

四川盆地金秋气田:一个典型以中生界沉积岩 为氦源岩的含氦-富氦气田

张宝收¹,张本健¹,汪华¹,陈践发²,刘凯旋²,豆霜¹,戴鑫¹,陈双玲¹

[1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,四川成都610041;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249]

摘要: 氦气成藏长期以来研究较少,成藏条件与成藏机理还不十分清楚,氦源岩类型和形成条件争议较大。通过解剖含氦-富氦的金秋气田认为:①金秋气田氦气含量主要分布在0.05%~0.10%,平均为0.07%,部分井含量超过0.10%,最高为0.20%。同位素分析认为氦气为壳源成因,没有幔源的贡献。②金秋气田是一个典型以中生界沉积岩为氦源岩的含氦-富氦气田。上三叠统须家河组 and 侏罗系具有较高的铀、钍元素含量和较大的地层厚度,在金秋地区具有较高的氦气生气强度,是形成含氦-富氦气藏的氦源基础。氦气应该主要来源于侏罗系储层,而非上三叠统须家河组烃源岩层系。③金秋气田含氦-富氦气田的形成受3个主要因素控制,具有高氦气生气强度的氦源岩提供了很好的物质基础;具有适度充注强度的烃类气体的存在有利于氦气富集;地层抬升剥蚀温、压下降导致原位溶解氦气脱溶作用是氦气富集的有益补充。

关键词: 充注强度;溶解度;脱溶量;氦气生气强度;氦源岩;氦气;金秋气田;四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

The Jinqiu gas field in the Sichuan Basin: A typical helium-bearing to helium-rich gas field with the Mesozoic sedimentary rocks as helium source rocks

ZHANG Baoshou¹, ZHANG Benjian¹, WANG Hua¹, CHEN Jianfa², LIU Kaixuan², DOU Shuang¹,
DAI Xin¹, CHEN Shuangling¹

[1. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The lack of studies over an extended period leads to an unclear understanding of helium accumulation conditions and mechanisms, along with fierce controversy over the types and formation conditions of helium source rocks. Focusing on the helium-bearing to helium-rich Jinqiu gas field, this study presents the following key findings through detailed analysis: (1) The Jinqiu gas field exhibits a helium content ranging from 0.05% to 0.10% primarily, with an average of 0.07%. In some wells, the helium content exceeds 0.10%, reaching a maximum of 0.20%. Isotope analysis reveals that helium in the gas field originates from the crust, without any contribution from the mantle. (2) The Jinqiu gas field is identified as of a typical helium-bearing to helium-rich type with the Mesozoic sedimentary rocks serving as helium source rocks. Both the Upper Triassic Xujiahe Formation and the Jurassic strata demonstrate high uranium and thorium contents, along with considerable thickness. They exhibit a high helium-generating intensity in the Jinqiu area, serving as helium source rock basis for the formation of helium-bearing to helium-rich gas reservoirs. Helium is presumed to primarily originate from the Jurassic reservoirs rather than the hydrocarbon source rock sequence of the Upper Triassic Xujiahe Formation. (3) The formation of the Jinqiu gas field is primarily under three factors. First, helium source rocks with a high helium-generating intensity act as a sound material basis. Second, the presence of hydrocarbon gases with a moderate charging intensity contributes to helium enrichment. Last, the uplift and erosion of strata, accompanied by a decrease in temperature and pressure, result in the exsolution of in-situ dissolved helium,

收稿日期:2023-07-27;修回日期:2023-12-05。

第一作者简介:张宝收(1976—),男,高级工程师,油气成藏、油气资源评价与氦气成藏机理。E-mail: zhangbaos-tlm@petrochina.com.cn。

基金项目:中石油“十四五”油气资源评价课题(2023YQX20112)。

conducive to helium gas enrichment.

Key words: charging intensity, solubility, exsolution amount, helium-generating intensity, helium source rock, helium gas, Jinqu gas field, Sichuan Basin

引用格式: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氦-富氦气田[J].石油与天然气地质,2024,45(1):185-199. DOI:10.11743/ogg20240113.

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. DOI: 10.11743/ogg20240113.

氦气是极其重要的稀缺性战略资源,其低沸点、高比热容和化学惰性等优良特质,使得其在国防科工和高科技领域具有不可替代的重要作用^[1]。氦气可以通过天然气分离法、合成氨法、空气法及铀矿石法等获得^[2],但从含氦-富氦天然气中提取氦气是目前工业化制氦的唯一途径^[1,3],天然气中氦含量越高提氦成本越低。四川盆地气藏普遍含氦,在2020年之前是中国唯一进行过工业提氦的含油气盆地。但单井氦气含量数据分析显示,四川盆地以贫氦为主,氦气含量主体分布区间为0.01%~0.05%;储量区块氦气平均含量大于0.10%的大、中型气田目前只有威远气田和卧龙河气田。随着威远富氦气田天然气资源的日渐枯竭^[4],在四川盆地内寻找可供替代的富氦气藏迫在眉睫。近期普查发现,金秋气田部分样品氦气含量大于0.10%,有望成为继威远气田之后四川盆地提氦的接替领域。

由于氦气藏发现少,又作为烃类等天然气藏的伴生气产出,长期以来将氦气作为独立资源勘探的研究甚少;近年来,虽然相关的研究逐渐增多,但对氦气成藏的特殊性认识依然有限^[2]。氦源岩是氦气资源评价和勘探中的关键研究内容之一,目前的研究还很薄弱,认识存在很大分歧。关于盆地基底花岗岩可作为富氦天然气藏的有效氦源岩,目前已达成共识^[5-15],但对于烃源岩(一般铀、钍元素含量很高)能否作为富氦气藏的氦源岩还存在争议^[4,11,16-21],而对于烃源岩之外的沉积岩,特别是较年轻的沉积岩作为富氦气藏的氦源岩,普遍持否定或怀疑态度^[1,7,22-30],张弛等调研后认为“目前发表的论文中尚未见到以沉积岩作为主力氦源的认识”^[31]。本文通过对金秋气田含氦-富氦气藏的剖析,明确了其氦源岩为中生界沉积岩(上三叠统须家河组-侏罗系,主要是侏罗系),为较年轻的沉积岩可作为富氦气藏的氦源岩提供了确凿的实例。同时,对金秋气田含氦-富氦气藏的成藏主控因素进行了分析,以期包括四川盆地在内的广大含油气盆地的氦气研究提供借鉴。

1 地质背景

四川盆地属扬子准地台四川台坳,处于古扬子板块的西缘,是基于上扬子克拉通发展起来的多旋回叠合盆地^[32]。从构造上可将四川盆地分为川西低陡褶皱带、川北低平褶皱带、川中平缓褶皱带、川西南低陡褶皱带、川南低陡褶皱带和川东高陡褶皱带(图1)。金秋气田位于川中平缓褶皱带和川北低平褶皱带的过渡区域(图1)。所在区域自中三叠世以来受印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动影响,在东西向区域应力背景和川中稳定基底的制约下,构造形变相对较弱,形成一系列低缓局部构造^[33]。

金秋气田的目的层为中侏罗统沙溪庙组,厚度在1 000~1 500 m,主要为一套巨厚的陆相碎屑岩地层,岩性以紫红色泥岩夹灰绿色粉砂岩和砂岩为主(图2),中、上部为河流相,底部发育少量三角洲-湖泊交替相沉积。沙溪庙组内部,又以“叶肢介页岩”之顶为分层标志,进一步划分为沙溪庙组一段(沙一段)和沙溪庙组二段(沙二段)。自下而上可将沙溪庙组内部砂体划分为23期河道砂组,其中沙一段有5期(自下而上依次编号为1号—5号砂组),沙二段有18期(自下而上依次编号为6号—23号砂组)。目前已证实沙溪庙组纵向上有10期河道砂组含气,其中金秋气田提交储量和生产采气的主要为沙二段的6号—9号砂组。

金秋气田沙溪庙组砂岩孔隙度和渗透率整体偏低,属于低孔、特低渗储集层^[33]。气藏受优质河道砂体分布控制,属于岩性气藏,已提交探明储量约 $1\,000\times 10^8\text{ m}^3$ ^[33]。金秋气田主要产出天然气,微含凝析油,凝析油含量在 $16\sim 35\text{ cm}^3/\text{m}^3$;天然气相对密度分布在 $0.590\sim 0.789$,甲烷含量为 $88.45\%\sim 92.77\%$,乙烷含量为 $4.87\%\sim 6.86\%$,不含硫化氢。目前气田整体范围内测试及生产采气均未产水。现有研究表明,金秋气田天然气主要来源于上三叠统须家河组煤系腐殖型烃源岩,局部地区存在下侏罗统大安寨段和凉高山

