



引文格式: 戴鑫, 豆霜, 陈双玲, 等. 四川盆地威远气田、金秋气田氦气成藏机制[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 46–59.
DOI: 10.12401/j.nwg.2025038

Citation: DAI Xin, DOU Shuang, CHEN Shuangling, et al. Study on Helium Reservoir Forming Mechanism of Weiyuan Gas Field and Jinqu Gas Field in Sichuan Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 46–59. DOI: 10.12401/j.nwg.2025038

四川盆地威远气田、金秋气田氦气成藏机制

戴鑫, 豆霜, 陈双玲, 张宝收, 汪华, 王小娟, 周刚, 张亚, 严威, 施雨华

(中石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 四川盆地是中国的天然气主力产区之一, 天然气伴生气的氦气资源也广泛分布, 其中的威远富氦天然气田是中国第一个工业利用的氦气田, 威远天然气中氦含量最高可达 0.342%; 金秋气田是盆地内近年发现的第二个含氦较高的天然气田, 氦气平均丰度为 0.07%。笔者通过威远、金秋气田岩样、气样采样分析, 与前人研究成果对比分析, 研究表明威远气田和金秋气田的成藏机制有所不同: 威远气田氦气主力产层为震旦系灯影组, 震旦系氦气平均含量为 0.28%, 氦气主要来源于基底花岗岩, 以地层水为载体向上运移; 金秋气田氦气主要产于侏罗系沙溪庙组, 含量最高的井为 0.2%, 存在多套氦源岩, 沙溪庙组砂岩内源氦气贡献率最高, 氦气以烃类气为载体运移, 岩性气藏的差异聚集导致氦气含量的强非均质性。

关键词: 四川盆地; 威远气田; 金秋气田; 氦气成藏机制

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0046-14

Study on Helium Reservoir Forming Mechanism of Weiyuan Gas Field and Jinqu Gas Field in Sichuan Basin

DAI Xin, DOU Shuang, CHEN Shuangling, ZHANG Baoshou, WANG Hua, WANG Xiaojuan,
ZHOU Gang, ZHANG Ya, YAN Wei, SHI Yuhua

(Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The Sichuan Basin is one of the main natural gas production areas in China, and the helium resources of natural gas associated gas are widely distributed. Among them, the Weiyuan Rich Helium Natural Gas Field is the first helium gas field to be industrially utilized in China, with the highest helium content in Weiyuan natural gas reaching 0.342%; Jinqu gas field is the second natural gas field with high helium content discovered in the basin in recent years, with an average helium abundance of 0.07%. This article analyzes rock and gas samples from Weiyuan and Jinqu gas fields, and compares them with previous research results. The study shows that the reservoir formation mechanisms of Weiyuan gas field and Jinqu gas field are different: the main production layer of helium in Weiyuan gas field is the Dengying Formation of the Sinian system, with an average helium content of 0.28%. Helium mainly comes from the basement granite and migrates upward with formation water as a carrier; The helium gas in Jinqu gas field is mainly produced in the Jurassic Shaximiao

收稿日期: 2023-07-19; 修回日期: 2025-01-24; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中石油“十四五”油气资源评价课题“西南油气田探区“十四五”油气资源评价”(2023YQX201 12)资助。

作者简介: 戴鑫(1984-), 男, 工程师, 主要从事天然气地质综合研究工作。E-mail: daixin08@petrochina.com.cn。

Formation, with the highest content of 0.2% in the well. There are multiple sets of helium source rocks, and the Shaximiao Formation sandstone has the highest contribution rate of endogenous helium gas. Helium gas is transported by hydrocarbon gas as the carrier gas, and the differential accumulation of lithological gas reservoirs leads to strong heterogeneity in helium content.

Keywords: Sichuan basin; Weiyuan gas field; Jinqu gas field; helium accumulation mechanism

相对于烃类天然气, 氦气成藏的研究程度虽然明显薄弱, 但也形成了很多共识度较高的理论认识。氦气有大气源、壳源、幔源 3 个来源(魏泽坤等, 2023)。地下天然气藏中大气来源的氦可以忽略不计, 主要是壳源(放射性来源)和幔源。壳源氦气是由矿物、岩石中含有 U、Th 元素发生放射性衰变形成的, 主要是 ^4He 。幔源氦气是地幔中的氦气通过岩浆活动发生脱气作用释放的, 主要为 ^3He 。可通过 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值来确定氦的来源(李玉宏等, 2018, 2022a, 2022b; 张宇轩等, 2022; 冯旭亮等, 2025)。目前, 世界范围内并没有发现以氦气为主的天然气聚集, 而是与烃类气藏、二氧化碳气藏或多种气体的混合天然气伴生(张健等, 2023; 李云波等, 2025)。对氦气在天然气藏中富集过程的认识, 均停留在理论认识阶段, 并无实验数据验证, 其中影响最大的是 Brown(2010)提出的氦气富集遵循亨利效应。目前已发现的富氦天然气的盖层以盐岩和石膏层为主, 这主要是膏岩层孔隙度较低, 含有非常少的地层水, 从而降低了氦气以及氦气载体气的向上散失(李玉宏等, 2018, 2022a, 2022b)。但由于氦气分子非常小, 可以穿过岩石晶体裂变径迹扩散。因此, 天然气藏的保存条件下, 氦气的散逸程度可能高于天然气。这些理论认识对笔者研究四川盆地氦气成藏有重要的指导作用。

四川盆地目前是中国氦气资源较丰富的盆地(辛志源等, 2025; 邹易等, 2025), 其中威远气田和金秋气田氦气含量相对较高。最近的资料显示, 威远天然气中氦含量最高可达 0.342%(李玉宏等, 2018; 赵安坤等, 2022; 张宝收等, 2024); 金秋气田氦气平均丰度 0.07%, 含量最高井 QL18 为 0.2%, 具备工业价值。为了进一步明确这两个含氦气藏的成藏机制, 本项目组分别采集了金秋气田、威远气田的井口气样、岩心样品, 以及野外岩样, 对样品进行了一系列分析实验, 并根据实验数据, 判定该区域氦气来源及氦源岩生氦强度, 确定主要氦源岩及其贡献。在此基础上, 笔者以氦气弱源气成藏理论为指导, 结合前人对威远气田的研究成果, 对有效氦源、高效运移通道、载体气藏等氦气

成藏的主控因素进一步分析, 完成威远气田、金秋气田的氦气成藏机制研究。

1 地质背景及概况

四川盆地威远气田位于四川省威远县、资中县和荣县之间, 是中国首个实现氦气商业利用的气田, 也是中国唯一一个进行工业开采的氦气田。从构造来看, 威远气田位于乐山-龙女寺古隆起的最高部位, 发育下寒武统筇竹寺组海相泥质烃源岩、震旦系灯影组等储集层, 灯影组是主力气层, 年龄为 600~700 Ma, 岩石以白云岩为主, 储集空间以溶蚀孔洞和裂缝为主。该气田含天然气面积为 216 km², 2001 年底探明天然气原始地质储量为 408.61×10⁸ m³, 可采储量为 147.82×10⁸ m³, 至 2001 年底, 历年累计采出 145.94×10⁸ m³, 剩余可采储量为 1.88×10⁸ m³, 是个接近枯竭的气田(戴金星, 2003)。该气田氦气含量普遍比全国各气田高, 基本上都大于 0.1%, 属于富氦气田, 其中灯影组气藏含氦量在 0.2% 以上, 二叠系的含量较低, 约为 0.1%。天然气中氦含量大于 0.05% 就具备工业价值, 威远气田灯影组中的氦曾是中国工业制氦的唯一气藏, 按平均值 0.2% 计算, 根据天然气原始地质储量可折算出氦气储量约为 0.8×10⁸ m³(陈践发等, 2021)。最近的资料显示, 威远天然气中氦含量最高可达 0.342%(李玉宏等, 2018)。

