

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.006

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

赵安坤^{1,2}, 王东^{1,2*}, 时志强³, 程锦翔^{1,2}, 王启宇^{1,2}, 何江林^{1,2}, 李龙⁴, 雷子慧⁵

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 4. 贵州页岩气勘探开发有限公司, 贵州 贵阳 563400; 5. 四川大学文学与新闻学院, 四川 成都 610064)

摘要:氦气是重要的战略资源, 中国氦气对外依存度超过 95%, 资源供需矛盾十分突出, 亟需开展相关资源评价与研究。四川盆地是中国最早实现氦气商业利用的地区, 但全盆地氦气资源调查研究水平依然薄弱。笔者梳理总结了目前四川盆地及周缘氦气勘探进展与资源现状, 认为四川盆地及周缘地区含氦天然气具有分布广泛、层位众多的特点; 高放射性泥页、基底花岗岩与铀矿岩层发育, 具备氦气源岩基础; 分析了四川盆地及周缘氦气资源潜力, 总结了氦气勘探面临的主要问题, 并根据氦气富集特征分析了未来氦气调查研究的重点方向, 包括围绕四川盆地及周缘开展常规天然气田和页岩气藏含氦特征调查, 建立天然气含氦特征数据库(集), 开展氦气分布特征和氦气富集机理研究, 以期为后续氦气勘探奠定坚实基础。

关键词:四川盆地; 氦气; 勘探现状; 资源潜力

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2022)04-0074-11

Exploration Status and Helium Resource Potential of the Helium-bearing Natural Gas Field in Sichuan Basin and Its Surrounding Areas

ZHAO Ankun^{1,2}, WANG Dong^{1,2,*}, SHI Zhiqiang³, CHENG Jinxiang^{1,2},
WANG Qiyu^{1,2}, HE Jianglin^{1,2}, LI Long⁴, LEI Zihui⁵

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Guizhou Shale Gas Exploration & Exploitation Company, Guiyang 563400, Guizhou, China; 5. College of Literature and Journalism, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China)

Abstract: Helium is a very important strategic resource. As our helium gas external dependency has been more than 95%, the contradiction between the supply and demand of helium resources is

收稿日期: 2022-06-26; 修回日期: 2022-08-18; 网络发表日期: 2022-11-15; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金项目“康滇古陆东侧五峰组-龙马溪组富含有机质白云质页岩特征及白云石形成、有机质富集机理”(PLC20210104), 中国地质调查项目“氦气资源调查评价与示范工程”(GC20220203)及“西南重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221661)联合资助。

作者简介: 赵安坤(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事非常规油气地质评价。E-mail: zakly@qq.com。

* 通讯作者: 王东(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质研究。E-mail: wwwdong1222@qq.com。

very prominent. Thus the related helium resource evaluation needs to be carried out as soon as possible. In this paper, the authors summarized the present situation of helium gas exploration and the helium resources in the Sichuan basin and its surrounding areas. As the Sichuan Basin is the first region to realize the commercial utilization of helium gas in China. The helium-bearing natural gas is widely distributed in Sichuan Basin and its surrounding areas horizontal and vertically. The highly radioactive shale formation, basement granite, and uranium rock are developed, which have the common basis as helium source rock. Finally, the helium gas resource potential in the Sichuan basin and its adjacent areas were analyzed in this paper. And the main problems for helium gas exploration were summarized. Based on the characteristics of helium gas enrichment, the future focus in the study of helium gas was also given. The authors suggested investigating and analyzing the characteristics of helium in conventional gas fields and Paleozoic shale gas reservoirs in and around the Sichuan basin, investigating the distribution characteristics of helium, and comprehensively analyzing the mechanism of helium enrichment by establishing the helium-bearing natural gas features data set, and exploring the genesis and distribution of helium. These works would help to lay a firm foundation for future helium exploration and exploitation.

Keywords: Sichuan basin; helium; exploration status; resource potential

氦虽为宇宙第二丰富的元素,在地球上却十分稀少。作为重要的战略资源,氦气应用十分广泛,如液体燃料火箭发射、医疗设备低温超导、测试分析、工程焊接与泄漏检测、半导体封装制造等。近年来,全球对氦气的需求增长十分迅猛,年需求量近2亿 m^3 ,但年产量不足1.7亿 m^3 ;中国氦气对外依存度超过95%,进口量约为每年0.206亿 m^3 (蒙炳坤等,2021;李玉宏等,2022a;张哲等,2022),资源供需矛盾十分突出,亟需开展相关资源评价研究,保障供应安全。但中国针对氦气的研究多是将其作为了解地球深部物质组成和地质过程的依据和手段,而将氦气作为独立资源开展分析评价的科学研究相对缺乏。

氦具有2种稳定同位素,包括来自于铀和钍辐射衰变产生的 ^4He ,以及地球形成过程时保留地幔中的 ^3He (Keller,1969;Bräuer et al.,2016)。天然气中氦气主要来源为3类(Brown,2010;李玉宏等,2011)。 $\textcircled{1}$ 幔源氦:地幔中岩浆脱气作用释放的氦气,以高 ^3He 同位素含量为特征。 $\textcircled{2}$ 壳源氦:主要源自地壳中岩石、矿物中的铀、钍元素衰变产生,以高 ^4He 同位素含量为特征。 $\textcircled{3}$ 大气源氦:以壳源和幔源氦混合为主,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值通常较稳定,为 1.4×10^{-6} 。当天然气藏中氦的浓度达到0.04%~0.1%时,即可通过LNG-BOG法和天然气分离法实现氦气的商业提取(李玉宏等,2022a),具备商业价值。

目前,在中国的四川、渭河、柴达木、鄂尔多斯、塔里木、松辽等多个盆地中均有氦气显示(张子枢,1992;刘建朝等,2009;刘全有等,2009;张云鹏等,2016;刘超等,2021;景小燕等,2021),随着非常规油气的勘探与开采,在一些页岩气区块中也有一定的氦气显示。其中,四川盆地的威远气田在很长一段时间都是国内唯一工业用提取氦的天然气田(张子枢,1992;陶小晚等,2019;李玉宏等,2022b)。此外,在威远、长宁和礁石坝页岩气田中,也有氦气的新发现。因此,研究四川盆地及周缘天然气中的氦气资源现状及潜在资源分布,可为氦气富集机理等理论研究提供素材,也为氦气未来的勘探提供有益参考。