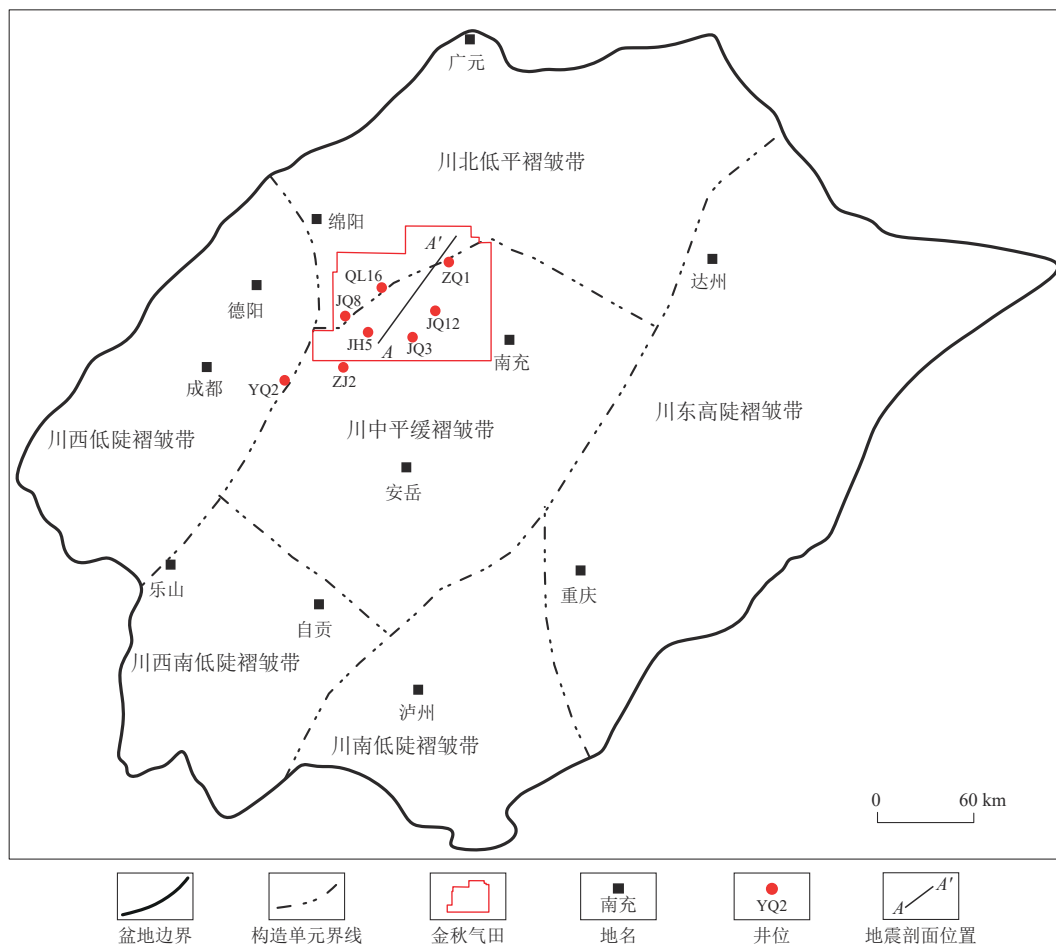


图1 四川盆地构造区划及金秋气田位置

Fig. 1 Map showing the structural regionalization of the Sichuan Basin and the location of the Jinqu gas field

组腐泥型烃源岩的贡献(图2)^[33-34]。实测地层压力系数为0.32~1.17,属于低压-常压气藏。气藏压力总体具有西高东低的特征,但不同砂组压力变化很大:其中6号砂组压力系数在0.47~0.96,属于低压-常压气藏;7号砂组压力系数在0.46~0.47,属于低压气藏;8号砂组压力系数在0.52~1.19,属于低压-常压气藏;9号砂组压力系数在0.76~0.84,属于低压气藏。

2 氮气分布特征

关于根据氮气含量对气藏进行分类,目前还没有统一的标准。徐永昌等提出氮气工业开采品位为氮气含量在0.05%~0.10%^[35]。国家标准《天然气藏分类》(GB/T 26979—2011)中,将天然气组分中氮气含量达到0.10%及以上的称为含氮气藏。戴金星等将氮气含量在0.05%~0.15%的称为含氮气田,氮气含量0.15%~0.50%的称为富氮气藏,氮气含量 $\geq 0.50\%$ 的称为特富氮气藏^[36]。“十四五”全国油气资源评价

(2023)将氮气含量 $\geq 0.30\%$ 的称为富氮气藏,0.10%~0.30%的称为高氮气藏,0.03%~0.10%的称为中氮气藏。因此,本研究认为,氮气含量在0.03%~0.05%以上的可称为“含氮气藏”,在0.10%~0.15%以上的可称为“富氮气藏”。

从已发表资料及本研究测试结果看,四川盆地上三叠统-侏罗系陆相致密砂岩气藏天然气中氮气含量整体偏低,仅最新发现的金秋气田部分天然气可称之为含氮-富氮气藏(图3)。金秋气田天然气中氮气含量分布范围为0.02%~0.20%,平均值0.07%(图3),主体分布在0.05%~0.10%,部分样品超过0.10%(图4)。

平面上,金秋气田沙溪庙组气藏氮气含量高、低间互出现,规律性似乎不是很强,但仔细观察,大体上具有西低东高的趋势(图4)。其中西部JQ8井区氮气含量最低,基本小于0.05%;中部氮气含量变化范围较大,为0.03%~0.20%,但大部分分布在0.05%~0.10%;东部氮气含量高值相对增多,最高可达0.20%(图4)。

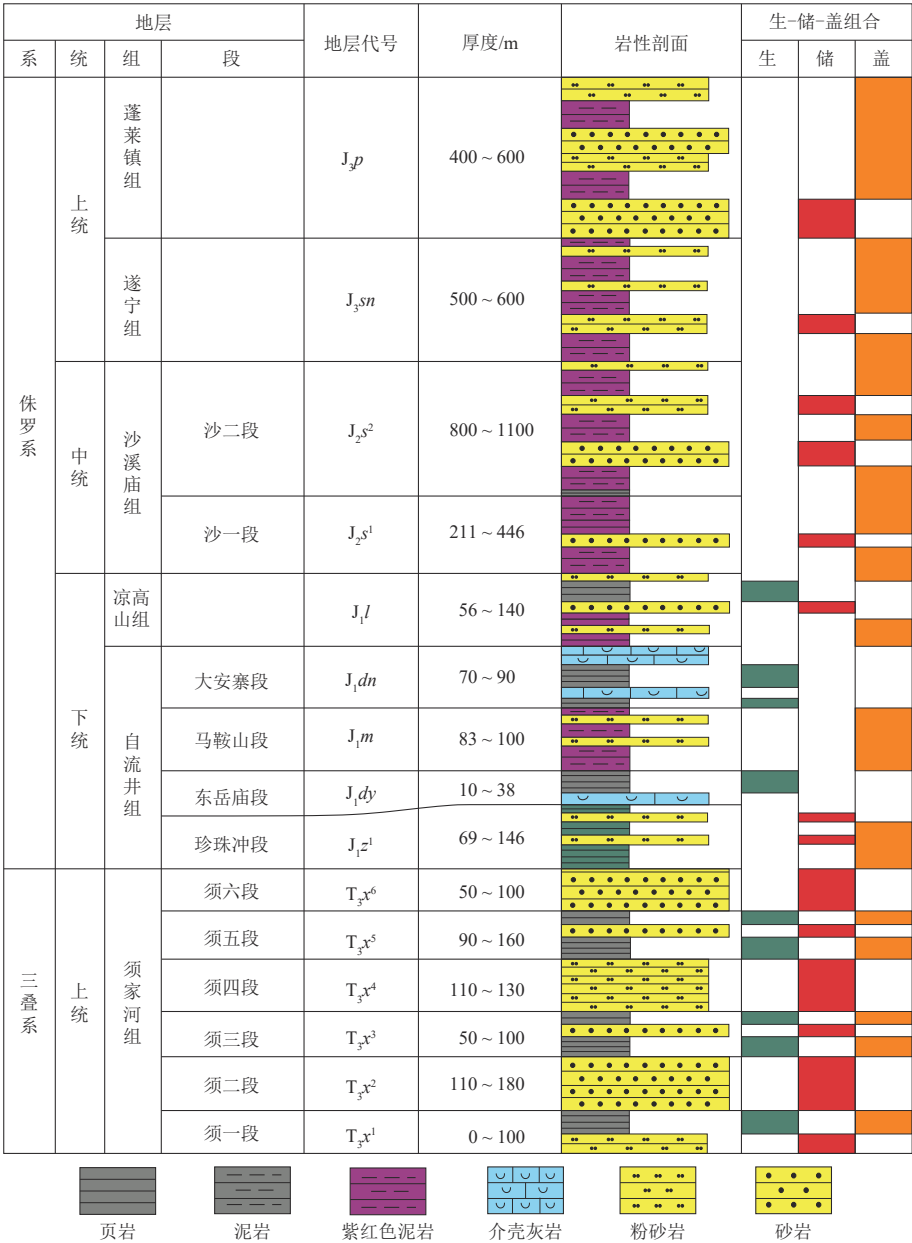


图2 四川盆地上三叠统-侏罗系地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Upper Triassic-Jurassic strata in the Sichuan Basin

3 氦气来源

3.1 氦气为壳源成因

地壳中的氦气有大气源、壳源(放射性成因)和幔源3种,在目前已发现的富氦(He)天然气藏中,绝大多数以壳源氦贡献为主,以幔源氦气贡献为主的气藏不多,而天然气藏中的大气氦含量较少,往往可忽略不计^[1]。天然气中稀有气体同位素比值是鉴别氦气来源的有效指标,常用的有³He/⁴He, ⁴He/²⁰Ne和⁴⁰Ar/³⁶Ar^[40]。

