 花岗岩氦离子抛光扫描电镜图
Fig. 5 Argon ion polishing technique and scanning electron microscope of granites

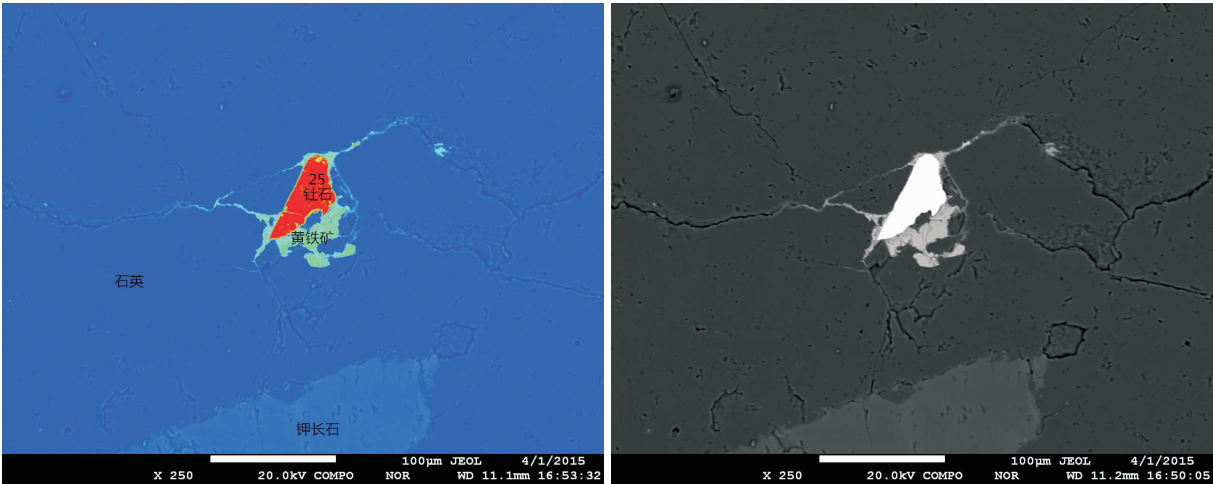


图 6 花岗岩微观孔缝结构图
Fig. 6 Microscopic pore and crack structure in granite

的稀释,氦丰度会“异常高”,就像在烃源岩中找页岩气一样,未来有可能在花岗岩等缺乏有机质的氦源岩中找到高丰度的氦气聚集,并通过“体积压裂”获得高氦气流。当然,氦气的“弱源性”是其成为具有一定资源量的工业气藏的瓶颈。

5 结论

(1)花岗岩中氦气的生成和释放行为研究表明,花岗岩是一种有效氦源岩。花岗岩富 U、Th 元素, U、Th 以独立矿物和类质同象等 2 种状态赋存,可生成大量氦气。

(2)温度是控制花岗岩中氦气释放的首要因素,低于 27℃时,花岗岩中富 U、Th 矿物对⁴He 完全封存;27~250℃,⁴He 部分封存;高于 250℃,⁴He 不能封存;断裂可将不受温度封存的⁴He 运移至地壳浅部的流体系统中成藏。

(3)氩离子抛光扫描电镜分析表明,花岗岩内部纳米级孔隙发育,孔隙大小可优于页岩(页岩气储层),且微裂缝发育,具有氦气运移和储存条件,可见花岗岩不仅是有效氦源岩,也可以是氦气储集岩。花岗岩对氦气的储集能力不仅有利于氦气二次运聚成藏,未来也有可能在花岗岩等缺乏有机质的氦源岩中发现高丰度的氦气聚集。

参考文献(References):

付锁堂,马达德,陈琰,等.柴达木盆地阿尔金山前东段天然气勘探[J].中国石油勘探,2015,20(06):1-13.

FU Suotang, MA Dade, CHEN Yan, et al. Natural Gas Exploration in Eastern Segment of Alkin Piedmont, Northern Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(06):1-13.

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(03): 385-392.

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,

(S1):47-53.

LI Yuhong, LU Jincui, LI Jinchao, et al. Distribution of the Helium-Rich Wells and Helium Derivation in Weihe Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2011, 41(S1):47-53.

李玉宏,周俊林,张文,等.渭河盆地氦气成藏条件及资源前景(修订版)[M].北京:地质出版社,2022b.

LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in the Weihe Basin (Revised) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022b.

李玉宏,李济远,周俊林,等.国内外氦气资源勘探发现状及其对中国的启示[J].西北地质,2022a,55(3):233-240.

LI Yuhong, LI Jiyan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and Development Status of Helium Resources and its Implications for China [J]. Northwestern Geology, 2022a, 55(3):233-240.