金秋气田位于川中-川西过渡带是川中油气区和川西气区的过渡单元, 也是川中平缓褶皱带和川北低平褶皱带的过渡区域, 为典型逆冲褶皱系统中倾伏的鼻状构造。该气田主力气层为侏罗系沙溪庙组, 为一套巨厚陆相碎屑岩红色地层间夹中厚层块状砂岩, 下伏地层主要发育须家河组煤系烃源岩及大安寨段湖相泥页岩两套烃源岩层。2018 年在沙溪庙组致密砂岩气藏勘探取得突破; 截至 2021 年底, 累计提交探明储量为 1 000×10⁸ m³, 是四川盆地中侏罗系沙溪庙组目前已发现规模最大的气田(张本健等, 2022)(图 1)。该层天然气中含有氦气, 氦气平均丰度为 0.07%, 含量

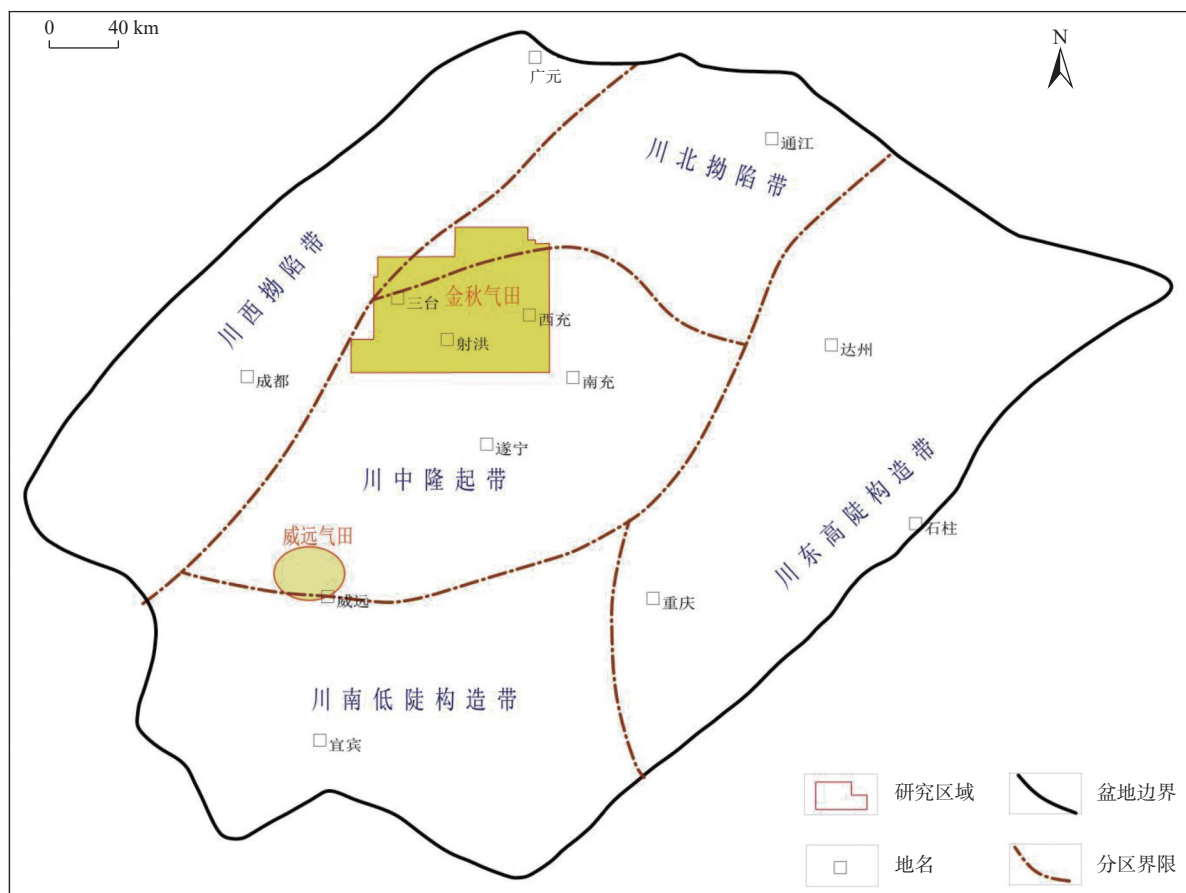


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the research area

最高井 QL18 为 0.2%, 具备工业价值。前人曾对金秋气田 16 井区沙溪组二段 8 号砂组氦气进行储量评价, 氦气探明地质储量为 $454.92 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。金秋气田已经展现出较好的氦气勘探前景, 有望成为继威远气田以后, 四川盆地内又一个进行商业开发的氦气田。金秋气田深部探井灯影组氦气丰度为 0.01%~0.04%, 远低于沙溪庙组, >威远气田的氦气分布规律不同。

2 样品采集与实验结果

为进一步深入比较威远气田和金秋气田氦气成藏机制, 认识其资源潜力, 笔者采集了两个气田及野外岩样 47 块, 进行了镜下岩石薄片鉴定及全岩微量元素检测; 气样 30 个, 进行了氦气含量测试及氦同位素分析。其中, 威远气田钻井岩心、野外岩样 27 块, 气样 12 个; 金秋气田钻井岩心和野外岩样 20 块, 气样 18 个(图 2)。

2.1 样品采集

为研究威远和金秋地区的氦源岩, 在岩心库取威

远气田 6 口井 25 块岩心、金秋气田 5 口井 13 块岩心。在雅安地区及汉中碑坝地区现场采集野外岩样 9 块。为了对岩样准确定名, 进行了镜下岩石薄片鉴定, 采用奥林巴斯 BX53 偏光显微镜在西北大学大陆动力学国家重点实验室观察分析。对岩石样品中的铀、钍含量(全岩微量元素)进行分析测试, 采用溶样法在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用 Analyticjena PQMS elite ICP-MS 分析完成。

为了研究氦气含量和氦气来源, 采用专用钢瓶在威远气田现场采集了 6 口井 12 个气样, 金秋气田现场采集了 10 口井 18 个气样。氦气在天然气中含量很低, 准确测定其含量有一定的难度, 但确定氦气的准确含量对氦气成藏主控因素和氦气成藏机制的研究至关重要。笔者选择在这方面专业水平最高的国家地质实验测试中心进行氦气含量测试, 采用 Agilent7890 气相色谱仪, 氦气作为载气。气体样品氦同位素在中国地质科学院地质研究所稀有气体同位素实验室分析完成, 采用稀有气体同位素质谱计 D12 测 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值。