包括金秋气田在内的四川盆地三叠系-侏罗系致密砂岩气藏具有明显的壳源放射性成因氦特征,没有幔源贡献(图5)。

3.2 氦气来源于须家河组-侏罗系本身,与基底和震旦系一中三叠统老地层无关

3.2.1 深大断裂证据

四川盆地是在上扬子前寒武纪克拉通基底上发展起来的叠合沉积盆地,经历了震旦纪一中三叠世克拉通坳陷盆地、晚三叠世一白垩纪前陆盆地、新生代构造

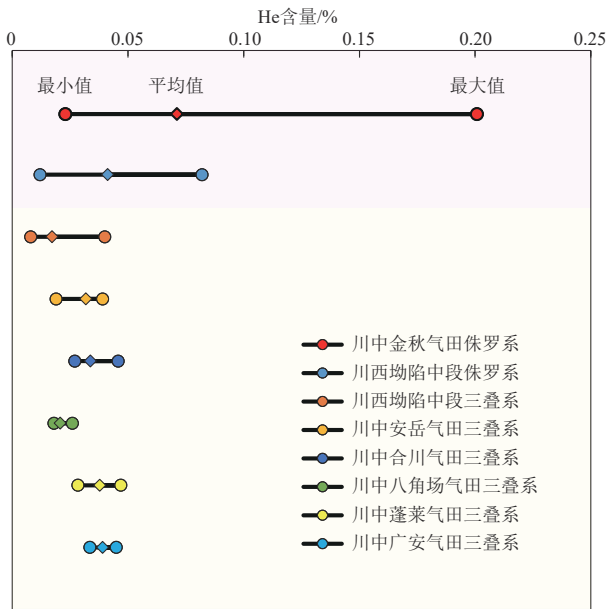


图3 四川盆地上三叠统-侏罗系致密砂岩气藏氦气含量对比
(金秋气田数据来自本文,其他数据来自文献[37-39])

Fig. 3 Comparison of helium contents in the Upper Triassic-Jurassic tight sandstone gas reservoirs of the Sichuan Basin
(data of the Jinqu gas field based on this study, and others from references [37-39])

变形与定型三大演化阶段^[32],沉积了震旦系一中三叠统海相地层和上三叠统一第四系陆相地层^[44]。根据晚三叠世以来周缘造山带在时间与空间上的演化规律,可将现今四川盆地的断裂体系划分为6个断裂系统,其中金秋气田位于川中燕山期一喜马拉雅期走滑断裂系统内^[45]。

四川盆地中部存在基底断裂,但多数断裂的断层落差及在上覆地层中产生的变形、变位并不明显,在地震剖面上难以识别,但可根据航磁和深源地球物理信息进行综合识别^[46]。综合来看,自上而下可将川中地区的断裂发育层位划分为上、中、下3个构造变形层(图6)。须家河组及以上为上构造变形层,中三叠统雷口坡组和嘉陵江组为中构造变形层,下三叠统及以下为下构造变形层。在下构造变形层,断裂以高角度的单断裂为主,向下可断至基底,向上西部多断至上二叠统龙潭组或下三叠统飞仙关组底界,东部多断至嘉陵江组-雷口坡组膏盐岩层底界^[47]。在中构造变形层,由于嘉陵江组-雷口坡组发育巨厚(厚度500~1000 m)的局限台地-蒸发台地相膏盐岩层,为非能干层,在深层走滑断裂后期活动时,在其内形成一系列伴生构造,在川中地区主要为规模较小的雁列断层^[47]。并且,在川中古隆起高部位的磨溪地区,中构造变形层内的伴生构造位于深部走滑断裂的正上方;而在金秋

气田所在的川中古隆起北斜坡地区,伴生构造发育在深部2条主干走滑断裂带之间^[45,47]。因此,在广大川中地区,断至基底的深大断裂向上没有突破中三叠统嘉陵江组-雷口坡组膏盐岩非能干层。

在上构造变形层,目前识别出的断裂规模均较小。断至沙二段的断裂多数为向下刚断穿沙溪庙组底界的正断层,少数为向下仅断至须家河组底界的逆断层。上三叠统须家河组-侏罗系的致密砂岩气,是靠断裂与多组砂体形成的多类型断-砂组合构成的立体运移通道,呈立体辐射状运聚成藏^[48]。

因此,金秋气田地区上、中和下构造变形层内的断裂系统都是自成体系的,深部的深大断裂最浅断至二叠系,没有断至上三叠统须家河组-侏罗系(图6)。

3.2.2 烃气气源对比证据

四川盆地是一个经历多期次构造运动的大型叠合含油气盆地,油气勘探开发历史悠久,油气资源十分丰富,是一个“超级富气盆地”^[49-50]。这得益于其良好的油气成藏条件,其中非常重要的一项条件就是多套广覆式分布的烃源岩为油气成藏奠定了坚实的基础。四川盆地在震旦系结晶和变质基底基础上沉积了巨厚的震旦系一中三叠统海相和上三叠统一第四系陆相地层,沉积盖层总厚度达6000~12000 m。自下而上,发育下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组、中二叠统、上二叠统龙潭组、上三叠统须家河组和下侏罗统等6套区域分布的主力烃源岩^[51],以及上震旦统灯影组、中-上寒武统、下三叠统飞仙关组、下三叠统嘉陵江组和中三叠统雷口坡组等5套局部地区发育的非主力烃源岩^[52]。

四川盆地目前已发现31套工业含油气层系,但不同地区不同层系的油气藏其油气来源不同。在不同油气藏的油气源对比和主力烃源岩确定方面,前人已做了大量工作。王兰生等通过油气源对比及含油气系统理论分析,将四川盆地油气自下而上划分为震旦系-寒武系、志留系-石炭系、二叠系-中、下三叠统和上三叠统-侏罗系4个巨型含油气系统^[53]。朱光有等通过四川盆地沉积演化背景的有效烃源岩的分布,分区域确定了各区块各含气层系的主力烃源岩,川东主力产层石炭系、三叠系和二叠系的气源分别为志留系、上二叠统龙潭组和下二叠统烃源岩;川南气区震旦系灯影组、寒武系、二叠系和三叠系产层的气源分别主要来自下寒武统和上-下二叠统源岩;川西气区侏罗系和三叠系须家河组产层的气源主要来自三叠系须家河组煤系烃源岩,下二叠统和嘉陵江组产层气源则可

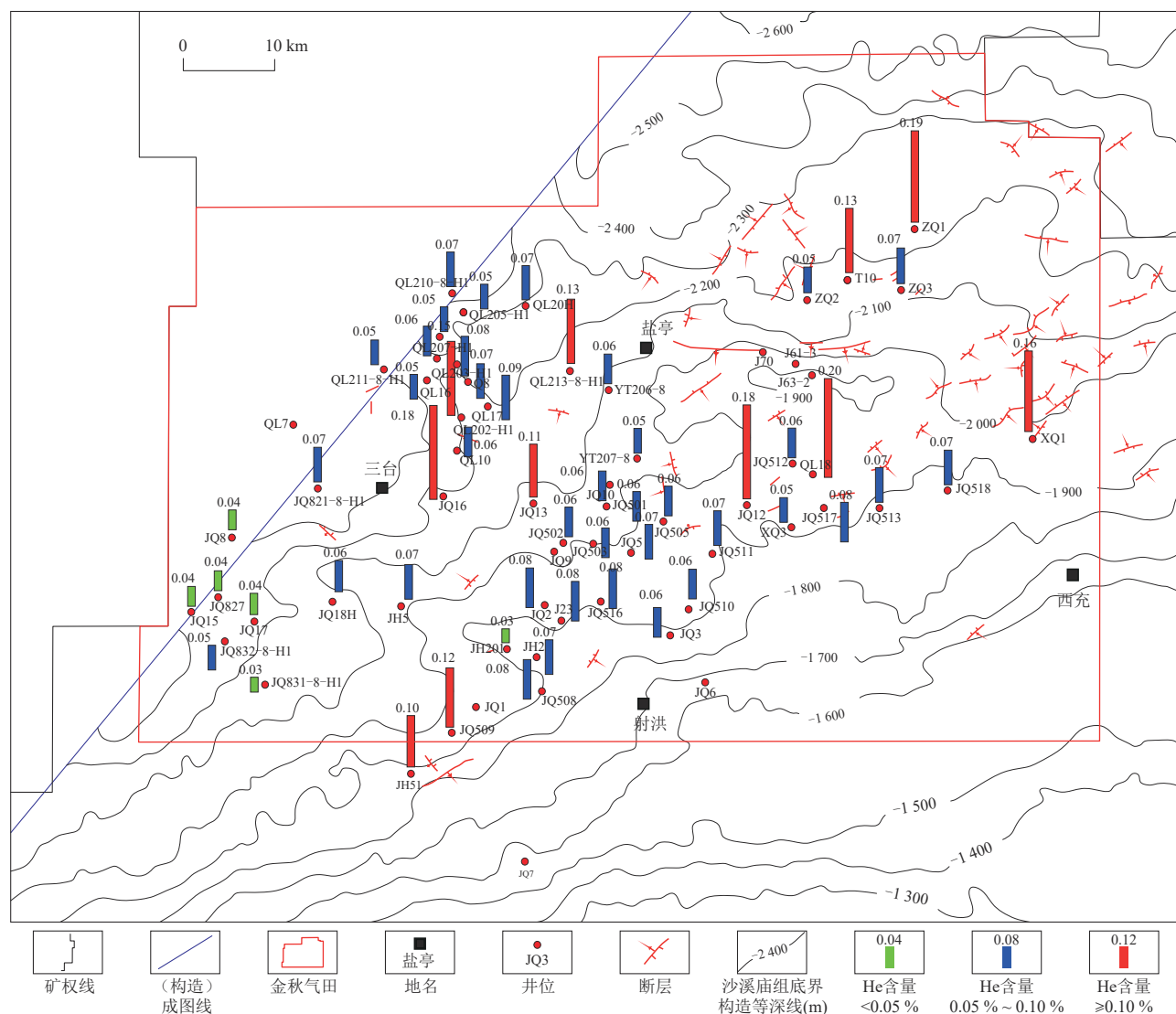


图4 金秋气田沙溪庙组气藏氦气含量平面分布

Fig. 4 Planar distribution of helium content in the Shaximiao Formation gas reservoir, Jinqu gas field