1 四川盆地及周缘地区氦气资源调查研究现状

1.1 常规天然气田含氦特征与分布

四川盆地及周缘地区含氦天然气具有分布广泛、层位众多的特点,包括前寒武系(陡山沱组、灯影组)、古生界(寒武系、石炭系、二叠系等)、中生界(三叠系、侏罗系等)都有氦气显示(图1)。其中,川西南地区是盆地氦气资源较为富集的地区,含氦天然气地层以前震旦系至寒武系、二叠系—三叠系为主,氦气含量为0.018%~0.342%(徐永昌等,1989;张子枢,1992;戴金星,2003;Ni et al.,2014)。川中古

隆起安岳气田寒武系—震旦系天然气中氦气含量 $0.005\% \sim 0.102\%$ (魏国齐等,2014),由震旦系—寒武系总体趋势逐渐降低,寒武系龙王庙组氦气含量低于 0.01% ,三叠系—侏罗系天然气中氦气含量 $0.018\% \sim 0.049\%$ (张子枢,1992;Ni et al.,2014)。川南地区的含氦天然气地层主要为二叠系和三叠系,氦气含量为 $0.011\% \sim 0.090\%$ (张子枢,1992)。川东地区的含氦天然气地层包括石炭系、二叠系和

三叠系,氦气含量为 $0.001\% \sim 0.146\%$ (张子枢,1992;Ni et al.,2014),普遍低于 0.1% 。川东北—川北地区的含氦天然气地层包括二叠系、三叠系和侏罗系,以普光和元坝气田为代表,氦气含量为 $0.000\% \sim 0.022\%$ (Liu et al.,2017;仵宗涛等,2017)。川西地区的含氦天然气地层也涉及二叠系、三叠系和侏罗系,氦气含量为 $0.001\% \sim 0.150\%$ (张子枢,1992;Ni et al.,2014)。

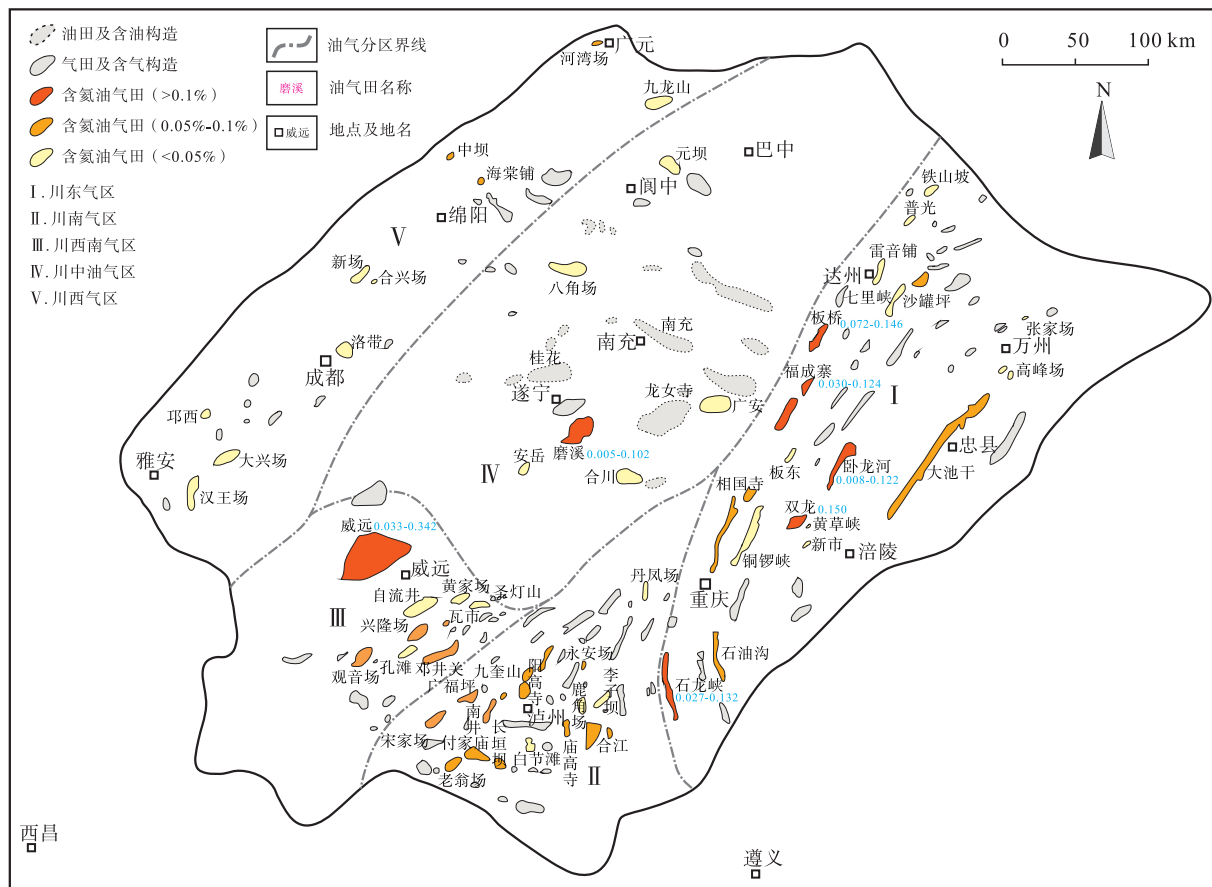


图1 四川盆地含氦气天然气田分布图

Fig. 1 Distribution map of helium-bearing gas fields in Sichuan basin

整体而言,四川盆地地层越老,氦气含量相对越高,川南、川北、川东北、川西地区二叠系—侏罗系天然气样品氦气含量总体低于 0.1% ,仅川东极少地区达到 $0.1\% \sim 0.15\%$ (图1)。尽管四川盆地具有良好的氦气资源前景,盆地南部地区氦气勘探开发也取得一定突破,但总体勘探和研究程度较低,且以往研究成果多将氦气作为天然气的伴生气来研究,盆地及周缘氦气资源家底依然不清,成藏规律认识也相对薄弱。