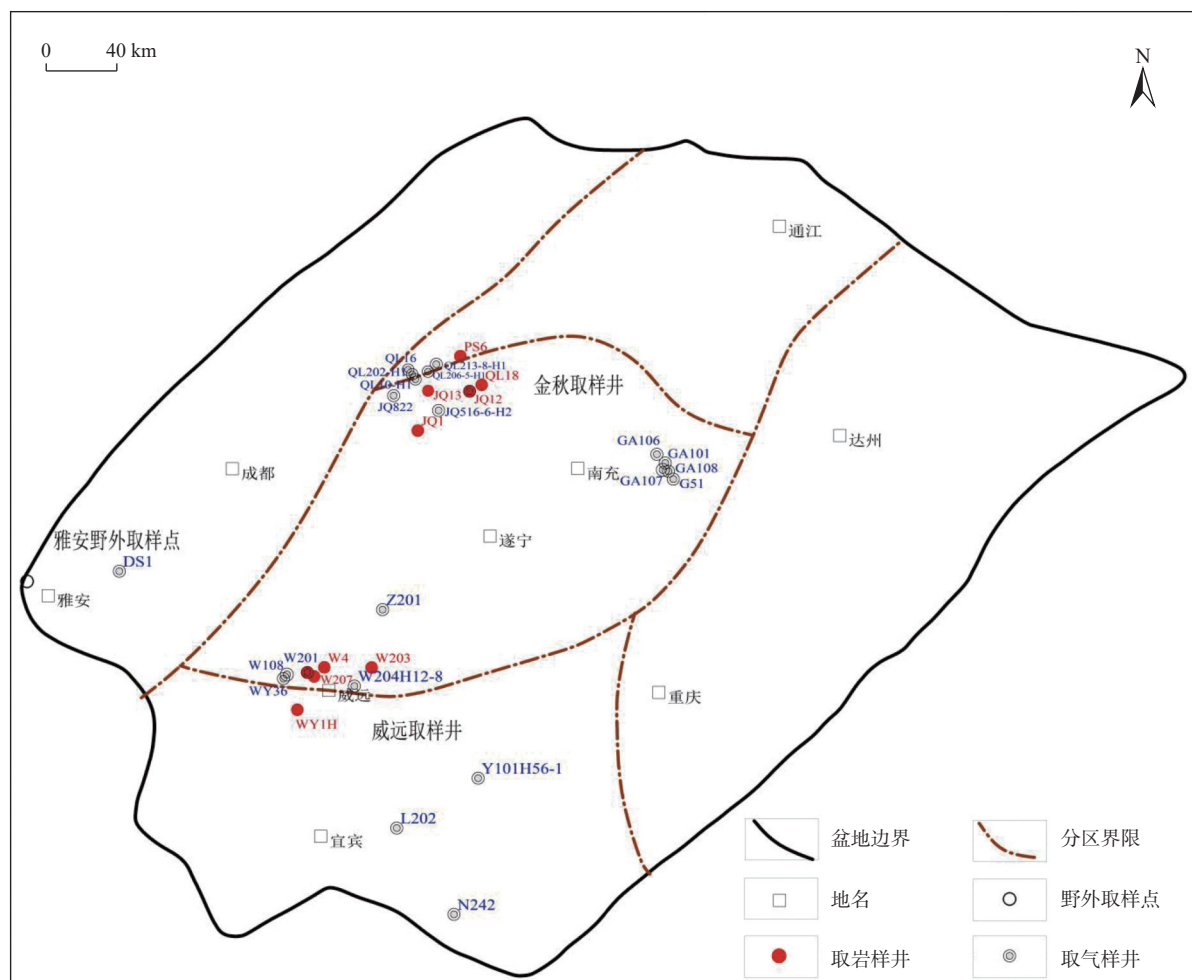


图2 威远、金秋气样及岩样取样井(点)位置图

Fig. 2 Location map of gas and rock sampling wells (point) in Weiyuan and Jinqu

2.2 实验结果

2.2.1 威远地区

(1) 威远地区岩样中 U、Th 含量

根据威远气田岩石薄片鉴定统计, 岩心岩性主要为页岩、砂岩、白云岩和灰岩, 基底岩性主要为花岗岩。其中, 页岩 Th、U 含量最高, Th 含量为 6.17×10^{-6} ~ 21.40×10^{-6} , U 含量为 4.15×10^{-6} ~ 92.30×10^{-6} 。基底花岗岩 Th、U 含量次之, Th 含量为 15.20×10^{-6} ~ 25.50×10^{-6} , U 含量为 1.72×10^{-6} ~ 5.04×10^{-6} 。页岩中, W207 井志留系龙马溪组页岩的 Th、U 含量最高, Th 含量为 21.40×10^{-6} , U 含量为 92.30×10^{-6} ; W207 井寒武系筇竹寺组次之, Th 含量为 8.90×10^{-6} , U 含量为 49.20×10^{-6} (表 1)。由此可见, U、Th 含量的总趋势是有机页岩最高, 花岗岩次之; 志留系龙马溪组 U、Th 含量最高, 寒武系筇竹寺组含量次之。单就花岗岩来看, 威远地区野外花岗岩的 Th、U 值为 15.20×10^{-6} 和

1.72×10^{-6} , 远低于基底花岗岩的 Th、U 含量分别为 21.20×10^{-6} ~ 25.50×10^{-6} 和 4.47×10^{-6} ~ 5.04×10^{-6} (表 1), 尤其是 U 元素, 推测是野外花岗岩中 U 淋失严重, Th 值也受影响, 但没有 U 值严重。

(2) 威远地区气样氦气含量及氦气来源

根据 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值来确定氮的来源。通常大气来源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.4×10^{-6} ; 壳源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 2.0×10^{-8} ; 幔源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.1×10^{-5} 。可以用二元复合模式来计算天然气样品中壳源和幔源所占份额, 其计算公式为:

$$\text{幔源氮份额}(\%) = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100 \quad (1)$$

根据实测出的威远气田各层氮源岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 数据与上述公式计算出幔源氮与壳源氮份额 (表 2), 可明显看出威远气田的氦气 99% 以上来自壳源, 0.1%

表 1 威远气田岩样铀、钍含量数据表

Tab. 1 Uranium and thorium content data table of rock samples from Weiyuan Gas Field

井号	深度 (m)	层位	岩性	Th(10^{-6})	U(10^{-6})
W201#	2 808.77~2 808.96	寒武系筇竹寺组	含有机质细砂粉砂页岩	10.00	19.73
W201#	2 772.35~2 772.51	寒武系筇竹寺组	钙质粉砂岩	4.31	1.04
W201#	1 388.25	志留系龙马溪组	含粉砂黏土岩	16.40	2.85
W201#	1 371.23~1 371.39	二叠系栖霞组-梁山组	含有机质生屑泥晶灰岩	1.29	3.49
W201#	2 823.35~2 823.74	震旦系灯影组四段	细粉晶白云岩	0.58	2.56
W201#	2 819.59~2 819.90	震旦系灯影组四段	细晶白云岩	1.74	6.12
WY1H#	4 304.32~4 304.52	寒武系筇竹寺-2亚段	含有机质黏土质粉砂页岩	8.69	7.38
WY1H#	4 287.25	寒武系筇竹寺-2亚段	含有机质泥质粉砂页岩	7.52	4.15
W4#	3 317.18~3 317.23	震旦系灯影组	细晶白云岩	0.31	0.72
W4#	3 339~3 339.26	震旦系灯影组	重结晶亮晶含凝块砂屑白云岩	0.20	0.20
W4#	3 380.04~3 380.22	震旦系灯影组	似皮壳状细粉晶白云岩	0.52	0.77
W203#	2 874.58~2 874.86	二叠系栖霞组	矿化生屑泥晶灰岩	3.35	3.17
W203#	3 161.64~3 161.73	志留系龙马溪组	含有机质钙质砂质页岩	12.3	7.65
W203#	2 887.98	志留系龙马溪组	含粉砂黏土岩	13.00	7.89
W203#	3 179.06~3 179.25	奥陶系宝二段	含生屑泥晶灰岩	5.90	0.43
W207#	1 864.86~1 864.95	奥陶系宝塔组	含生屑泥晶灰岩	6.51	0.67
W207#	3 242.29~3 242.41	寒武系筇竹寺组	含有机质砂质页岩	8.90	49.20
W207#	1 860.84~1 861.14	奥陶系五峰组	含铁粉砂质黏土质页岩	6.17	1.85
W207#	3 176.56~3 176.84	寒武系筇竹寺组	矿化细粒长石砂岩	7.48	1.67
W207#	1 844.15~1 844.29	志留系龙马溪组	含有机质黏土砂质页岩	21.40	92.30
W207#	1 854.20~1 854.60	奥陶系五峰组	亮晶含生屑砂屑灰岩	0.85	4.73
W117-1	3 625.85	基底	条带状含粉细砂质泥质板岩	7.03	4.62
W117-2	3 679.17	基底	碎裂化碱长花岗岩	25.50	4.47
W117-3	3 637.44	基底	中粗粒正长花岗岩	21.20	5.04
W117-4	3 378.75	灯影组二段下亚段	碎裂化溶蚀孔洞状泥晶白云岩	1.57	0.76
宝兴县		黄水河群	揉皱绢云千枚岩	7.17	1.51
雅安天全小河乡		黄水河群-峨边群	中细粒花岗闪长岩	15.20	1.72

来自幔源。

威远气田主力产层是灯影组, 隐藻白云岩是主要储层, 溶蚀孔隙、成岩变形构造缝洞和构造裂缝发育。由于穿层缝和断层的切割, 各层段上相互连通, 故气藏有统一的水动力系统。但各取样井的氦气含量却相差较大, 最高值为 0.135%, 最低值为 0.045%, 除 W201、W204H12-8 井氦气含量较低外, 其余井氦气含量普遍较高, 基本达到 0.1%, 氦气含量的平均值约为 0.084%(表 3)。