能主要来自二叠系;川中、下侏罗统自流井组原油应来自侏罗系源岩,浅部层系天然气来自上三叠统须家河组的陆相烃源岩,深部气藏(中三叠统及以下)则来源于寒武系烃源岩^[54]。谢增业等通过天然气组分及碳氢同位素分析,认为川中隆起带不同层系油气藏其主力烃源岩不同:寒武系气藏来自于筇竹寺组烃源岩;GS19井栖霞组气藏来自龙马溪组烃源岩;灯影组和其他二叠系(茅口组、玄武岩组和长兴组)气藏来自于双源贡献,除均有筇竹寺组烃源岩贡献外,分别还有震旦系烃源岩和二叠系烃源岩的贡献^[55]。

关于上三叠统须家河组和侏罗系致密砂岩气(部分含少量凝析油)的油气来源,前人也做了大量工作^[56-62];最新研究认为,四川盆地陆相(须家河组-侏罗系)致密气气源主要来自上三叠统须家河组和侏罗系自身烃源岩的贡献,只有川东和蜀南地区存在海相气

源供给的可能性^[48]。具体到本文的研究区金秋气田,研究认为沙二段天然气主要来源于须家河组烃源岩,局部地区有侏罗系大安寨段或凉高山组腐泥型烃源岩的贡献^[33]。相邻中石化矿权区的中江气田,沙溪庙组的油气也认为是来源于须家河组和下侏罗统烃源岩的混源贡献^[63]。

因此,已发现气藏的气源对比结果表明,中三叠统雷口坡组和上三叠统须家河组之间的界面是四川盆地一个非常重要的界面,该界面之下为海相油气系统,之上为陆相油气系统。该界面之下的海相油气系统,发育多套烃源岩和储-盖组合,部分气藏的气源对比结果为混源,天然气来源和充注过程十分复杂,但均没有突破该界面进入到上面的陆相地层聚集成藏。该界面之上的上三叠统须家河组-侏罗系油气自成系统,没有下面老地层的贡献。

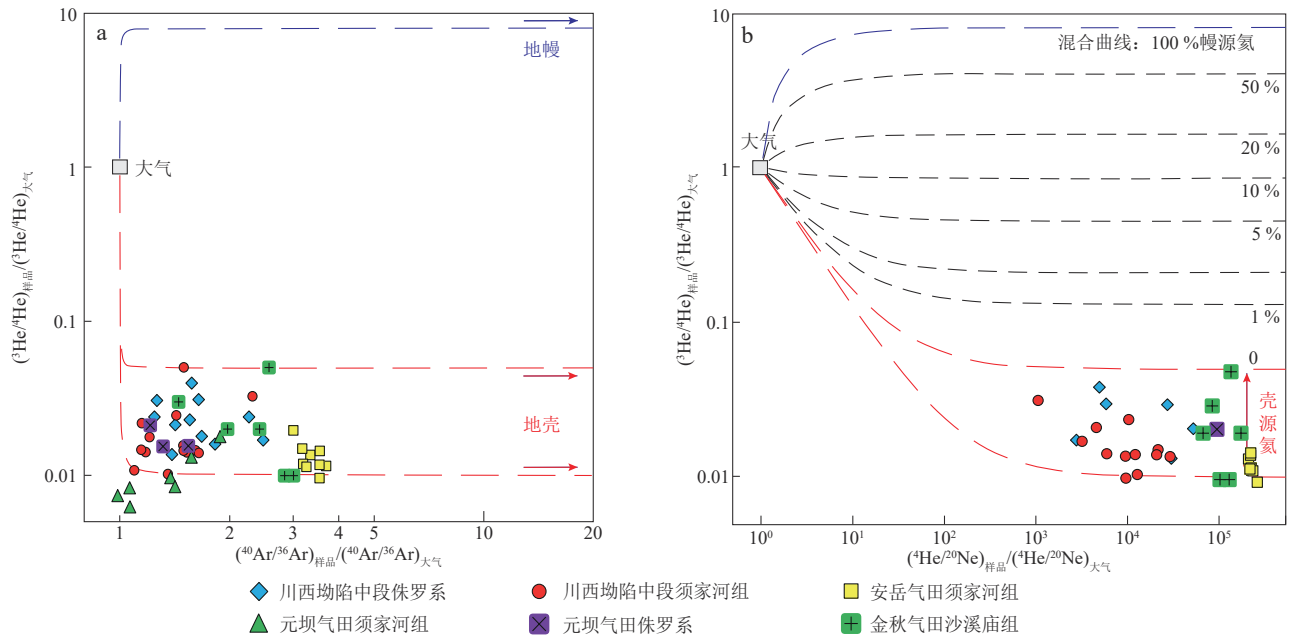


图5 四川盆地上三叠统-侏罗系致密砂岩气藏氮气来源判别图
(底图据文献[38], 金秋气田数据来自本文, 其他数据来自文献[37, 41-43])

Fig. 5 Identification plots for the helium gas sources of the Upper Triassic-Jurassic tight sandstone gas reservoirs in the Sichuan Basin (base map from reference [38], data of the Jinqu gas field based on this study, and other data from references [37, 41-43])

a. 天然气同位素比值 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 关系; b. 天然气同位素比值 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系

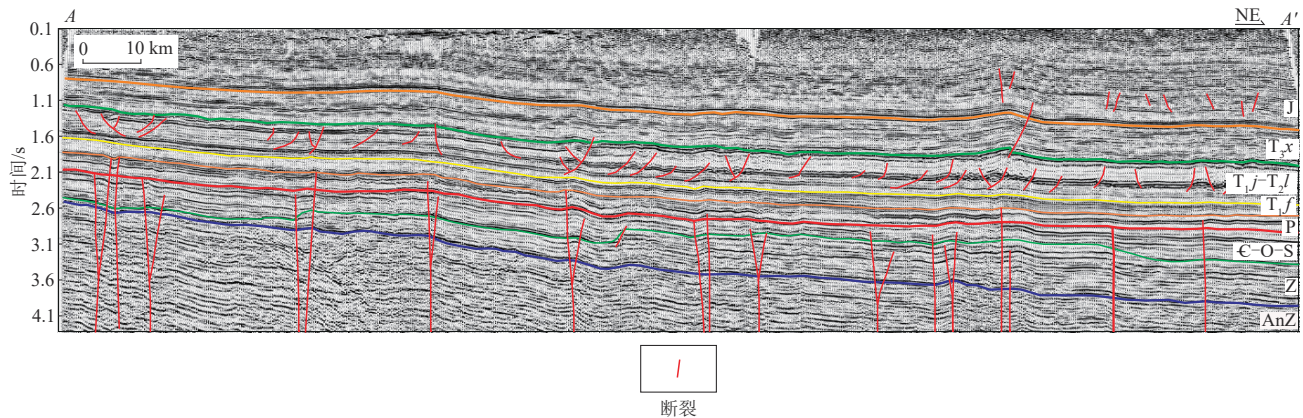


图6 金秋地区断裂地震解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 Seismic interpretation profile of faults in the Jinqu area (see Fig. 1 for the profile location)

J. 侏罗系; T_{3x} . 上三叠统须家河组; $T_{1j}-T_{2j}$. 下三叠统嘉陵江组-中三叠统雷口坡组; T_{1f} . 下三叠统飞仙关组; P. 二叠系; C-O-S. 寒武系-奥陶系-志留系; Z. 震旦系; AnZ. 前震旦系

氮气从母源矿物中释放出来后必须要依靠地层孔隙中的流体(地层水和其他天然气流)进行二次运移^[5,7,29,64-67]。因为氮气为“弱源气”,不存在集中生气高峰,难以发生突破“压力封存箱”的大规模集中排气形成气柱,进而在浮力驱动下进入圈闭形成氮气藏^[66],因此,单靠呈弥散状态的氮气分子垂向扩散运移,不足以形成大型的富氮天然气藏^[29],这可能也是至今尚未发现纯氮气藏的主要原因。因此,既然金秋

气田的燃气是来源于上三叠统须家河组-侏罗系烃源岩,没有深部老地层流体的混入,那么,与其伴生的氮气(从天然气勘探的角度看是“伴生”,从氮气成藏的角度看是“寄生”)应该也只可能来源于须家河组及以上地层,而不可能来源于须家河组以下的老地层。当然,不排除可能会有以分子扩散方式从深部老地层运移上来的部分氮气,但其量应该十分有限,对探讨的“含氮-富氮气藏”来讲,可以忽略不计。