1.2 页岩气含氦特征与分布

据前人研究,四川盆地及周缘页岩气中同样具有一定的氦气含量(图2)。如威远龙马溪组页岩气氦含量为 $0.0228\% \sim 0.12863\%$ (Cao et al.,2018),其中威201-H1氦含量最高,为 $0.120\% \sim 0.129\%$;长宁页岩气藏龙马溪组页岩气氦含量为 $0.0187\% \sim 0.04654\%$ (Cao et al.,2018),其中NH2-7井最高氦含量为 0.04654% ,可能与有机质吸附及还原强度相关元素组合中的铀元素有密切

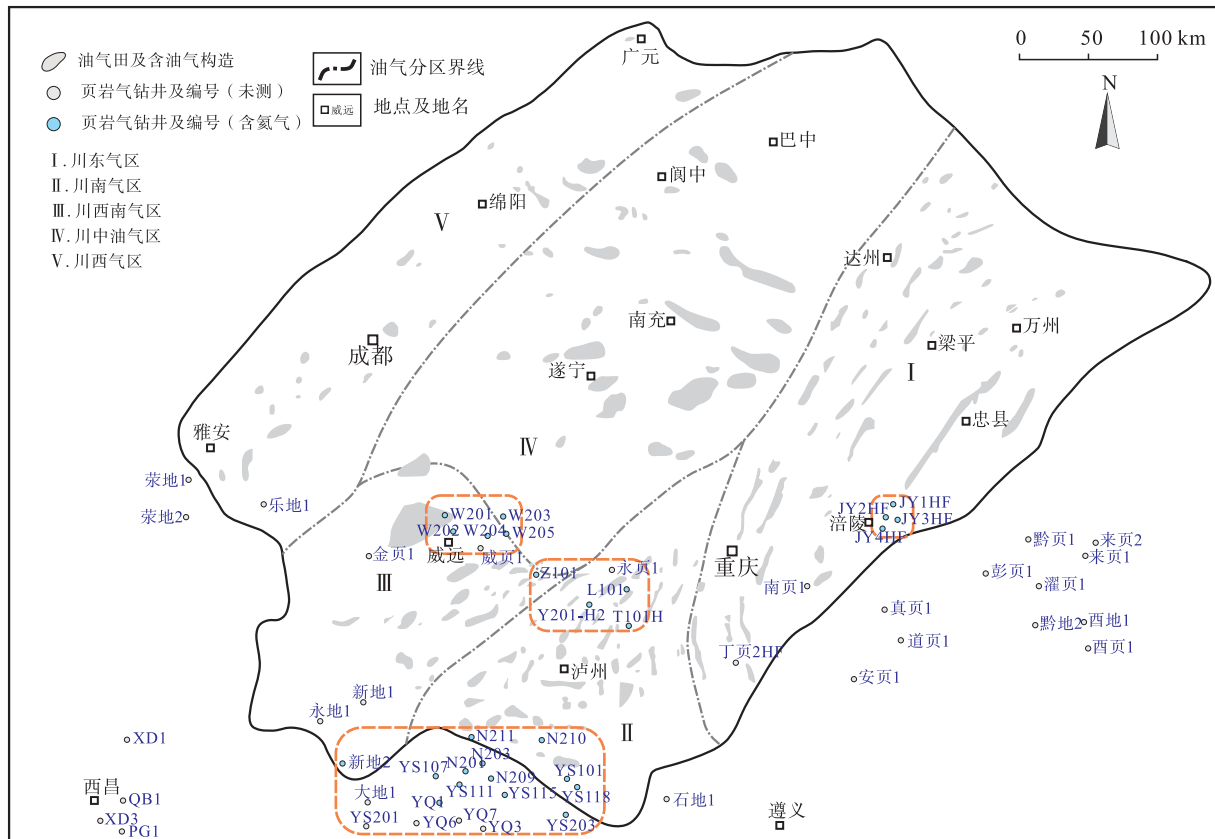


图2 四川盆地及周缘页岩气(井)田含氦显示分布图

Fig. 2 Distribution map of helium content in shale gas fields in Sichuan basin and its surrounding areas

关系(王茜等, 2021)。Dai等(2017)通过测试氦同位素发现, 涪陵页岩气田中氦气同位素 R/R_a 值为 $0.02 \sim 0.04$, 显示为壳源成因。总之, 四川盆地及周缘的页岩气田中已见到氦气含量报道, 但其含氦分布情况仍需进一步调查研究。

1.3 威远气田含氦特征与分布

威远气田天然气含氦量达到工业标准, 该气田震旦系地层探明天然气储量 408.16 亿 m^3 (戴金星, 2003), 以裂解气为主, 高含 CO_2 、 N_2 、 He 、 Ar 等非烃气体(戴金星, 2003; 孙玮等, 2010), 氦气含量为 $0.120\% \sim 0.342\%$ (张子枢, 1992; 戴金星, 2003; Ni et al., 2014), 平均约为 0.2% (李玉宏等, 2022b)。威远地区基底及寒武系气藏中氦气含量也较高, 达 $0.262\% \sim 0.270\%$ (张子枢, 1992; 戴金星, 2003), 二叠系极少数氦气含量可大于 0.1% (戴金星, 2003; 梁霄等, 2016), 而三叠系中氦气含量均小于 0.1% (徐永昌等, 1989; 张子枢, 1992)。单就天然气中氦气含量而言, 自下而上具有显著降低的趋势, 这一特点也得到了其他研究者的证实(梁霄

等, 2016), 从横向对比来看, 威远地区的含气层系氦含量远高于邻区高石梯-磨溪构造对应层位(梁霄等, 2016)。研究认为, 威远气田震旦系—寒武系氦气含量高的原因包括以下3点: ①高 U 、 Th 含量的前震旦系花岗岩提供了物质来源。②威远地区的巨型穹隆背斜构造为氦气富集的有利构造。③油气运移过程中的烷烃气的载体作用有利于氦气成藏(陶小晚等, 2019)。

2 四川盆地及周缘地区氦气富集地质条件

2.1 氦气富集地质条件

研究表明, 已发现的含氦天然气藏中氦以壳源为主, 是由 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 通过 α 衰变产生的(李玉宏等, 2017)。此外, 学者认为少量沟通花岗岩基底的深大断裂为氦气运移提供了有利通道(张健等, 2015; 李玉宏等, 2017)。因此, 放射性有关的富 U 、 Th 地质体和沟通基底的深大断裂均值得重点关注