2.2.2 金秋地区

(1) 金秋地区岩石样品中 U、Th 含量

金秋气田侏罗系沙溪庙组作为主力产层, 岩心取样最多, 根据岩石薄片鉴定结果统计岩心主要为侏罗系沙溪庙组二段的砂岩和黏土岩。基底尚未有钻井岩心, 取到野外露头岩样, 根据岩石薄片统计, 岩性为岩浆岩(花岗岩)、变质岩(片麻岩、辉长岩)、沉积岩(砂岩、灰岩、页岩)。

岩心检测结果显示, 金秋气田侏罗系沙溪庙组岩样 Th 含量为 $6.59 \times 10^{-6} \sim 19.10 \times 10^{-6}$, U 含量为 $1.18 \times 10^{-6} \sim 9.56 \times 10^{-6}$ (表 4)。野外岩样中花岗岩露头 Th 含量为 $3.92 \times 10^{-6} \sim 6.16 \times 10^{-6}$, U 含量为 $0.63 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-6}$ (表 5)。前人也曾研究过不同岩石的 Th、U 含量, 砂

表 2 威远气田气样氦同位素数据表

Tab. 2 Helium isotope data table of gas samples from Weiyuan Gas Field

井号	层位	³ He/ ⁴ He(10 ⁻⁸)	幔源氦份额	壳源氦份额
W201井	寒武系筇竹寺组	3.35	0.12%	99.88%
Z201井	寒武系筇竹寺组	2.84	0.08%	99.92%
W201-H3井	寒武系筇竹寺组	2.67	0.06%	99.94%
W201-H1井	志留系龙马溪组	3.92	0.17%	99.83%
W108井	震旦系灯影组	3.87	0.08%	99.92%
W108井	震旦系灯影组	4.30	0.21%	99.79%
WY36井	二叠系茅口组	3.17	0.11%	99.89%
WY36井	二叠系茅口组	3.09	0.10%	99.90%

表 3 威远气田取样井氦气检测数据

Tab. 3 Helium gas detection data from sampling wells in Weiyuan Gas Field

井名	层位	氦气(%)
WY36	二叠系茅口组	0.051
WY36	二叠系茅口组	0.149
W204H12-8	志留系龙马溪组	0.022
W204H12-8	志留系龙马溪组	0.022
W201-H1	志留系龙马溪组	0.102
W201-H1	志留系龙马溪组	0.097
W201	寒武系筇竹寺组	0.045
W201	寒武系筇竹寺组	0.045
W201-H3	寒武系筇竹寺组	0.131
W201-H3	寒武系筇竹寺组	0.135
W108井	震旦系灯影组	0.112
W108井	震旦系灯影组	0.112

表 4 金秋气田沙溪庙组岩样铀、钍含量

Tab. 4 Uranium and thorium contents in rock samples of Shaximiao Formation, Jinqiu Gas Field

序号	原编号	岩石薄片定名	Th(10 ⁻⁶)	U(10 ⁻⁶)
1	JQ 1#1970-1971	细中粒岩屑长石砂岩	6.59	1.18
2	JQ 1#1693-1695	含铁粉砂质黏土岩	15.50	3.23
3	JQ 12#2588-2590	中细粒岩屑长石砂岩	15.00	5.00
4	JQ 12#2594-2595	含铁黏土质细砂粉砂岩	17.10	3.09
5	JQ 12#2171.23-2172.69	含铁粉砂质黏土岩	19.10	3.74
6	JQ 12#2592-2594	粉砂质黏土岩	15.80	3.66
7	JQ 12#2146.61-2148.2	细中粒岩屑长石砂岩	9.60	1.52
8	JQ 13#1770.52-1772.49	细粒岩屑长石砂岩	10.50	2.10
9	QL 18#2109.75-2109.96	黏土质细粒岩屑砂岩	12.90	4.41
10	QL 18#2114.04-2114.18	含黏土粉砂细砂岩	16.30	9.56
11	QL 18#2104.97	粗中粒岩屑长石砂岩	11.60	5.20
12	QL18#2117.6-2117.7	黏土质粉砂细砂岩	12.80	4.27
	沙溪庙最大值		19.10	9.56
	沙溪庙最小值		6.59	1.18
	沙溪庙平均值		13.57	3.91
	砂岩参考值		1.70	0.45

岩 Th 平均值为 1.70×10^{-6} , U 平均值为 0.45×10^{-6} ; 页岩 Th 平均值为 12.00×10^{-6} , U 平均值为 3.70×10^{-6} 。可以明显看出金秋气田侏罗系沙溪庙组岩样的 U、Th 含量普遍高于野外基底花岗岩露头,也高于前人研究的砂岩 U、Th 含量平均值,甚至接近页岩的 U、Th 含量平均值。

表 5 金秋气田野外岩样铀、钍含量
Tab. 5 Uranium and thorium content of field rock samples from Jinqiu Gas Field

检测编号	岩矿鉴定定名	Th(10^{-6})	U(10^{-6})
35	蚀变中细粒二长花岗岩	6.16	1.04
36	中细粒二长花岗岩	3.92	0.63
38	蚀变细粒辉长岩	2.03	2.93
39	蚀变黑云斜长片麻岩	4.71	0.83
40	含生屑粉泥晶灰岩	4.90	2.35
41	含有机质粉砂黏土质页岩	14.30	16.30

(2)金秋地区气样氦气含量及氦气来源

根据实测出的金秋气田各取样井气样的³He/⁴He数据与前述幔源氦份额计算公式计算出幔源氦与壳源氦份额(表 6),可明显看出金秋气田的氦气 99% 以上来自壳源,0.n% 来自幔源。

表 6 金秋气田沙溪庙组气样氦同位素数据表
Tab. 6 Helium isotope data of gas samples from Shaximiao Formation, Jinqiu Gas Field

井号	层位	³ He/ ⁴ He (10^{-8})	幔源氦份额 (%)	壳源氦份额 (%)
QL10-H1	沙溪庙组	2.61	0.05	99.95
QL10井	沙溪庙组	2.39	0.04	99.96
QL202-H1	沙溪庙组	3.21	0.11	99.89
QL16井	沙溪庙组	2.62	0.06	99.94
QL 213-8-H1	沙溪庙组	3.34	0.12	99.88
JQ822-8-H1	沙溪庙组	2.46	0.04	99.96
JQ516-6-H2	沙溪庙组	2.26	0.02	99.98
JQ12-6-H1	沙溪庙组	2.45	0.04	99.96

金秋气田的取样层位均为主力产层沙溪庙组,氦气含量普遍较高。各取样井的氦含量也有很大的不同,最高值为 0.13%,最低值为 0.045%,相差约 2 倍以上,平均值为 0.075%(表 7)。

表 7 金秋气田取样井氦气检测数据
Tab. 7 Helium gas detection data from sampling wells in Jinqiu Gas Field

井名	层位	氦气(%)
QL10	沙溪庙组	0.053
QL 10	沙溪庙组	0.054
QL 202-H1	沙溪庙组	0.079
QL 202-H1	沙溪庙组	0.080
QL 206-5-H1	沙溪庙组	0.076
QL 206-5-H1	沙溪庙组	0.076
QL 10-H1	沙溪庙组	0.048
QL 10-H1	沙溪庙组	0.049
QL 16	沙溪庙组	0.045
QL 16	沙溪庙组	0.046
QL 213-8-H1	沙溪庙组	0.128
QL 213-8-H1	沙溪庙组	0.130
JQ823-8-H1	沙溪庙组	0.108
JQ 823-8-H1	沙溪庙组	0.108
JQ 822-8-H1	沙溪庙组	0.064
JQ 822-8-H2	沙溪庙组	0.057
JQ 12-6-H1	沙溪庙组	0.063
JQ 516-6-H2	沙溪庙组	0.086

3 氦气成藏机制

3.1 氦气成因类型

威远气田和金秋气田的氦气 99% 以上来自壳源,0.n% 来自幔源。幔源氦气所占比例太小,其对氦气成藏的贡献率可以忽略不计,但其地质意义不可忽视,虽然极少,但表明有来自幔源的物质进入地壳,提供生烃、热液、深断裂等地质活动的深部背景因素。