3.2.3 上三叠统须家河组-侏罗系氦气生气强度证据

如果金秋气田的氦气来源于上三叠统须家河组-侏罗系,该套地层是否具备形成含氦-富氦气藏的氦源基础?本次研究认为,答案是肯定的。

壳源放射性氦气是由地壳中铀(U)、钍(Th)等放射性元素(主要是 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th)衰变产生的 ^4He 。每种元素衰变的半衰期是一定的,即每种元素产生 ^4He 的速率是一定的。因此,氦气的生成量与氦源岩中铀钍的含量、氦源岩体积和衰变时间有关,而氦源岩的体积等于氦源岩的分布面积乘以其厚度。因此,如果仿照烃类“生烃强度”的概念提出“氦气生气强度”概念,则氦气生气强度与氦源岩中铀/钍元素的含量、单位铀/钍单位时间的生氦速率、氦源岩的厚度、氦源岩的密度以及衰变时间(一般为氦源岩沉积至今的时间)有关。本研究利用已获得中国发明专利受理并通过初步审查的技术(申请号:202310306951.0)绘制了四川盆地上三叠统须家河组和侏罗系2套地层的氦气生气强度图(图7)。由图可见,在须家河组氦气生气强度图上,金秋气田地区西北部为氦气生气强度高值区,氦气生气强度大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$;在侏罗系的氦气生气强度图上,金秋气田全区均位于氦气生气强度高值区,氦气生气强度为 $(60 \sim 85) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具备形成含氦-富氦气藏的氦源基础。

上三叠统须家河组-侏罗系之所以具有较高的氦

气生气强度,得益于2项有利条件:①具有较高的铀/钍元素含量,特别是钍含量较高。由靠近金秋气田地区钻揭地层较全的ZJ2井(井位见图1)实测铀/钍含量(图8)可见,上三叠统须家河组-侏罗系与下部二叠系-中三叠统(茅口组-雷口坡组)相比,上三叠统须家河组-侏罗系U的平均含量为 3.10×10^{-6} ,和下面的二叠系-中三叠统差不多(平均值 3.09×10^{-6}),但上三叠统须家河组-侏罗系Th的平均含量为 8.86×10^{-6} ,比下面的二叠系-中三叠统高得多(平均值 3.04×10^{-6})。因此,金秋气田地区上三叠统须家河-侏罗系具有更雄厚的壳源氦气形成的母质基础。②上三叠统须家河组-侏罗系具有较大的地层厚度,即便以主力产层沙二段计,也比其他各气藏所在的层段具有更大的厚度(图8)。因此,虽然上三叠统须家河组-侏罗系较年轻,即具有相对较短的衰变时间,但铀/钍含量、地层厚度及衰变时间(地层密度相差不大,不再比较)三者耦合后,还是具有较大的氦气生气强度,为形成含氦-富氦气藏提供了较为坚实的氦源基础。

3.3 氦气最有可能来源于储层所在的侏罗系氦源岩

前面已论证金秋气田氦气来源于上三叠统须家河组-侏罗系,但是以烃源岩所在的上三叠统须家河组来源为主,还是以储层所在的侏罗系(沙溪庙组)来源为主,目前文献中还没有有效的办法对类似情况加以详细区分。下面从2套地层的氦气生气强度变化规律与氦气含量平面变化的匹配性方面尝试加以区分。

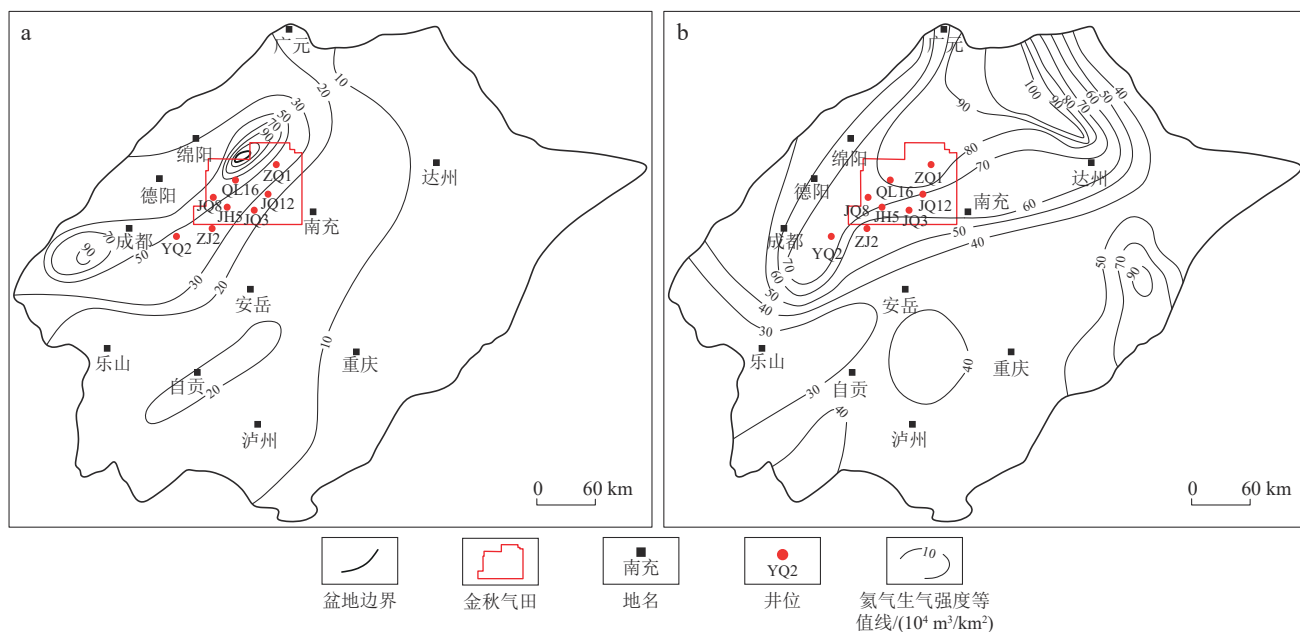


图7 四川盆地上三叠统须家河组(a)和侏罗系(b)氦气生气强度

Fig. 7 Helium gas-generating intensities of the Upper Triassic Xujiahe Formation (a) and the Jurassic strata (b) in the Sichuan Basin

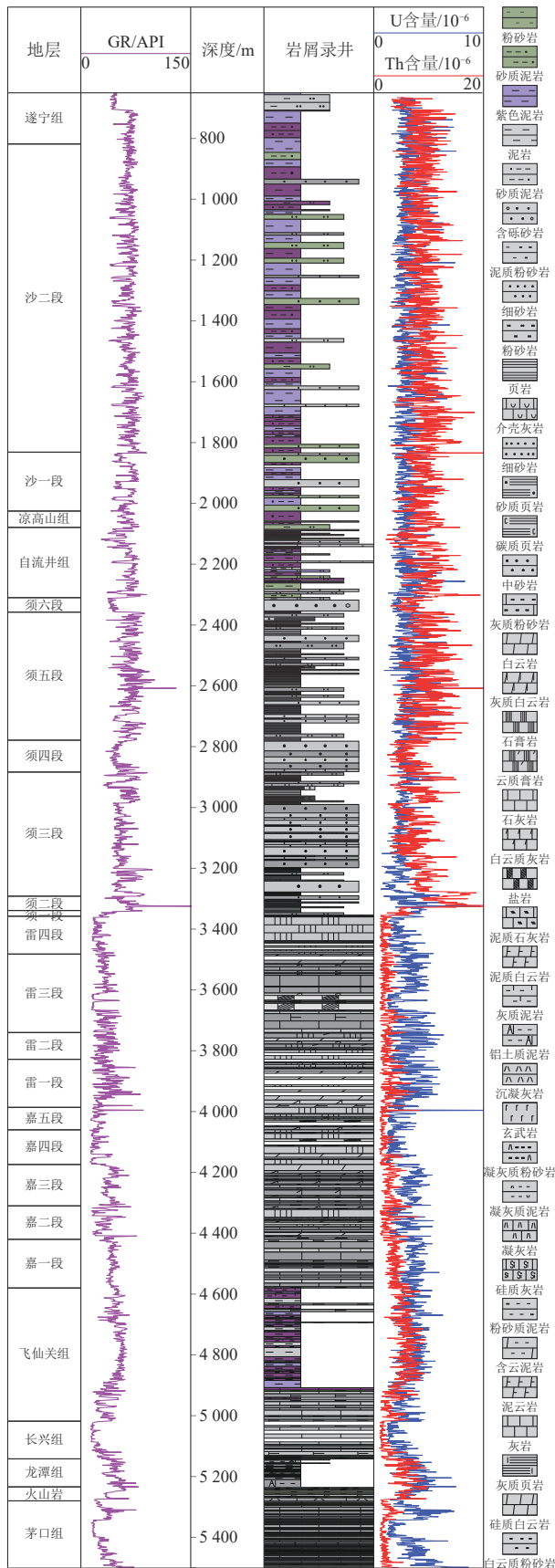


图8 四川盆地ZJ2井二叠系-侏罗系铀、钍元素含量

Fig. 8 Stratigraphic column showing the uranium and thorium contents of the Permian-Jurassic strata in well ZJ2, Sichuan Basin

在上三叠统须家河组氮气生气强度图上,金秋气田只有西北部氮气生气强度较大($>50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$),而东南部氮气生气强度较小,至东南角甚至低至 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以下;并且,从西北向东南是规律性减小的。这与金秋气田氮气含量平面分布规律(图4)严重不符,金秋气田氮气含量没有从西北向东南系统性变低趋势。而在储层所在的侏罗系氮气生气强度图上,金秋气田均位于氮气生气强度高值区,且氮气生气强度变化幅度不大,处于 $(60 \sim 85) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。这能更好地解释金秋气田目前的氮气含量平面分布规律,即,既形成了含氮-富氮气藏,平面上氮气含量又没有太明显的变化规律。至于单井含氮量高低间互出现的原因,还与烃气的充注强度有关,详见下文论述。