(顾延景等,2022;张乔等,2022)。四川盆地及周缘地区发育多层位富U、Th泥页岩、多类型的铀矿床(层)和大量深大断裂,具有较好的氦气生成的地质条件。

2.1.1 富铀、钍泥页岩发育

四川盆地及周缘地区富铀、钍泥页岩分布广、层位多,其主要为黑色页岩或煤系地层,包括下寒武统牛蹄塘组、上奥陶统一下志留统五峰组—龙马溪组、上二叠统龙潭组、下侏罗统自流井组(大安寨段)等。其中,牛蹄塘组黑色页岩常发育镍、铜、金、钼、铀等多金属矿产,其形成主要与热液活动有关(Han et al.,2017),这些高温热液矿物中的铀可能为牛蹄塘组黑色页岩形成氦气资源提供重要的物质基础;五峰组—龙马溪组的高自然伽马(GR)层段主要分布在五峰组—龙马溪组界线附近,GR测井曲线值最高300~320 API,Th/U值小于0.5,指示高GR峰是由于铀元素富集主导形成(王冠平等,2018);四川盆地及周缘地区龙潭组底部(古风化壳铝土岩为主)常见有放射性异常,表现为煤系地层底部含黄铁矿黏土岩自然伽马异常,其主要是由放射性元素铀引起(周晓林等,2017)。四川盆地侏罗系自流井组大安寨段厚20~80 m,岩性为黑色页岩夹介壳灰岩,主要分布于川中—川东北地区,含植物化石的黑色页岩普遍具较高自然伽马(何绪全等,2021),推测和浅湖—半深湖相泥页岩中黏土矿物对铀、钍等放射性元素的吸附作用有关。

2.1.2 铀矿层众多

四川盆地及周缘地区已发现众多中、小型铀矿床,铀矿(化)点、异常点类型多样,有砂岩型、碳硅泥岩型、花岗岩型、磷块岩型和碱性岩型等五类工业铀矿化类型,据报道该区域已提交了一定数量的铀矿资源量(郭宁等,2012)。四川盆地及周缘具有铀矿形成的良好条件和背景,铀矿找矿潜力巨大(宋昊等,2011),川北(砂岩型铀矿)、川西若尔盖(热液型—碳硅泥岩型铀矿)、云南腾冲(热液型—砂岩型铀矿)、临沧(花岗岩型铀矿)和黔中(碳酸盐岩型铀矿)等均是典型铀矿分布区(郭宁等,2012)。此外,四川盆地及周缘还是汞、锑、砷(雄、雌黄)、金、铅锌、重晶石、萤石等多种低温热液矿床的集中分布地带(王华云等,1997),铀矿与众多低温成矿元素之间具有密切的共伴生成矿关系(宋昊等,2011),如在黔、渝等地的低温热液矿床中含铀(王华云等,1997;宋昊等,

2011),已在贵州发现碳酸盐岩型矿床、矿(化)点100余个及沿区域断裂带呈群呈带展布的异常带(区)和异常点近2万个(王贵玲等,2017)。

四川盆地周缘造山带花岗岩等富铀基底岩石可提供外部铀源,并作为蚀源区为盆地赋铀沉积岩层提供物质基础。李富等(2015)研究指出,川北—川西地区存在航磁异常(图3)。川西地区构造运动强烈,岩浆活动频繁,从加里东期到喜山期均有岩浆活动,以印支期最为强烈,具备形成花岗岩型铀矿的基本地质条件(解波等,2016)。研究显示四川盆地及周缘地区前震旦系结晶基底和古生界褶皱基底变质岩系的铀含量高,为 $3.6 \times 10^{-6} \sim 16.0 \times 10^{-6}$ (贾立城等,2014)。基底铀矿床(点)含铀建造主要类型有:含铀磷建造、含铀碳质(笔石)页岩建造、含铀煤建造、含铀碳酸盐建造、含铀盐溶角砾岩建造和中性酸性火山岩建造(邓祖林等,2015)等6类。这6类含富铀岩体在四川盆地及周缘地区分布广泛。因此,综上所述区内富铀岩体资源好,也表明与之有关的氦气形成基础条件较好。

2.1.3 深大断裂发育,温泉与热液矿物显示丰富

四川盆地及周缘地区伴随着中、新生代青藏高原构造隆升活动,板块拼合形成了秦岭、金沙江—哀牢山、怒江、龙木错—双湖和昌宁—孟连等多条缝合带,同时造就了众多的深大断裂,其为深源(幔源及壳源)氦气上涌提供了通道。四川盆地内发育北东—南西向及北西—南东向2组深大断裂通常,其作为输导体系是天然气得以富集的主控因素之一,大中型气田分布与基底断裂有一定关系(熊观等,2020;洪太元等,2021),同样对氦气的局部富集起到了促进作用。例如,深大断裂对于威远地区天然气中氦气的富集起到有利促进。威远气田东邻华蓥山深大断裂带,西靠龙泉山深大断裂带,南为威远基底断裂,内部断层发育(图4),大部分地表断层切穿震旦系进入基底,而震旦纪地层正好处于深部断裂的交会地带(王先彬,1982;张虎权等,2005),为氦气向上运移提供了良好的通道(张虎权等,2005)。