3.2 氦气含量特征及氦源岩

3.2.1 威远气田

本次威远气田岩样检测数据显示,威远气田岩样铀、钍含量的总趋势是有机质页岩最高,花岗岩次之,砂岩比花岗岩低(与金秋气田不同,金秋气田砂岩铀、钍含量高于花岗岩)(图 3)。

实测数据显示,威远气田野外岩样 U、Th 含量明显低于基底岩样(图 4),说明由于风化淋失作用,出露地表的基底花岗岩中 U、Th 含量减少,其中 U 的减少量大于 Th 的减少量。

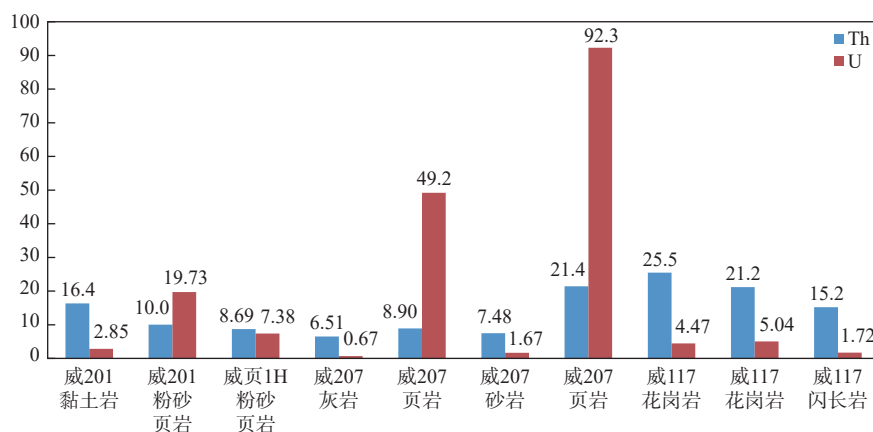


图3 威远气田岩样铀、钍含量柱状图

Fig. 3 Histogram of uranium and thorium content in rock samples from Weiyuan Gas Field

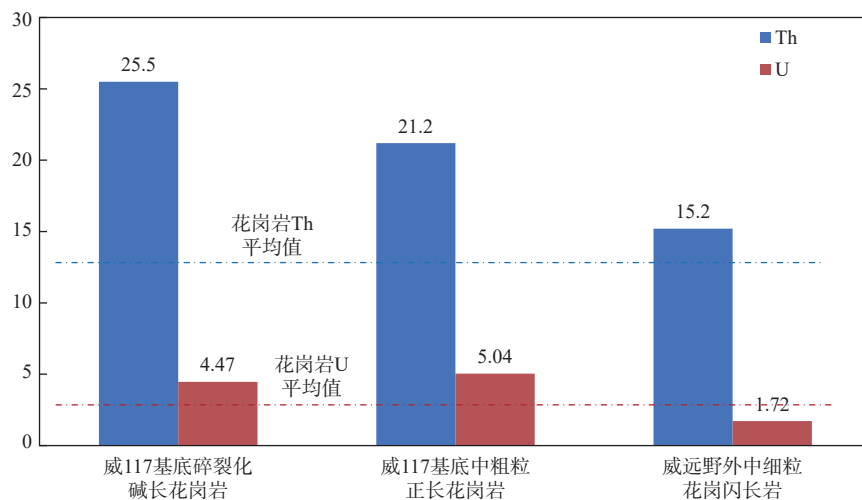


图4 威远气田井下花岗岩与野外花岗岩岩样铀、钍含量对比图

Fig. 4 Comparison of uranium and thorium content between underground granite and field granite samples in Weiyuan Gas Field

根据本次实测数据,结合前人研究,笔者认为威远气田的氦源岩包括:①结晶基底花岗岩。②寒武系筇竹寺组含有有机质页岩。③志留系龙马溪组页岩。页岩中的U、Th含量最高,生氦能力强,但由于其TOC含量高,大量生烃会对氦气产生稀释作用,不利于氦气的富集,对氦气成藏的实际贡献率有待于进一步研究。

3.2.2 金秋气田

本次研究发现,金秋气田的氦源岩共有6套,自下而上分别是:①结晶基底的花岗岩、变质岩、基性岩。②寒武系筇竹寺组页岩。③三叠系须家河组砂岩、泥岩。④侏罗系自流井组泥页岩(含砂岩)。⑤侏罗系凉高山组泥页岩(含砂岩)。⑥侏罗系沙溪庙组砂岩(含泥岩)(表8)。基底尚未有钻井岩心,取到野外露头岩样实测获得U、Th含量数据。侏罗系沙溪庙组作为主力产层,岩心取样最多,根据岩心实测其U、

Th含量值。其他各岩层以测井自然伽马能谱为依据,结合沙溪庙组实测数据,推算出U、Th含量值。

根据放射性衰变原理,对潜在氦源岩的U、Th含量、有效体积、岩石密度和放射性衰变时间进行测定和合理估算,计算出金秋气田内氦气的生成量。不同学者计算的氦气产率有细微差别,但总体影响不大。本文采用BALLENTINE等计算数据,即每年每克铀钍分别产生 $3.32 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $7.71 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 个氦原子,约 $1.21 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ 和 $2.89 \times 10^{-14} \text{ m}^3$ 氦气(陈新军, 2023)。故氦气的生成量公式(式中氦气单位为 m^3)为:

$${}^4\text{He} = 1.21 \times 10^{-13} \times U + 2.89 \times 10^{-14} \times \text{Th} \quad (2)$$

根据该公式及金秋气田氦源岩U、Th含量(表8)计算出各层氦源岩的生氦量(表9)。

金秋气田氦气主要产于侏罗系沙溪庙组,氦气平均含量为0.07%,含量最高的井为0.2%(QL18)。深部

表 8 金秋气田氦源岩 U、Th 含量

Tab. 8 Uranium and thorium content of helium source rocks in Jinqu Gas Field

层位	生氦层岩性	厚度 (m)	岩石密度 (g/cm ³)	U 含量 (10 ⁻⁶)	Th 含量 (10 ⁻⁶)	形成年代 (Ma)
侏罗系沙溪庙组	砂岩 (含泥岩)	1 300	2.50	5	15	154
侏罗系凉高山组	泥页岩 (含砂岩)	100	2.60	7	21	175
侏罗系自流井组	泥页岩 (含砂岩)	200	2.60	7	21	190
三叠系须家河组	泥岩、碳质泥岩	300	2.60	7	21	203
	砂岩	500	2.70	5	15	203
筇竹寺组	页岩	300	2.60	14	6	65
基底	花岗岩、基性岩、变质岩	1 000	2.90	4.10	6.30	65

注：筇竹寺组、基底按喜山运动开始(65 Ma)计算生氦时间。

表 9 金秋气田各层氦源岩生氦量

Tab. 9 Helium production from various layers of helium source rocks in Jinqu Gas Field

层位	生氦层岩性	年产氦 (10 ⁻⁴ m ³)	生氦强度 (10 ⁴ m ³ /km ²)	贡献率 (%)	氦气总量 (10 ⁸ m ³)
侏罗系沙溪庙组	砂岩 (含泥岩)	33.80	52.10	35.5	41.16
侏罗系凉高山组	泥页岩 (含砂岩)	3.78	6.62	4.50	5.23
侏罗系自流井组	泥页岩 (含砂岩)	7.56	14.36	9.76	11.34
三叠系须家河组	泥岩、碳质泥岩	11.34	23.02	15.67	18.19
	砂岩	14.10	28.62	19.46	22.60
筇竹寺组	页岩	14.54	9.45	6.44	7.47
基底	花岗岩、基性岩、 变质岩	19.60	12.74	8.66	10.06
统计		104.72	146.91	99.99	116.05
总生烃强度 (须家河组+侏罗系 凉高山组、自流井组)		21×10 ⁸ m ³ /km ²			
氦丰度		0.069 9%			

探井震旦系灯影组中氦气含量比沙溪庙组低, 约为 0.01%~0.04%。前人研究认为, 沙溪庙组的烃类气体主要来源于须家河组腐殖型烃源岩, 局部地区有大安寨段或凉高山组腐泥型烃源岩的贡献(张本健等, 2022), 氦气只是作为天然气的伴生气而成藏, 故暂时判断沙溪庙组中的氦气主要来自须家河组以上各层氦源岩的贡献, 须家河组以下各层氦源岩对沙溪庙组氦气成藏贡献率较低。