因此,从金秋气田氮气含量平面分布规律与氮气生气强度平面变化规律的匹配性方面分析,金秋气田氮气应该主要来源于储层段所在的侏罗系。

4 氮气成藏主控因素

4.1 高氮气生气强度的氮源岩是基础条件

1962年胡朝元等人总结出松辽盆地生油区控制油气田的规律,即由于油气运移距离较短,油气自烃源岩生成后,就近聚集在生油有利区或其临近地带,后来简称为“源控论”^[68]。20世纪80年代,根据新的资料,将“源控论”推广到中国东部地区,采用“选凹定带”的勘探方法成功发现了一大批油田^[69-70];20世纪80—90年代,推广到中国西北和近海盆地,以及天然气区^[68];随后,又考察了源控论在全世界的适用度,认为在国外的多数地区也适用^[68]。因此,该理论被誉为“最有影响和效益的理论”,在许多专著中,被列为新中国重大石油地质创新理论之一^[68]。对于天然气勘探,戴金星等提出的“生气(强度)中心及其周围是气藏形成富集”^[71]、“大、中型气田形成要求一定的生气强度”^[72]可认为是“源控论”在天然气勘探中的具体应用,提出的中国绝大多数大、中型气田所在处生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[73-74]的论断至今仍具有广泛影响和指导作用。

本研究认为,氮气成藏亦遵循“源控论”,高氮气生气强度的氮源岩是形成含氮-富氮气藏的前提条件。氮气虽然在源岩、生成、运移和聚集等方面和常规天然气有很多不同^[29],但氮气自源岩矿物释放进入运载流体(地层水和天然气)后,便和地层水、天然气等运载流体具有相同的运聚成藏规律。因氮气在天然气中含量

极低,根据亨利定律和“弱气源”理论^[66],其具有相对很小的分压,因此,氦气从地层水中脱溶到天然气流/藏中的效率是极高的。所以,在氦气成藏过程中,可不考虑不同气藏氦气脱溶效率的微小差异。如此,在运载流体条件相同的情况下,氦源岩的生氦量便成为决定氦气运聚成藏总量的决定性因素。因铀和钍广泛赋存于各类岩石中,相比烃源岩,氦气的源岩分布更加广泛;理论上,所有含有铀钍等放射性元素的地层均可成为氦源岩。因此,氦气生气强度越大,氦源岩面积越大,生成的氦气量越大。实际计算结果表明,金秋气田所在地区侏罗系氦气生气强度为 $(60 \sim 85) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图7),处于较高水平,为该区形成含氦-富氦气藏提供了氦气来源的物质基础。诚然,在氦气总量一定的情况下,氦气含量还和常规天然气的充注量有关,但在同一地区同一层系同一油气系统,不同气藏之间的常规天然气资源丰度差距相对较小,在此情况下,气藏中氦气含量受氦气总量,进而受氦源岩生气强度影响将更加明显。因此,从氦气运移和聚集角度来讲,其成藏亦遵循“源控论”,高氦气生气强度区更易于形成含氦-富氦气藏和大、中型氦气藏。只是目前这方面研究还很薄弱,还没有总结出大、中型氦气藏对应的氦气生气强度的下限值;另外,氦气含量还受常规天然气充注量的影响,预测起来更加复杂,难度更大。

4.2 适度的烃类天然气充注强度是重要条件

迄今为止,自然界中尚未发现有纯氦气藏,氦气多以伴生形式赋存于天然气藏中^[1,27,75]。因此在含油气盆地中,以烃类气体为主要成分的气藏中,常规天然气的充注量应该与氦气含量存在负相关关系,常规天然气充注强度越大,氦气含量越低。四川盆地352个天然气探明储量计算单元的实例证实了该负相关关系的存在,即氦气含量越高,天然气储量丰度越小(图9中蓝线所示);并且,氦气含量大于0.1%的区块,天然气的储量丰度基本在 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以下(图9中红线框部分所示)。

金秋气田的实际资料也证实了这一点。由于金秋气田是由不同期河道砂组成的岩性气藏,详细求取每个测试层段的天然气资源丰度较为困难,本研究以压力系数代替,因为如果天然气充注强度越大,则压力系数应该会越高,反之越低。从统计结果看,两者确实呈负相关关系(图10),表明在氦气总量一定的条件下,常规天然气的大量充注会将氦气“稀释”,造成氦气含量的降低。

前文已述,金秋气田烃类天然气主要来源于上三叠统须家河组烃源岩。从上三叠统须家河组烃源岩生

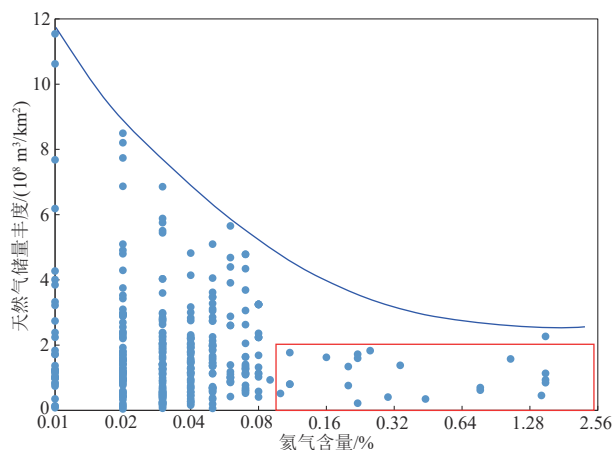


图9 四川盆地探明储量天然气丰度与氦气含量关系

Fig. 9 Bivariate plot of natural gas abundance versus helium gas content for proven reserves in the Sichuan Basin

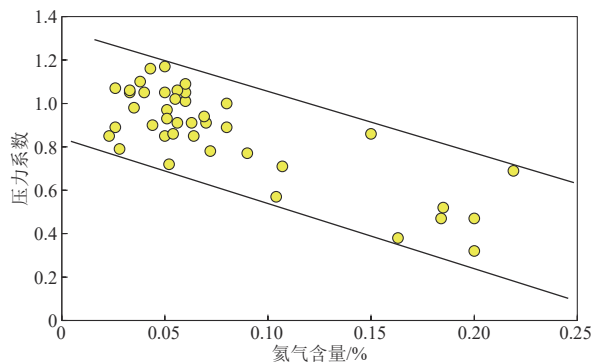


图10 金秋气田压力系数与氦气含量关系

Fig. 10 Bivariate plot of pressure coefficient versus helium gas content in the Jinqu gas field

气强度图^[48,52]看,生气强度最大的地区位于龙门南段东侧的前陆凹陷带,最大达到了 $(230 \sim 250) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,而金秋气田地区生气强度在 $(30 \sim 70) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,不算太大,这可能也是金秋气田地区常规天然气充注强度不高,进而导致氦气含量相对较高的原因之一。

因此,适度的常规烃类天然气充注强度是金秋气田地区含氦-富氦气藏形成的重要条件。

4.3 抬升剥蚀温、压下降导致的脱溶作用是氦气富集的有益补充

氦气的稀有性、惰性和强扩散性使其在地壳中的迁移和富集与常规天然气存在明显的不同,氦气自岩石/矿物晶格中释放出来(初次运移)之后,目前普遍认为其二次运移往往需要其他气体或者地下水作为载体,尤以地下水最为重要和普遍^[5,7,66-67]。但经典氦气成藏理论着重强调了地层水对氦气的“运载”作用^[43],但对原位溶解氦在温压改变时对氦气富集成藏的影响关注较少。

赵栋等通过氮气溶解/脱溶量的计算表明,伴随地层大幅抬升引发的温、压下降能造成地层原位溶解氮持续成规模的脱溶聚集,有利于形成富氮气藏^[76]。

前人研究表明,金秋气田地区喜马拉雅期以来抬升剥蚀厚度约2 000 m^[33],抬升剥蚀造成沙溪庙组气藏温度和压力下降,由早期的弱超压演变为现今的常压-中低压^[77]。本研究以金秋气田QL16井区8号河道砂组为例,利用文献[76]介绍的方法,计算了喜马拉雅期剥蚀前后氮气在地下水中溶解度变化造成的脱溶量对目前氮气含量的大致贡献。

QL16井区氮气含量在0.05%~0.20%,平均值为0.09%;气藏中部目前埋深2 160.4~2 477.5 m,平均2 287.2 m;地层温度67.6~75.4℃,平均69.7℃;地层压力17.9~26.6 MPa,平均22.9 MPa;压力系数0.83~1.18,平均1.01。白垩纪末期最大埋深时,深度为目前埋深基础上加2 000 m,古温度和古压力采用文献[33]中QL16井和QL17井第一成藏期的最大值,分别为132℃和56.5 MPa。气藏体积按目前探明储量取值,其中,含气饱和度为52.6%~61.0%,所以,含水饱和度为39.0%~47.4%。由于金秋气田地区测试及采气生产期间均不产地层水,地层水参数借鉴邻区天府气田简阳区块YQ2井^[78](井位见图1)沙一段的地层水数据,总矿化度为85 000 mg/L,密度为1.07 g/cm³。在不考虑抬升剥蚀过程中地层孔隙度、岩石骨架和地层水的压缩系数变化的情况下,计算得到QL16井区氮气在水中的溶解度目前为0.202 8 mg/L,白垩纪末期埋深最大时为0.689 5 mg/L,抬升剥蚀后下降了71%;抬升剥蚀后由于氮气溶解度的降低从探明储量计算单元气层水体中脱溶出来的氮气体量占目前气藏中氮气总量的1.6%。如果考虑含水饱和度更高的地层及储量计算单元周边地层中水体的脱溶量,这个比例会更高。因此,抬升剥蚀温压下降导致的脱溶作用是金秋气田氮气富集的有益补充。