3 四川盆地及周缘氦气资源潜力分析

四川盆地多套天然气层系新发现气藏规模继续扩大,良好的气藏发育也为氦气成藏提供了良好的载体条件。经过50多年的工业性勘探开发,四川盆

地发现了 27 个大中型气田,主要分布在二叠系和三叠系,以孔隙型、裂缝-孔隙型气藏为主,大中型气田在平面上具有成群分布特征,目前已在川东、川西含

气区发现了环开江-梁平陆棚长兴-飞仙关组、川东石炭系、川西三叠系须家河组-侏罗系等多个大型气田群。

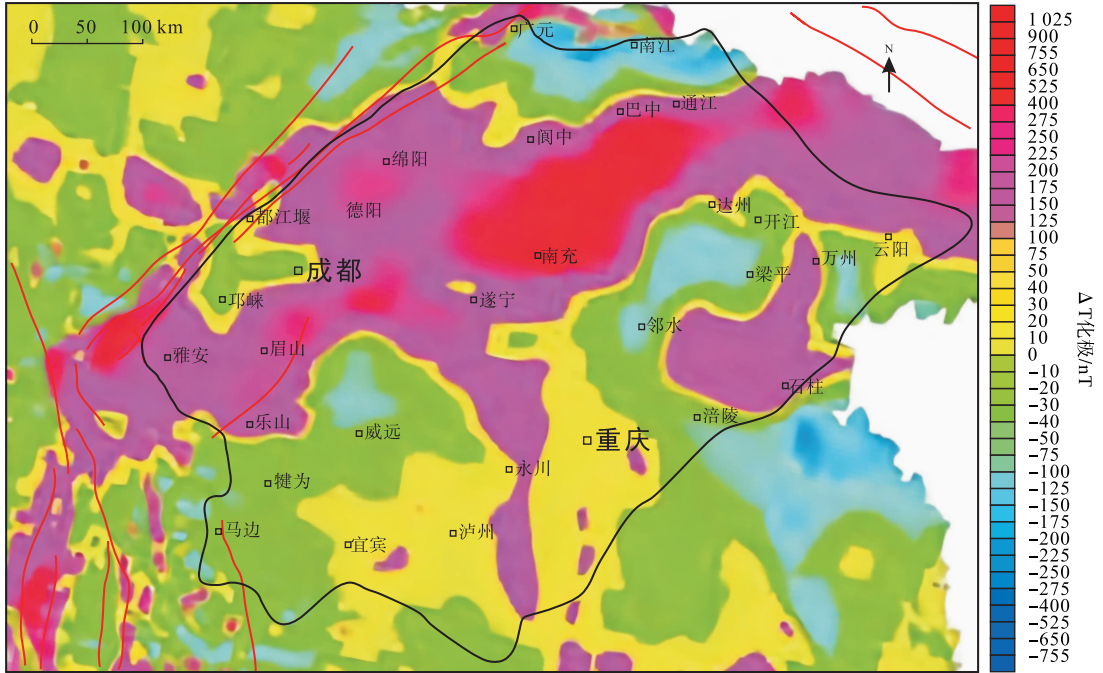


图 3 四川盆地及周缘航磁异常分布图 (据李富等,2015 修编)

Fig. 3 Aeromagnetic anomaly distribution map in Sichuan basin and its surrounding areas

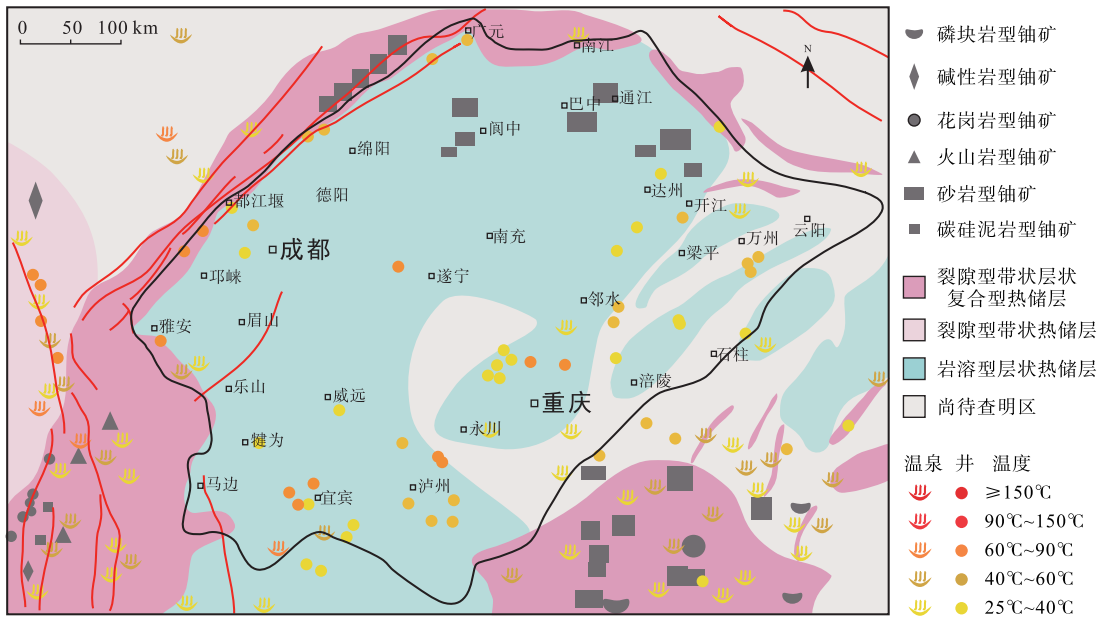


图 4 铀矿、地热温泉与深大断裂叠合图(数据引自郭宁等,2012;王贵玲等,2017)

Fig. 4 Distribution maps of uranium deposits, geothermal hot springs and deep faults

四川盆地及周缘地区页岩气藏初具规模,这些大厚度的泥页岩通常是海平面位于高位时的浅海-半深海沉积,可与非常规天然气储层重合,全区分布的大厚度泥页岩包括:下寒武统牛蹄塘组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、中志留统韩家店组、上二叠统龙潭组、下三叠统飞仙关组等。其累积厚度通常大于100 m,还具有压实作用强、岩性致密、突破压力高等特点,为形成良好的含氦天然气藏提供了基础。此外,研究区古生界致密灰岩及中下寒武统、中下三叠统膏岩盐也分布广泛,且厚度大,可对氦气保存起到重要作用。

随着页岩气勘探与开发得到重视,四川盆地周缘地区古生界黑色页岩层位得到重视,已有多口探井涉及牛蹄塘组、五峰组、龙马溪组页岩气。研究认

为,泥页岩中的氦气生成速率明显高于其他岩类(蒙炳坤等,2021),按照页岩中残余的氦气为页岩中U、Th元素衰变释放出来氦气的80%计算,五峰组-龙马溪组页岩中氦气的产量可达到 $5.21 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{t}$ 。实钻发现,贵州丹寨地区(贵丹地1井)牛蹄塘组碳质页岩气中氦气含量较好,达到0.22%(淡永等,2021),预示着牛蹄塘组氦气探勘开发的良好前景。