检测了 6 个金秋气田基底野外露头岩样, 岩样中有花岗岩、变质岩(蚀变黑云斜长片麻岩)和基性岩(蚀变细粒辉长岩), 检测后所获得的 U、Th 含量数据与威远气田野外岩样 U、Th 数据对比(图 5), 发现金秋气田岩样 U、Th 含量普遍比威远低。前人研究认为, 野外露头花岗岩中放射性元素经风化淋失作用, 含量普遍比埋于基底的同类岩石降低。威远气田基底花岗岩露头岩样 U、Th 含量比深埋于沉积地层之下的花岗岩基底岩样含量低。由此推测, 金秋气田结晶基底的花岗岩、变质岩中的 U、Th 含量比威远气田

基底要低, 生氦能力弱, 这在一定程度上也解释了为何靠近基底的筇竹寺组地层中氦含量偏低的原因。

本次金秋气田岩心检测最重要的发现是侏罗系沙溪庙组砂岩中的 U、Th 含量普遍高于野外基底花岗岩露头的 U、Th 含量, 也高于前人研究的砂岩 U、Th 含量平均值, 甚至接近页岩的 U、Th 含量平均值(图 6)。

尽管沙溪庙组成岩时间远晚于基底花岗岩, 但厚度大, U、Th 含量高, 生氦能力强, 且不含有机质, 未经生烃稀释作用, 既是源岩, 又是储集岩, 具有自生自储特性, 在沙溪庙氦气成藏中贡献率最大。

3.2.3 U、Th 含量是生氦能力强弱最重要的指标

尽管岩层厚度、存在时间都是影响生氦能力的重要参数, 但最重要的参数是 U、Th 元素的丰度, 丰度高, 生氦能力就强。和所有的矿物一样, 铀、钍矿物的丰度也极不均匀, 在各种类型岩石中都有分布。从各类岩石中铀、钍矿物的本底值到达形成工业矿床的 0.05%, U 元素要富集超过本底值的数百倍, 从预富集到成矿, 岩石中 U、Th 元素的含量变化极大。前人研

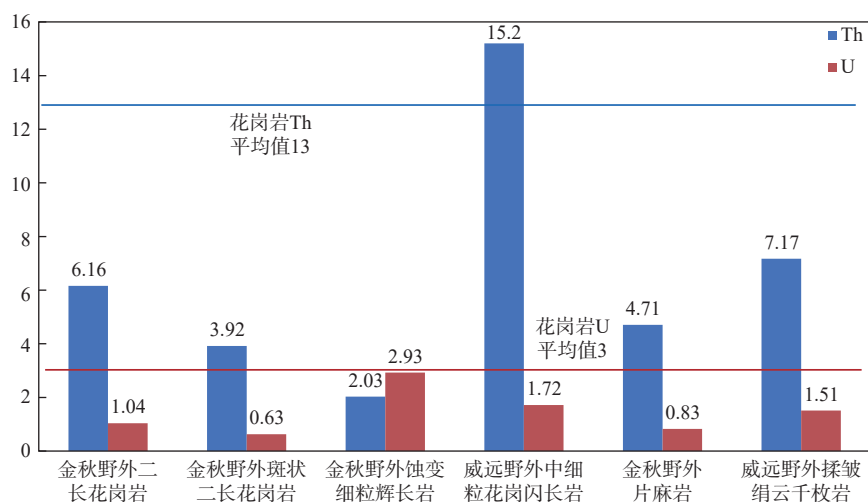


图5 金秋气田与威远气田基底野外露头岩样铀、钍含量对比柱状图

Fig. 5 Comparison bar chart of uranium and thorium content in outcrop rock samples from the basement of Jinqiu and Weiyuan gas fields

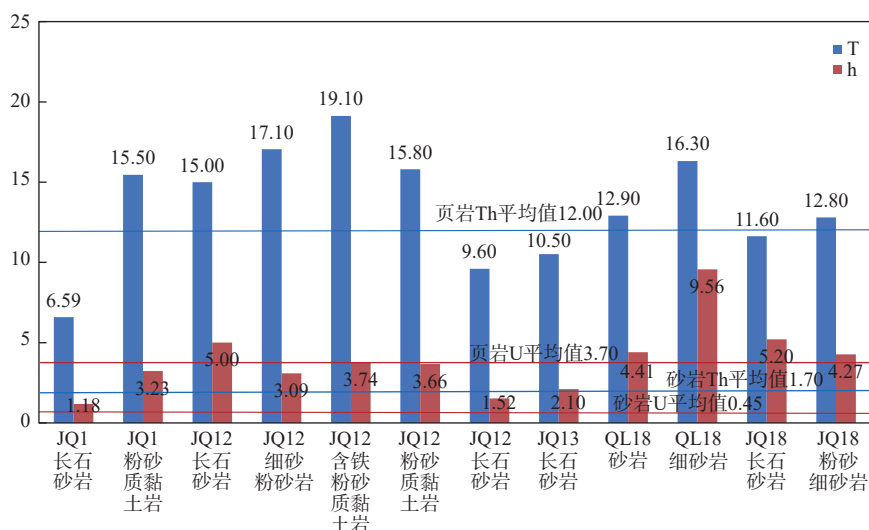


图6 金秋气田沙溪庙组岩样铀、钍含量柱状图

Fig. 6 Histogram of uranium and thorium content in sandstone of Shaximiao Formation, Jinqiu Gas Field

究显示,四川盆地可找到大型、特大型可地浸砂岩型铀矿,仅在盆地内 E 106°以东部分的铀矿普查中,就发现了 3 个矿床,44 个矿点以及近 2 万个铀异常点带(赵安坤等, 2022)。四川盆地地下水中 U 含量也较高,从 E 106°以东近 2 万 km² 放射性水化普查、概查结果来看,就发现了 1221 个水铀异常带,水中铀底数为 1×10⁻⁶ g/L,水中 U 异常含量一般为 5×10⁻⁶ g/L,最高为 1×10⁻³ g/L,放射性水化异常比较分散,但主要分布在侏罗系中,说明地下水中有源源不断的氧化铀补给,利于形成层间氧化带铀矿床。含矿层为侏罗系下沙溪庙组、上沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组(陈德荣等, 2013)。其他研究文献显示,四川盆地个层系各类型

岩石中都有铀矿富集的证据。根据铀矿地质研究的结果,沙溪庙组是重要的成矿岩层,但有些区域的沙溪庙组 U 含量低,有些区域的沙溪庙组 U 含量高。金秋气田的沙溪庙组 U、Th 含量偏高,也在情理之中。沙溪庙组因为是 U 元素的富集层,也就是重要的氦源岩,不同区域的沙溪庙组 U、Th 含量不同,生氦能力不同,其他氦源岩也一样。受铀、钍分布不均匀的影响,同一地层、同一类岩石的生氦能力不同,要依据实测数据予以评估。不能笼统地以某一地层、某一类岩石的 U、Th 平均含量来评估其生氦能力。

3.3 运移通道与富集方式

如前文所述,氦气是先运移进入烃类气体或地层水

中,然后随烃类气体和地层水运移、进入储层中才富集成藏的。因此,烃类气体和地层水的运移通道如断裂、不整合面等,也是氮气的运移通道(高宇等,2025)。天然气成藏分为突发性的幕式成藏和渐进性的连续动态成藏两种模式,幕式成藏的最大特点是快速、高效,运移损失小,并常常具有周期性。按幕式成藏理论,断裂带附近通常是油气运移最集中的部位,因而是大中型油气田形成的主要部位(赵靖舟,2013)。威远气田和金秋气田下部均发育有深大断裂以及受深大断裂影响的走滑断裂系统,是深部油气向上运移的重要通道(宋鸿彪等,1995;谷志东等,2013;管树巍等,2022)。