5 结论

1) 金秋气田侏罗系沙溪庙组气藏为受河道砂体控制的岩性气藏,氮气含量分布在0.02%~0.20%,平均为0.07%;主体分布在0.05%~0.10%,部分样品超过0.10%,有望成为四川盆地继威远气田之后的提氮接替领域。

2) 稀有气体同位素参数显示,金秋气田中氮气为壳源放射性成因,没有幔源贡献。分析认为,四川盆地须家河组底界为海、陆相油气系统的分界面,下面的深

大断裂没有断穿该界面,下面的海相油气也没有突破该界面进入到上面的陆相地层中,因此,必须依靠油气或地层水作为载体进行二次运移的氮气也不可能来自该界面之下的老地层,即金秋气田的氮源岩只可能为该界面之上的中生界沉积岩。同时,上三叠统须家河组和侏罗系具有较高的铀、钍元素含量和较大的地层厚度,进而在金秋地区具有较高的氮气生气强度,具备形成含氮-富氮气藏的氮源基础。

3) 通过金秋地区上三叠统须家河组和侏罗系2套地层氮气生气强度平面变化和金秋气田氮气含量平面变化的匹配性对比分析,认为金秋气田氮气应该主要来源于储层段所在的侏罗系,而非烃源岩层段所在的上三叠统须家河组。

4) 金秋气田含氮-富氮气田的形成主要受3个主要因素的影响:①遵循源控论,高氮气生气强度的氮源岩是基础条件。②适度的烃类天然气充注强度是重要条件,常规烃类天然气充注强度太大会将氮气冲淡稀释。四川盆地实例表明,氮气含量大于0.10%的区块天然气的储量丰度基本在 2×10^8 m³/km²以下。③抬升剥蚀温、压下降导致的脱溶作用是氮气富集的有益补充,QL16井区自白垩纪末期至今的抬升剥蚀造成的温、压下降实例计算表明,抬升剥蚀造成氮气在地层水中的溶解度下降了71%,探明储量计算单元气层水体中脱溶出来的氮气体量占目前气藏中氮气总量的1.6%。如果考虑含水饱和度更高的地层及储量计算单元周边地层中水体的脱溶量,这个比例会更高。

致谢:感谢西北大学“大陆动力学”国家重点实验室赵栋实验师在氮气脱溶量方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 陈践发,刘凯旋,董勃伟,等. 天然气中氮资源研究现状及我国氮资源前景[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.
- [2] 李玉宏,李济远,周俊林,等. 氮气资源评价相关问题认识与进展[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 363-373.
LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Research progress and new views on evaluation of helium resources[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 363-373.
- [3] NUTTALL W J, CLARKE R H, GLOWACKI B A. Stop squandering helium[J]. Nature, 2012, 485(7400): 573-575.
- [4] 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 Wei yuan Gasfield[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2003, 25(5): 473-480.
- [5] BALLENTINE C J, SHERWOOD LOLLAR 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.
- [6] SORENSON R P. A dynamic model for the Permian Panhandle and Hugoton fields, western Anadarko Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(7): 921-938.
- [7] BROWN A A. Formation of high helium gases: A guide for explorationists[C]//AAPG Convention, New Orleans, 2010. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2010: 80115.
- [8] 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, 41(S1): 47-53.
- LI Yuhong, LU Jincan, 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.
- [9] 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.
- [10] DANABALAN D. Helium: Exploration methodology for a strategic resource[D]. Durham: Durham University, 2017.
- [11] 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.
- [12] 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, LYU Pengrui, NIU Yazhuo, et al. Preliminary study on the geological characteristics, resource potential and production capacity pattern of global helium resources [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 11-32.
- [13] ZHANG Wen, LI Yuhong, ZHAO Fenghua, 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.
- [14] 刘凯旋, 陈践发, 付娆, 等. 富氦天然气藏成藏特征及主控因素[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1652-1663.
- LIU Kaixuan, CHEN Jianfa, FU Rao, et al. Accumulation characteristics and main controlling factors of helium-rich gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1652-1663.
- [15] 卢雪梅. 氦气成藏机制研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 248.
- LU Xuemei. Research progress on helium reservoir formation mechanism[J]. *Oil and Gas Geology*, 2022, 43(2): 248.
- [16] 蒙炳坤, 周世新, 李靖, 等. 上扬子地区不同类型岩石生氦潜力评价及泥页岩氦气开采条件理论计算[J]. *矿物岩石*, 2021, 41(4): 102-113.
- MENG Bingkun, ZHOU Shixin, LI Jing, et al. Helium potential evaluation of different types of rocks in the Upper Yangtze region and theoretical calculation of helium recovery conditions for shale in Upper Yangtze region[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(4): 102-113.
- [17] 尤兵, 陈践发, 肖洪, 等. 富氦天然气藏氦源岩特征及关键评价参数[J]. *天然气工业*, 2022, 42(11): 141-154.
- YOU Bing, CHEN Jianfa, XIAO Hong, et al. Characteristics and key evaluation parameters of helium source rocks in helium-rich natural gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(11): 141-154.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陈燕燕, 陶士振, 杨秀春, 等. 页岩气和煤层气中氦气的地球化学特征和富集规律[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 684-696.
- CHEN Yanyan, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, et al. The geochemical characteristics and enrichment of helium in shale gas and coalbed methane[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 684-696.
- [22] REIMER G M. Helium detection as a guide for uranium exploration; Open-file report 76-240[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1976: 1-14.
- [23] BOTTOMLEY D J, ROSS J D, CLARKE W B. Helium and neon isotope geochemistry of some ground waters from the Canadian Precambrian Shield[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(10): 1973-1985.
- [24] LIPPMANN-PIPKER J, SHERWOOD LOLLAR B, NIEDERMANN S, et al. Neon identifies two billion year old fluid component in Kaapvaal Craton[J]. *Chemical Geology*, 2011, 283(3/4): 287-296.
- [25] HOLLAND G, LOLLAR B S, LI L, et al. Deep fracture fluids isolated in the crust since the Precambrian era[J]. *Nature*, 2013, 497(7449): 357-360.

- [26] LOWENSTERN J B, EVANS W C, BERGFELD D, et al. Prodigious degassing of a billion years of accumulated radiogenic helium at Yellowstone[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 355–358.
- [27] 李玉宏, 张文, 王利, 等. 壳源氦气成藏问题及成藏模式[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(4): 565–572.
LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Several issues in the accumulation of crust-derived helium and the accumulation model [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(4): 565–572.
- [28] 刘雨桐, 段堃, 张晓宝, 等. 基岩型富氮气藏形成条件——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.
- [29] 尤兵, 陈践发, 肖洪, 等. 壳源富氮天然气藏成藏模式及关键条件[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 672–683.
YOU Bing, CHEN Jianfa, XIAO Hong, et al. Accumulation models and key conditions of crustal-derived helium-rich gas reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 672–683.
- [30] 何衍鑫, 田伟, 王磊, 等. 基于自然伽马能谱测井的氦气资源评价方法——以塔里木盆地古城地区为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 719–733.
HE Yanxin, TIAN Wei, WANG Lei, et al. Quantifying the helium generation based on natural gamma-ray spectrometry data: Gucheng area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 719–733.
- [31] 张驰, 关平, 张济华, 等. 中国氦气资源分区特征与成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 656–671.
ZHANG Chi, GUAN Ping, ZHANG Jihua, et al. Zoning characteristics of helium resources and helium accumulation model in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 656–671.
- [32] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 154–162.
GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 154–162.
- [33] 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 Jinqiu Gas Field of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 51–61.
- [34] 杨春龙, 谢增业, 李剑, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1117–1126.
YANG Chunlong, XIE Zengye, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in Shaximiao Formation of Middle Jurassic in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1117–1126.
- [35] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——I. 氮资源的新类型: 沉积壳层幔源氮的工业储集[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996, 26(1): 1–8.
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Geochemistry of mantle-derived volatiles in natural gas in the eastern oil and gas regions-I. A new type of helium resource: Industrial accumulation of mantle-derived helium in sedimentary crust [J]. *Science China Earth Sciences*, 1996, 26(1): 1–8.
- [36] DAI Jinxing, NI Yunyan, QIN Shengfei, et al. Geochemical characteristics of He and CO₂ from the Ordos (cratonic) and Bohaibay (rift) basins in China [J]. *Chemical Geology*, 2017, 469: 192–213.
- [37] 刘四兵. 川西坳陷中段须家河组流体成因与天然气动态成藏特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
LIU Sibing. Research on origin of fluid and gas dynamic accumulation characteristics of Xujiahe Formation in the middle member of west Sichuan Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [38] WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. Radiogenic helium concentration and isotope variations in crustal gas pools from Sichuan Basin, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 117: 104586.
- [39] NI Yunyan, DAI Jinxing, TAO Shizhen, et al. Helium signatures of gases from the Sichuan Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74: 33–43.
- [40] XU Sheng, ZHENG Guodong, ZHENG Ananjing, et al. Mantle-derived helium in foreland basins in Xinjiang, Northwest China [J]. *Tectonophysics*, 2017, 694: 319–331.
- [41] 王万春, 张晓宝, 刘若冰, 等. 川东北元坝与河坝地区陆相储层天然气成因[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 26–36.
WANG Wanchun, ZHANG Xiaobao, LIU Ruobing, et al. Origin of natural gas in terrestrial reservoirs in Yuanba and Heba regions in northeastern Sichuan Basin, China [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2014, 35(1): 26–36.
- [42] 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.
- [43] LI Yan, QIN Shengfei, WANG Yunpeng, et al. Tracing interaction between hydrocarbon and groundwater systems with isotope signatures preserved in the Anyue Gas Field, central Sichuan Basin, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 274: 261–285.
- [44] 何登发, 李英强, 黄涵宇, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 103–121.
HE Dengfa, LI Yingqiang, HUANG Hanyu, et al. Hydrocarbon accumulation, formation and evolution of multi-cycle superposed