四川盆地及周缘地区多处地热水中氦气显示明显,是氦气资源勘探的重要方向。如云南安宁、盘溪等地地热或温泉(井)水溶气中见氦气含量大于0.1%的样本,尽管幔源氦在水溶气中形成工业聚集难度较大(陶小晚等,2019),但也可以在一定程度上可对氦气成藏起到积极作用。因此,图5中多因素叠合区域川西-川南-黔北地区可能是氦气的富集区。

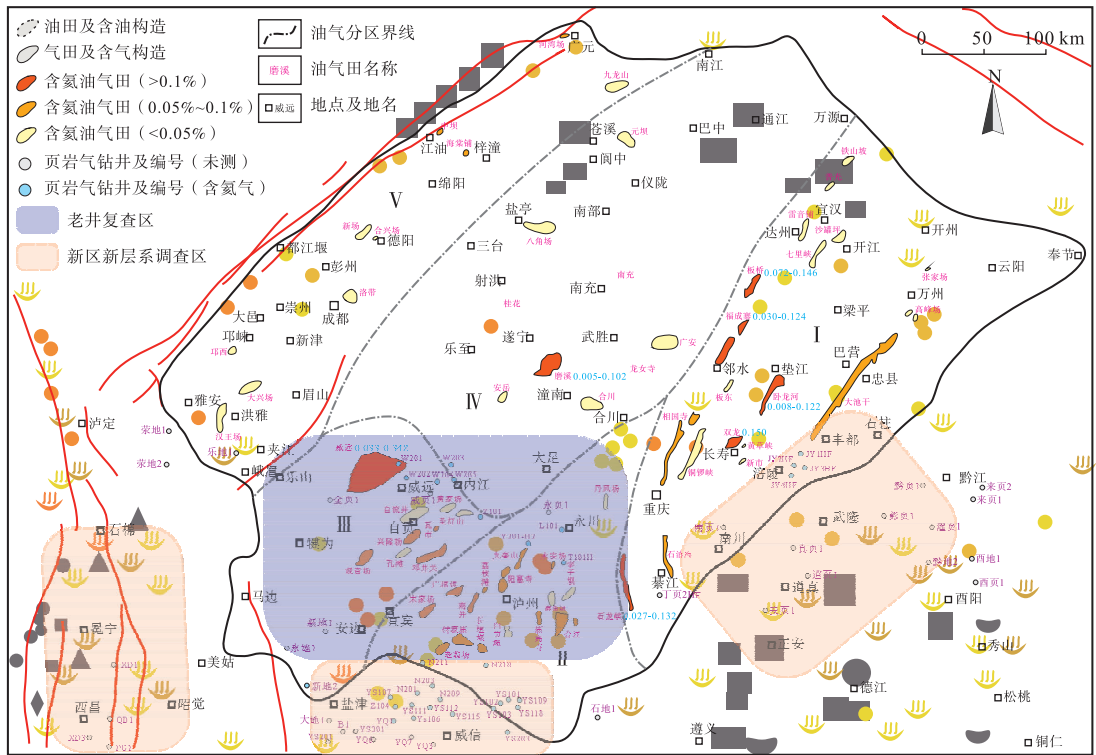


图5 四川盆地及周缘含氦天然气调查类型分布图

Fig. 5 Survey types and distribution of helium-bearing natural gas in Sichuan basin and its surrounding areas

4 四川盆地氦气资源调查面临的主要问题及未来勘探方向

4.1 氦气资源调查面临的主要问题

(1) 氦气成藏研究仅在威远气田有所涉及,成藏

理论研究薄弱。作为国内曾经唯一商业性提氦利用的天然藏,前人对威远气田的氦气成藏机理开展了初步研究(徐永昌等,1989;戴金星,2003;张虎权等,2005;梁霄等,2016),但认识还不系统,亟需进一步深化。对涪陵、丹寨等地含氦页岩气目前仅有少量氦气含量数据,其成藏机理还未有研究涉及,关于

氦源岩有效性评价、氦气初次运移效率和控制因素、二次运移载体气成分及运移机制、氦气成藏保存机制等方面依然存在诸多亟待解决的问题。

此外,氦是扩散运移能力最强的气体,因而氦气的成藏就要求更充分的动态补给,深源氦在沉积层的工业储集不仅需要有人从沉积层通达氦源的断裂体系,且这一断裂体系应当是至今仍连通氦源的活动性断裂体系,只有这样才能保证扩散性极强的氦达到动态平衡,形成工业气藏(徐永昌等,1989),推测这样的断裂体系与储盖层的紧密配合是形成氦气藏的有利条件,但相关成藏理论并未有研究涉及。

(2)氦气勘探工作程度极低,氦气资源分布与资源量亟需查清。目前对四川盆地及邻区氦气勘探仅有极为零星的报道,因资源评价方法尚未建立,勘查技术方法也不完善,尚未开展系统的氦气资源评价工作,资源家底不清。前期研究区氦气勘查程度低,现有天然气田氦气含量调查不系统,新区氦资源评价极其缺乏资料基础。局部地区富氦天然气发现点(如涪陵、丹寨页岩气)也未展开系统工作,更没有形成规模产能。

(3)相关调查评价标准与规范空白,亟需攻关研究。中国氦气资源调查评价从理论方法到技术装备均处于探索阶段,亟需在资源基础好的有利区开展示范工程,助推资源基地建设,支撑氦气成藏理论、找矿模式的、勘查技术方法等的建立,制定相关调查评价标准与规范,用以指导氦气资源调查评价。

4.2 未来勘探方向

Brown(2010)研究认为,氦气资源的富集与油气成藏的方式类似,需要有氦源岩产生氦气并运移成藏。其中,氦气主要在U和Th的放射性衰变中形成,并扩散到孔隙水中富集,通过后期运移,在气水界面处受分压降低影响使得氦气脱溶。对于中国氦气成藏的机理与模式问题,李玉宏等(2017,2022)指出氦气在生成排出以及运聚保存方面具有特殊性,需要重点研究;在氦气成藏模式方面,认为主控因素应重点考虑有效氦源岩、高效运移通道和合适的载体气藏等。此外,多位学者(魏国齐等,2014;张健等,2015;梁霄等,2016;蒙炳坤等,2021)指出,四川盆地及周缘氦气资源的富集与勘探方向需要受到重视,值得深入思考。结合前文论述,认为四川盆地及周缘氦气资源勘探方向主要如下:

(1)调查分析盆内常规天然气田和古老页岩气

藏含氦特征。尽管中国氦气商业开发处于探索阶段,但四川盆地威远气田作为商业化开发的氦气藏已有近半个世纪历史,证实了四川盆地具有氦气资源。通过对盆内及周缘在产天然气井采气测试分析,建立天然气氦气含量数据库(集),为氦气富集特征研究和资源评价奠定数据基础。

(2)结合氦气分布特征,总结氦气分布规律,建立富集模式。根据氦气含量与同位素测试结果,划分成因类型,针对不同成因类型资源部署氦气资源调查工作。以四川盆地边缘古生界高放射性页岩及含煤层系分布区、深大断裂与基底花岗岩沟通的分布区、铀矿及高含氦温泉分布区为研究对象,开展氦气含量调查与氦气富集机理综合分析。通过多种成因组合调查,认识富氦成因与分布,建立氦气富集模式,支撑不同类型氦气资源勘查。

5 结论

(1)氦气是重要的战略资源,在当前中国氦气资源供需矛盾十分突出的情况下,亟需开展相关资源评价研究,保障供应安全。

(2)四川盆地及周缘地区含氦天然气分布广泛、含气层位众多;高放射性泥页、基底花岗岩与铀矿岩层发育,具备作为氦气源岩的物质基础。

(3)目前氦气调查与评价仍面临诸多亟待解决的问题:①氦气成藏仅在威远气藏有所涉及,成藏理论不完善。②氦气勘探工作程度极低,氦气资源量与资源分布亟需查清。③相关调查评价标准与规范空缺,亟需建立。

(4)建议围绕四川盆地及周缘调查分析盆内常规天然气田和古老页岩气藏含氦特征,建立天然气含氦特征数据库(集),开展多种成因、多对象组合调查和氦气富集机理综合分析,明确富氦成因与分布。

致谢:感谢中国地质调查局西安地质调查中心李玉宏正高级工程师,中国地质调查局成都地质调查中心余谦正高级工程师及评审专家给予中肯的建议和宝贵修改意见。

参考文献(References):

戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质, 2003, 25(05):473-480.

- DAI Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gasfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(05):473-480.
- 淡水, 闫剑飞, 包书景, 等. 雪峰隆起西南缘(贵丹地1井)震旦-寒武系获多层系页岩气重大发现[J/OL]. *中国地质*:1-3 [2020-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210105.0915.004.html>
- DAN Yong, YAN Jianfei, BAO Shujing, et al. The momentous discovery of Sinian-Cambrian multi-tier shale gas in Guidandi-1 well of southwest margin of Xuefeng uplift [J/OL]. *Geology in China*:1-3 [2020-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210105.0915.004.html>
- 邓祖林, 林洋, 晏中海, 等. 四川盆地基底铀矿床(点)含铀建造研究[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1):280.
- 顾延景, 张保涛, 李孝军, 等. 济阳拗陷花沟地区氦气成藏控制因素探讨——以花501井为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(03):257-266.
- GU Yanjing, ZHANG Baotao, LI Xiaojun, et al. Discussion on Helium Resource Accumulation Mechanism in Huangou Area of Jiyang Depression: Taking Well Hua 501 as an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(03):257-266.
- 郭宁, 孙泽轩, 康友纯. 西南地区铀资源勘查突破方向研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(01):23-29.
- GUO Ning, SUN Zexuan, KANG Youchun. Breakthrough direction of prospecting uranium resources in southwest China[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(01):23-29.
- 何绪全, 黄东, 赵艾琳, 等. 川中地区大安寨段页岩油气储层测井评价指标体系[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(3):129-137.
- HE Xuquan, HUANG Dong, ZHAO Ailin, et al. Well-logging evaluation index system of shale oil and gas reservoir of Da'anzhai member in central Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(3):129-137.
- 洪太元, 程喆, 许华明, 等. 四川盆地大中型气田形成的主控因素及勘探对策[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(03):406-414.
- HONG Taiyuan, CHENG Zhe, XU Huaming, et al. Controlling factors and countermeasures for exploring large and medium-sized gas fields in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(03):406-414.
- 贾立城, 刘武生, 李晓翠, 等. 川北地区铀成矿特征与成矿预测[J]. *铀矿地质*, 2014, 30(03):161-167.
- JIA Licheng, LIU Wusheng, LI Xiaocui, et al. Uranium Mineralization Feature and Metallization Prognostication in North Sichuan[J]. *Uranium Geology*, 2014, 30(03):161-167.
- 景小燕, 张小青, 高蕾, 等. 元坝气田长兴组生物礁储层特征及主控因素研究[J]. *西北地质*, 2021, 54(3):188-197.
- JING Xiaoyan, ZHANG Xiaoqing, GAO Lei, et al. Research on the Reservoir Characteristics and Controlling Factors of the Changxing Formation Reef in Yuanba Gas Field of Sichuan[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3):188-197.
- 李富, 王永华, 曾琴琴, 等. 西南地区航磁区域特征[J]. *物探与化探*, 2015, 39(01):84-94.
- LI Fu, WANG Yonghua, ZENG Qinqin, et al. Aeromagnetic regional characteristics in southwest China [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(1):84-94.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 氦气资源评价相关问题认识与进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2022a, 44(03):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*, 2022a, 44(03):363-373.
- 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*, 2022b, 55(3):233-240.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and Development Status of World Helium Resources and Its Implications for China[J]. *Northwestern Geology*, 2022b, 55(3):233-240.
- 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]. *Jilin Daxue Xuebao(Diqiu Kexue Ban)/Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(S1):47-53.
- 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(04):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(04):565-572.