李红哲,马峰,谢梅,等.柴达木盆地阿尔金东段基岩气藏盖层特征及控藏机制[J].天然气地球科学,2018,29(08):1102-1110.

LI Hongzhe, MA Feng, XIE Me, et al. Caprocks characteristics and their control on hydrocarbon accumulation of bedrock gas reservoirs in eastern segment of Alkin Piedmont, Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(08):1102-1110.

张健,杨威,易海永,等四川盆地前震旦系勘探高含氦天然气的可行性[J].天然气工业,2015,35(01):45-52.

ZHANG Jian, YANG Wei, YI Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the presinian strata of the Shichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(01):45-52.

张乔,周俊林,李玉宏,等.渭河盆地南缘花岗岩中生氦元素(U、Th)赋存状态及制约因素研究——以华山复式岩体为例[J].西北地质,2022,55(3):241-256.

ZHANG Qiao, ZHOU Junlin, LI Yuhong, et al. The Occurrence State and Restraint Factors of Helium-produced Elements (U, Th) in the Granites from the Southern Margin of Weihe Basin: Evidences from Huashan Complex [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 241-256.

张文.关中和柴北缘地区战略性氦气资源成藏机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2019.

ZHANG Wen. Accumulation mechanism of helium, a strategic resource, in Guanzhong and North Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019.

- 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, Helium Source and Exploration Prospect [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31: 1585-1592.
- 周伟.柴达木盆地西缘基岩风化壳与油气运聚关系研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
- ZHOU Wei. Relationship between the basement rock weathering crust and the hydrocarbon migration and accumulation in the west margin of the Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.
- Ballentine C J, Sherwood L 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.
- Blackburn T J, Stockli D F, Walker J D. Magnetite (U - Th)/He Dating and Its Application to the Geochronology of Intermediate to Mafic Volcanic Rocks [J]. *Earth And Planetary Science Letters*, 2007, 259(3):360-371.
- Boyce J W, Hodges K V, Olszewski W J, et al. He Diffusion in Monazite: Implications for (U - Th)/He Thermochronometry [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(12): Q12004.
- Broadhead R F. Helium in New Mexico-Geologic Distribution, Resource Demand, and Exploration Possibilities [J]. *New Mexico Geology*, 2005, 27(4):93-101.
- Copeland P, Watson E B, Urizar S C, et al. Alpha Thermochronology of Carbonates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(18): 4488-4511.
- Dodson M H. Closure Temperature in Cooling Geochronological and Petrological Systems [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 40(3):259-274.
- Johnson G E. Helium in Northeastern British Columbia [R]. *Geoscience Reports 2013; British Columbia Ministry of Natural Gas Development*, 2013: 45-52.
- Katz D L. Source of Helium in Natural Gases [R]. *USBM Information Circular 8417*, 1969: 242-255.
- Pierce A P, Gott G B, Mytton J W. Uranium and Helium in the Panhandle Gas Field, Texas, and Adjacent Areas [R]. *U. S. Geological Survey Professional Paper 454 - G*, 1964: 57.
- Reiners P W, Farley K A. Helium Diffusion and (U - Th)/He Thermochronometry of Titanite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22):3845-3859.
- Reiners P W, Farley K A, Hickes H J. He Diffusion and (U - Th)/He Thermochronometry of Zircon: Initial Results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte [J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1-4):297-308.
- Roudil D, Bonhoure J, Pik R, et al. Diffusion of Radiogenic Helium in Natural Uranium Oxides [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 378(1):70-78.
- Ruedemann P, Oles L M. Helium: Its Probable Origin and Concentration in the Amarillo Fold, Texas [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1929, (7): 799-810.
- Sabaou N, Ait-Salem H, Zazoun R S. Chemostratigraphy, Tectonic Setting and Provenance of the Cambro-Ordovician Clastic Deposits of the Subsurface Algerian Sahara [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2009, 55(3): 158-174.
- Tian J, Li J, Pan C, et al. Geochemical Characteristics and Factors Controlling Natural Gas Accumulation in the Northern Margin of the Qaidam Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 160:219-228.
- Wang X, Wang T, Zhang C. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and its Bearing on Orogenic Evolution [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(9):1497-1512.
- Wernicke R S, Lippolt H J. (U+Th) - He Evidence of Jurassic Continuous Hydrothermal Activity in the Schwarzwald Basement, Germany [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138(3):273-285.
- Wolf R A, Farley K A, Silver L T. Helium Diffusion and Low-temperature Thermochronometry of Apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21):4231-4240.
- Wolff R, Dunkl I, Kempe U, et al. Variable Helium Diffusion Characteristics in Fluorite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 188: 21-34.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, 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.