威远气田的氮气主要来源于结晶基底的花岗岩,氮气必须由下向上运移。而烃类气的来源则素有争议,持有机论看法的认为威远气田震旦系灯影组的烃类气藏来源于其上覆地层寒武系的筇竹寺组烃源岩侧向运移,即所谓“新生古储”“倒灌成藏”(戴金星,2003),按这种解释,威远气藏中的烃类气体和氮气是两个来源,烃类气体是上生下储,侧向运移入圈闭成藏;而氮气则是下生上储,向上运移成藏。携带氮气运移富集的流体被认为是地层水或热液。持油气生成无机论观点的学者认为,威远气田的烃类气体来自深部(张虎权等,2005),按此种理论,威远气田的氮气和烃类气体都来自深部,运移通道为断穿基底的深断裂。

金秋气田的烃类气源来自须家河组以上各组烃源岩,各组同地层的氮源岩所生氮气也有一定的贡献率,以烃类气体为载气运移入沙溪庙组成藏。沙溪庙组本身具有生氮能力,所生成的氮气除逸散部分外,余留部分就地成藏,是沙溪庙组氮气贡献率最高的一部分。沙溪庙下伏各层烃源岩通过侏罗系内部断裂和高渗砂体向储层运移(张本健等,2022)。

3.4 氮气的保存

一般说来,由于氮气是其他天然气藏的伴生气体。因此,天然气藏的保存条件通常也被理解为氮气藏的保存条件,但由于氮气的散逸能力远强于烃类气体的散逸能力,还不能简单笼统地将天然气的保存条件等同于氮气的保存条件,这方面的研究目前还是空白。

研究发现,即便是在同一储集体内,甚至同一气藏之内,储集物性相同,但各口井的氮气浓度差异较大,说明,氮气在烃类气体或其他天然气(CO_2 、 H_2)中的分布浓度是有差异的。

3.4.1 威远气田

威远气田主力产层是灯影组,隐藻白云岩是主要

储层,溶蚀孔隙、成岩变形构造缝洞和构造裂缝发育。由于穿层缝和断层的切割,各层段上相互连通,故气藏有统一的水动力系统。但各取样井的氮气含量却相差较大,最高值为 0.135%,最低值为 0.045%。

前人研究也发现,在其他气田同一气层中,天然气的含氮量有个别异常点,如沙坪坝气田 S4 井 Jt⁵ 气层含氮量是 0.179%,较该气层平均值高 5 倍,川南高寺气田的 Y4 井 Tc² 气层及川东龙潭背斜 L1 井的 Tc² 气层含氮量在 0.13% 以上,比该气层平均值高 2 倍(张子枢,1992)。这种现象比比皆是,研究者们试图用各种成藏要素来解释其成因,但至今尚未有能统一解释各个具体案例的规律性结论。

3.4.2 金秋气田

同样的现象在金秋气田也广泛存在。金秋气田各取样井的氮含量也有很大的不同,最高值为 0.13%,最低值为 0.045%,相差约 2 倍以上(表 7)。

氮气作为天然气的伴生气,不能独立成藏,只能结合主气藏的成藏特征来分析伴生气藏的成藏特征。金秋气田属于岩性气藏,不同地区氮气含量有高低的原因首先是不同井处于不同的砂组中或不同的气藏中;同一砂组中单井氮含量有高低的原因是砂体埋深不同、砂体中含气量不同以及盖层条件不同,岩性气藏的差异聚集导致氮气含量的强非均质性。

虽然可以以不同的砂体、不同的埋深、不同的气藏压力、不同的烃类气体丰度等诸多因素加以解释,但每种解释都可能遇到反例,依据现有数据和资料,尚不能形成规律性的认识。

简言之,在同一储集体中,甚至同一气藏之内,氮气的丰度不同,尚需进一步研究。这种现象也暗示,氮气的保存条件与烃类气体的保存条件有所不同。

3.5 成藏模式

(1)威远气田氮气成藏机制:灯影组氮气主要源于基底花岗岩,以地层水为载体,向上运移入沉积地层成藏,烃类气体由上覆寒武系筇竹寺组生成,上生下储,侧向运移,“倒灌”入灯影组成藏,筇竹寺组本身生成的氮气受烃类气体稀释作用的影响,对氮气成藏贡献率较小。结合各气田实测数据和前人研究,威远气田震旦系的氮气平均含量为 0.28%,主要氮源岩是前震旦系花岗岩,次要的氮源岩是寒武系筇竹寺组泥页岩和震旦系灯四段蓝灰色泥岩,花岗岩中 U、Th 衰变是主要氮气来源(图 7)。