- Sichuan Basin, China[M]. Beijing: Science Press, 2020: 103-121.
- [45] 管树巍, 梁瀚, 姜华, 等. 四川盆地中部主干走滑断裂带及伴生构造特征与演化[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 252-264.
- GUAN Shuwei, LIANG Han, JIANG Hua, et al. Characteristics and evolution of the main strike-slip fault belts of the central Sichuan Basin, southwestern China, and associated structures[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 252-264.
- [46] 汪泽成, 赵文智, 李宗银, 等. 基底断裂在四川盆地须家河组天然气成藏中的作用[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 541-547.
- WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, LI Zongyin, et al. Role of basement faults in gas accumulation of Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 541-547.
- [47] 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气作用[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.
- [48] 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 1-11.
- ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1-11.
- [49] 杨光, 朱华, 黄东, 等. 四川超级富气盆地特征及油气勘探潜力[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 1-7.
- YANG Guang, ZHU Hua, HUANG Dong, et al. Characteristics and exploration potential of the super gas-rich Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 1-7.
- [50] 汪泽成, 施亦做, 文龙, 等. 用超级盆地思维挖掘四川盆地油气资源潜力的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 847-858.
- WANG Zecheng, SHI Yizuo, WEN Long, et al. Exploring the potential of oil and gas resources in Sichuan Basin with Super Basin Thinking [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 847-858.
- [51] 李国辉, 苑保国, 朱华, 等. 四川盆地超级富气成因探讨[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 1-10.
- LI Guohui, YUAN Baoguo, ZHU Hua, et al. Genesis of super-rich gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 1-10.
- [52] 杨跃明, 杨家静, 杨光, 等. 西南油气田探区“十三五”油气资源及经济、环境评价[R]. 成都: 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 2019.
- YANG Yueming, YANG Jiajing, YANG Guang, et al. Evaluation of oil and gas resources, economy, and environment in the southwest oil and gas field exploration area during the 13th Five Year Plan[R]. Chengdu: Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, 2019.
- [53] 王兰生, 李宗银, 陈盛吉, 等. 四川盆地含油气系统划分及勘探前景分析[C]//中国地质学会石油地质专业委员会. 第十届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编, 无锡, 2005. 北京: 中国地质学会, 2005: 224.
- WANG Lansheng, LI Zongyin, CHEN Shengji, et al. Petroleum system division and exploration prospect analysis in Sichuan Basin [C]//The Petroleum Geology Professional Committee of the Chinese Geological Society. Abstracts of the 10th National Organic geochemistry Academic Conference, Wuxi, 2005. Beijing: Geological Society of China, 2005: 224.
- [54] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 234-248.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIANG Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan Basin and its sources[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248.
- [55] 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 四川盆地川中隆起带震旦系一二叠系天然气地球化学特征及成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 50-67.
- XIE Zengye, WEI Guoqi, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and accumulation pattern of gas reservoirs of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 50-67.
- [56] 戴金星, 倪云燕, 邹才能, 等. 四川盆地须家河组煤系烷烃气碳同位素特征及气源对比意义[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 519-529.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, ZOU Caineng, et al. Carbon isotope features of alkane gases in the coal measures of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin and their significance to gas-source correlation[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 519-529.
- [57] 万茂霞, 谢邦华, 陈盛吉, 等. 四川盆地上三叠统油气源对比[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 22-24, 123.
- WAN Maoxia, XIE Banghua, CHEN Shengji, et al. Hydrocarbon source correlation of the upper Triassic reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 22-24, 123.
- [58] 王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 等. 川西坳陷须家河组天然气成因类型及气源对比[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(6): 8-13, 21.
- WANG Peng, SHEN Zhongmin, LIU Sibing, et al. Study on genetic types and sources of natural gas of Xujiahe Formation in west Sichuan Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(6): 8-13, 21.
- [59] 唐宇, 吕正祥, 叶素娟, 等. 成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组天然气运移特征与富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 281-287.
- TANG Yu, LYU Zhengxiang, YE Sujuan, et al. Characteristics and controlling factors of natural gas migration and accumulation in the Upper Jurassic Penglaizhen Formation of Chengdu Sag[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(3): 281-287.
- [60] 王玲辉, 赵虎, 沈忠民, 等. 四川中江气田沙溪庙组天然气成因类型及气源对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 158-163.
- WANG Linghui, ZHAO Hu, SHEN Zhongmin, et al. Correlation of gas sources and genetic types of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation of Zhongjiang Gas Field, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(2): 158-163.

- [61] 肖富森, 黄东, 张本健, 等. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 568-576, 586.
- XIAO Fusen, HUANG Dong, ZHANG Benjian, et al. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 568-576, 586.
- [62] 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 765-783.
- ZHENG Herong, LIU Zhongqun, XU Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 765-783.
- [63] 郭彤楼, 王勇飞, 叶素娟, 等. 四川盆地中江气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 141-155.
- GUO Tonglou, WANG Yongfei, YE Sujuan, et al. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Zhongjiang gas field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 141-155.
- [64] 张文, 陈文, 李玉宏, 等. 国内外典型富氮气藏稀有气体地球化学特征及对氮气成藏过程的示踪意义[J/OL]. 天然气地球科学. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20231116.1033.006>.
- ZHANG Wen, CHEN Wen, LI Yuhong, et al. Geochemical characteristics of noble gases in typical helium-rich gas reservoirs and the significance for tracing helium enrichment process [J/OL]. Natural Gas Geoscience, <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20231116.1033.006>.
- [65] BROWN A A. Origin of high helium concentrations in dry gas by water fractionation [C]//AAPG Research Conference, Calgary, 2005. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005: 90043.
- [66] 李玉宏, 张文, 王利, 等. 亨利定律与壳源氮气弱源成藏——以渭河盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(4): 495-501.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Henry's law and accumulation of crust-derived helium: A case from Weihe Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 495-501.
- [67] 秦胜飞, 李济远, 梁传国, 等. 中国中西部富氮气藏氮富集机理——古老地层水脱氮富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1203-1217.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China: Degassing and accumulation from old formation water [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 1203-1217.
- [68] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1-3, 7.
- HU Chaoyuan. Research on the appliance extent of “Source Control Theory” by semi quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1-3, 7.
- [69] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13.
- HU Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9-13.
- [70] 黄籍中. “源控论”再认识——以四川盆地天然气勘探为例[J]. 海相油气地质, 1998, 3(2): 1-5.
- HUANG Jizhong. Further understanding the theory of source control——Taking natural gas exploration in the Sichuan Basin as an example [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1998, 3(2): 1-5.
- [71] 戴金星. 中国气藏形成与富集的主要控制因素初探[J]. 天然气工业, 1988, 8(1): 23-28.
- DAI Jinxing. A primary discussion on the mainly controlling factors of the formation and accumulation of gas reservoirs in China [J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(1): 23-28.
- [72] 戴金星. 中国大中型气田有利勘探区带[J]. 勘探家, 1996, 1(1): 6-9, 7.
- DAI Jinxing. Exploration plays in large and middle gas fields in China [J]. Explorationist, 1996, 1(1): 6-9, 7.
- [73] 石宝珩, 戚厚发, 戴金星, 等. 加速天然气勘探步伐努力寻找大中型气田 [C]//《天然气地质研究论文集》编委会. 天然气地质研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-7.
- SHI Baoheng, QI Houfa, DAI Jinxing, et al. Accelerate the pace of natural gas exploration and strive to find large and medium-sized gas fields [C]//Editorial Board of the Collection of Natural Gas Geological Research Papers. Collection of Natural Gas Geological Research Papers. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-7.
- [74] 戚厚发, 孔志平, 戴金星, 等. 我国较大气田形成及富集条件分析 [M]//石宝珩. 天然气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1992: 8-14.
- QI Houfa, KONG Zhiping, DAI Jinxing, et al. Analysis of formation and enrichment conditions of large gas fields in China [M]//SHI Baoheng. Natural Gas Geological Research. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 8-14.
- [75] ANDERSON S T. Economics, helium, and the U. S. federal helium reserve: Summary and outlook [J]. Natural Resources Research, 2018, 27(4): 455-477.
- [76] 赵栋, 王晓锋, 刘文汇, 等. 孔隙水中氮溶解与脱溶量估算方法及其地质意义[J]. 天然气工业, 2023, 43(2): 155-164.
- ZHAO Dong, WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, et al. Calculation method and geological significance of dissolved and exsolved helium in pore water [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(2): 155-164.
- [77] 韦腾强, 吴长江, 黄亚浩, 等. 流体包裹体拉曼定量技术在致密砂岩气藏研究中的应用——以四川盆地中部侏罗系沙溪庙组为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 164-173.
- WEI Tengqiang, WU Changjiang, HUANG Yahao, et al. Application of fluid inclusion Raman quantitative technique to the study of tight sandstone gas reservoirs: Case study of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 164-173.
- [78] 曾溅辉, 张亚雄, 张在振, 等. 致密砂岩气藏复杂气-水关系形成和分布主控因素及分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1067-1083.
- ZENG Jianhui, ZHANG Yaxiong, ZHANG Zaizhen, et al. Complex gas-water contacts in tight sandstone gas reservoirs: Distribution pattern and dominant factors controlling their formation and distribution [J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(5): 1067-1083.