(2)金秋气田氮气成藏机制:金秋气田沙溪庙组

氦气存在多套氦源岩。须家河组以上氦源岩所生氦气伴随同层烃源岩所生烃类气体向上运移进入沙溪庙组, 须家河组以下各层所生氦气通过各种断裂系统

向上运移, 沿途遇具成藏条件的就就地成藏, 进入沙溪庙组的只是一小部分; 沙溪庙组砂岩本身具有较强的生氦能力, 对本层气藏的氦气贡献率最高(图 8)。

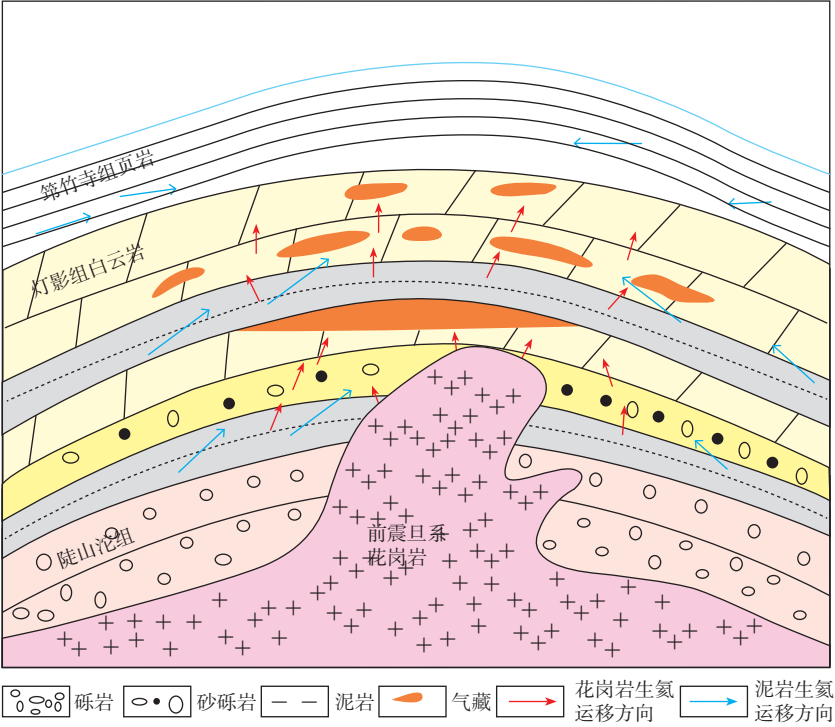


Fig. 7 Helium reservoir formation pattern of Weiyuan Gas Field

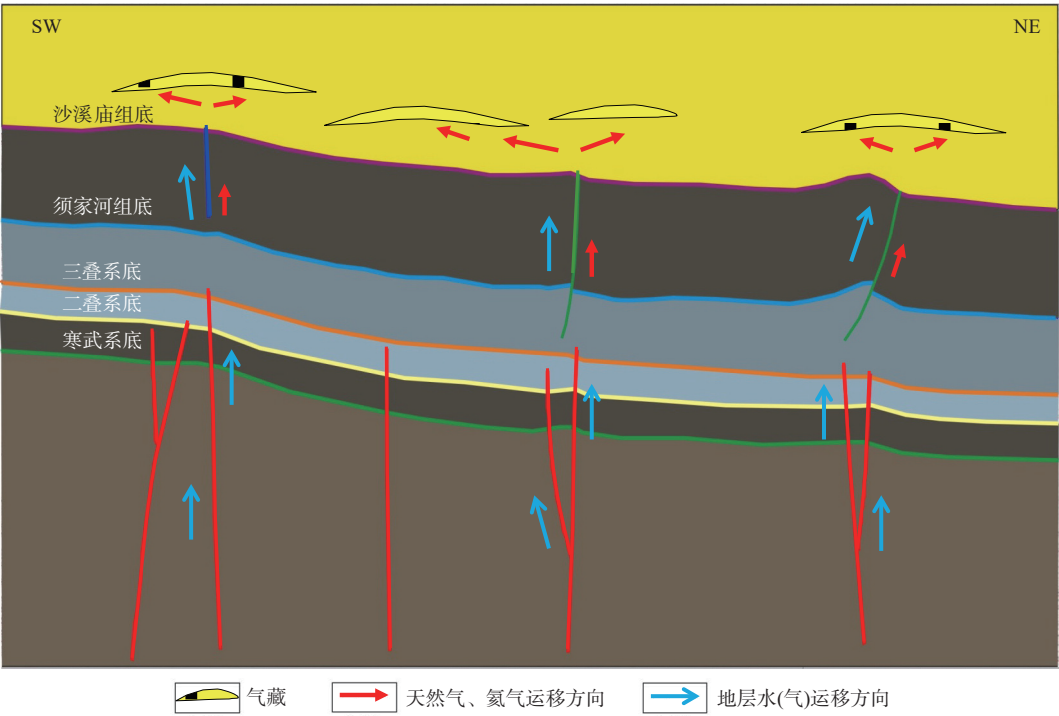


Fig. 8 Helium accumulation pattern of Shaximiao Formation in Jinqu Gas Field

4 结论

(1)岩石中 U、Th 元素的丰度是决定生氦能力的基础,丰度高的生氦能力强,丰度低的生氦能力弱。决定 U、Th 元素分布的是铀、钍成矿过程的不同导致多种类型的岩石都可能富集 U、Th 元素,无论是花岗岩、砂岩还是泥岩、页岩,只要富集了足够的 U、Th 元素,就可以成为氦源岩。根据其 U、Th 元素的丰度,结合成岩时间和含 U、Th 元素岩石体积,可计算出其基础生氦量。金秋气田多套氦源岩中侏罗系沙溪庙组砂岩(含泥岩)的生氦强度最高,为 $52.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,贡献率占 35.5%,氦气总量可达 $41.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2)威远气田和金秋气田的成藏机制有所不同:威远气田主力产层为震旦系灯影组,震旦系氦气平均含量为 0.28%,氦气主要来源于基底花岗岩,以地层水为载体向上运移;金秋气田氦气主要产于侏罗系沙溪庙组,含量最高的井为 0.2%,存在多套氦源岩,沙溪庙组砂岩内源氦气贡献率最高,氦气以烃类气为载体运移,岩性气藏的差异聚集导致氦气含量的强非均质性。

参考文献(References):

- 陈践发,刘凯旋,董勃伟,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.
- 陈德荣,苏远东,赵恒兵,等.四川盆地可地浸砂岩型铀矿区域成矿条件探讨[J].*四川地质学报*, 2013, 33(s1): 47–52.
- CHEN Derong, SU Yuandong, ZHAO Hengbing, et al. Discussion on regional metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone type uranium deposits in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2013, 33(s1): 47–52.
- 陈新军,陈刚,边瑞康,等.四川盆地涪陵页岩气田氦气资源潜力与成因机理[J].*天然气地球科学*, 2023, 34(3): 469–476.
- CHEN Xinjun, CHEN Gang, BIAN Ruikang, et al. The helium resource potential and genesis mechanism in Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(3): 469–476.
- 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. P00L-forming periods and gsa sources of Weiyuan gas-field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(5): 473–480.
- 冯旭亮,汪啸东,罗姣,等.鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景:来自居里面深度的证据[J].*西北地质*, 2025, 58(3): 22–32.
- FENG Xuliang, WANG Xiaodong, LUO Jiao, et al. Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(3): 22–32.
- 高宇,刘全有,朱东亚,等.稀有气体示踪地质流体及氦气富集研究进展[J].*煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 84–95.
- GAO Yu, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. Advances in research on noble gas as tracers of geofluids and helium enrichment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 84–95.
- 谷志东,翟秀芬,江兴福,等.四川盆地威远构造基底花岗岩地球化学特征及其构造环境[J].*地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(S1): 31–42.
- GU Zhidong, ZHAI Xiufen, JIANG Xingfu, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment of basal granite in Weiyuan structure, Sichuan Basin[J]. *Earth Sciences(Journal of China University of Geosciences)*, 2013, 38(S1): 31–42.
- 管树巍,姜华,鲁雪松,等.四川盆地中部走滑断裂系统及其控油作用[J].*石油学报*, 2022, 43(11): 1542–1557.
- GUAN Shuwei, JIANG Hua, LU Xuesong, et al. Strike-slip fault system and its control on oil & gas accumulation in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1542–1557.
- 李玉宏.渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M].北京:地质出版社, 2018: 20–25+204–218.
- 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 Technolog[J]. *Northwestern Geology*, 2022a, 55(4): 1–10.
- 李玉宏,张文,周俊林,等.花岗岩在氦气成藏中的双重作用:氦源与储集[J].*西北地质*, 2022, 55(4): 95–102.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, ZHOU Junlin, et al. Dual Contribution of Granites in Helium Accumulation: Source and Reservoir[J]. *Northwestern Geology*, 2022b, 55(4): 95–102.
- 李云波,王成涛,宋党育,等.我国富氦盆地成藏模式对煤系氦气富集和勘探的启示[J].*煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 22–47.
- LI Yunbo, WANG Chengtao, SONG Dangyu, et al. Implications of helium accumulation models in helium-rich basins in China for the enrichment and exploration of helium in coal measures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 22–47.
- 宋鸿彪,罗志立.四川盆地基底及深部地质结构研究的进展[J].*地学前缘*, 1995, 2(3–4): 231–237.

- SONG Hongbiao, LUO Zhili. The study of the basement and deep geological structures of Sichuan Basin, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 231-237.
- 魏泽坤, 冯旭亮, 马佳月, 等. 鄂尔多斯盆地东南部重磁场特征及其氦气勘探意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 98-110.
- WEI Zekun, FENG Xuliang, MA Jiayue, et al. Characteristics of Gravity and Magnetic Field and their Significance of Helium Resources Exploration in the Southeastern Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 98-110.
- 辛志源, 陈践发, 王杰, 等. 川东南地区不同构造样式页岩气中氦气差异富集机理[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 70-83.
- XIN Zhiyuan, CHEN Jianfa, WANG Jie, et al. Mechanisms underlying differential helium enrichment in shale gas of varying structural styles in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 70-83.
- 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 51-61.
- ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinqu Gas Field of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 51-61.
- 张虎权, 卫平生, 张景廉. 也谈威远气田的气源——与戴金星院士商榷[J]. *天然气工业*, 2005, 25(7): 4-7.
- ZHANG Huquan, WEI Pingsheng, ZHANG Jinglian. About the origin of natural gas in Weiyuan Field: to discuss with academician Dai Jingxing[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(7): 4-7.
- 张宇轩, 吕鹏瑞, 牛亚卓, 等. 全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 11-32.
- ZHANG Yuxuan, LÜ Pengrui, NIU Yazhuo, et al. Preliminary Study on the Geological Characteristics, Resource Potential and Production Capacity Pattern of Global Helium Resource[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 11-32.
- 张健, 张海华, 贺君玲, 等. 东北地区氦气成藏条件与资源前景分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 117-128.
- ZHANG Jian, ZHANG Haihua, HE Junling, et al. Analysis of Helium Accumulation Conditions and Resource Prospect in Northeast China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 117-128.
- 张子枢. 四川盆地天然气中的氦[J]. *天然气地球科学*, 1992, 3(4): 1-8.
- ZHANG Zishu. Helium in natural gas from Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1992, 3(4): 1-8.
- 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氢源岩的含氢-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.
- 赵靖舟. 油气成藏地质学[M]. 北京: 石油地质出版社, 2013: 8-45.
- 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.
- 邹易, 罗情勇, 陈践发, 等. 含氢-富氦气藏氦气竞争溶解物理模拟实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 96-108.
- ZOU Yi, LUO Qingyong, CHEN Jianfa, et al. Physical simulation experiments on competitive dissolution of helium in helium-containing to helium-rich gas reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 96-108.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, USA, 2010.