- 梁霄, 刘树根, 夏铭, 等. 四川盆地威远构造震旦系灯影组气烟囱特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(05):702-712.
- LIANG Xiao, LIU Shugen, XIA Ming, et al. Characteristics and geological significance of gas chimney of the Sinian Dengying Formation in the Weiyuan Structure, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(05):702-712.
- 刘超, 孙蓓蕾, 曾凡桂, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石西区块含氦天然气的发现及成因初探[J]. 煤炭学报, 2021, 46(04):1280-1287.
- LIU Chao, SUN Beilei, ZENG Fangui, et al. Discovery and origin of helium-rich gas on the Shixi area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4):1280-1287.
- 刘建朝, 李荣西, 魏刚峰, 等. 渭河盆地地热水水溶氦气成因与来源研究[J]. 地质科技情报, 2009, 28(06):84-88.
- LIU Jianchao, LI Rongxi, WEI Gangfeng, et al. Origin and source of soluble Helium gas in geothermal water, Weihe Basin [J]. Geological Science Information, 2009, 28(6):84-88.
- 刘全有, 戴金星, 金之钧, 等. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 2009, 83(01):107-114.
- LIU Quanyou, DAI Jinxing, JIN Zhijun, et al. Geochemistry and Genesis of Natural Gas in the Foreland and Platform of the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(01):107-114.
- 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(04):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.
- 宋昊, 徐争启, 倪师军, 等. 中国西南大面积低温成矿作用与铀矿成矿关系初探[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1):289-290.
- 孙玮, 刘树根, 王国芝, 等. 四川威远震旦系与下古生界天然气成藏特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(5):481-489.
- SUN Wei, LIU Shugen, WANG Guozhi, et al. Characteristics of gas formatted from Sinian to Lower Paleozoic in Weiyuan area of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science and Technology Edition), 2010, 37(5):481-489.
- 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氦储量的发现:和田河气田[J]. 地球科学, 2019, 44(03):1024-1041.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium Resources and Discovery of First Supergiant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. Earth Science, 2019, 44(03):1024-1041.
- 王冠平, 朱彤, 王红亮, 等. 川东南地区龙马溪组底部海相页岩高GR峰沉积成因探讨[J]. 沉积学报, 2018, 36(06):1243-1255.
- WANG Guanping, ZHU Tong, WANG Hongliang, et al. Study on the Sedimentogenesis of the High GR Peak Strata at the Bottom of the Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(06):1243-1255.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(04):449-459.
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4):449-459.
- 王华云, 陈继锡. 贵州丹寨、三都、都匀地区低温成矿系列的成矿物质来源和分异条件[J]. 矿物学报, 1997, 17(04):491-500.
- WANG Huayun, SHI Jixi. Sources of ore-forming materials and controls over depositional differentiation in the epithermal mineralization series in the Danzhai-Sanduduyun area of Guizhou province[J]. Acta Mineral Sinica, 1997, 17(04):491-500.
- 王茜, 黄永建, 张治锋, 等. 上扬子地区双河露头五峰组—龙马溪组下段化学层序地层分析[J]. 西北地质, 2021, 54(1):1-14.
- WANG Qian, HUANG Yongjian, ZHANG Zhifeng, et al. Chemical Sequence Stratigraphy of the Wufeng Formation-lower Member of Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, upper Yangtze [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1):1-14.
- 王先彬. 地球深部来源的天然气[J]. 科学通报, 1982, 27(17):1069-1071.
- 魏国齐, 王东良, 王晓波, 等. 四川盆地高石梯—磨溪大气田稀有气体特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(05):533-538.
- WEI Guoqi, WANG Dongliang, WANG Xiaobo, et al. Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti-Moxi gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5):533-538.
- 件宗涛, 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.
- 解波, 孙泽轩, 杜小林, 等. 川西花岗岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 铀矿地质, 2016, 32(02):72-78.
- XIE Bo, SUN Zexuan, DU Xiaolin, et al. Metallogenic Conditions and Prospecting Direction of Granite-type Uranium Deposits in Western Sichuan Province[J]. *Uranium Geology*, 2016, 32(02):72-78.
- 熊观, 段威, 唐文春, 等. 川西北银厂金矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 86-98.
- XIONG Guan, DUAN Wei, TANG Wenchun, et al. On the Geochemical Characteristics and Genesis of the Yinchang Gold Deposit in Northwestern Sichuan Province [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 86-98.
- 徐永昌, 沈平, 李玉成. 中国最古老的气藏-四川威远震旦纪气藏[J]. 沉积学报, 1989, 7(4):3-13.
- XU Yongchang, SHEN Ping, LI Yucheng, et al. The Oldest Gas Pool of China-Weiyuan Sinian Gas Pool, Sichuan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(4):3-13.
- 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 Jinxing[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(7): 4-7.
- 张健, 杨威, 易海永, 等. 四川盆地前震旦系勘探高含氢天然气藏的可行性[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, Sichuan 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(03):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(03): 241-256.
- 张云鹏, 李玉宏, 卢进才, 等. 柴达木盆地北缘富氦天然气的发现——兼议成藏地质条件[J]. 地质通报, 2016, 35(Z1):364-371.
- ZHANG Yunpeng, LI Yuhong, LU Jincai, et al. The discovery and origin of helium-rich gas on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(Z1):364-371.
- 张哲, 王春燕, 王秋晨, 等. 中国氦气市场发展前景展望[J]. 油气与新能源, 2022, 34(01):36-41.
- ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Development Prospects of China's Helium Market[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(01):36-41.
- 张子枢. 四川盆地天然气中的氦[J]. 天然气地球科学, 1992, (04):1-8.
- 周晓林, 代迪, 苟熠, 等. 煤田测井资料在圈定黔北煤系铀矿靶区中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(06): 159-163.
- ZHOU Xiaolin, DAI Di, GOU Yi, et al. Application of coalfield logging data in prospecting target area of uranium deposit in coal measures in northern Guizhou[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(06):159-163.
- Bräuer K, Geissler W H, Kämpf H, et al. Helium and carbon isotope signatures of gas exhalations in the westernmost part of the Pannonian Basin(SE Austria/NE Slovenia): Evidence for active lithospheric mantle degassing[J]. *Chemical Geology*, 2016, 422:60-70.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[R]. New Orleans, AAPG, 2010.
- Cao C, Zhang M, Tang Q, et al. Noble gas isotopic variations and geological implication of Longmaxi shale gas in Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 38-46.
- Han T, Fan H, Zhu X, et al. Submarine hydrothermal contribution for the extreme element accumulation during the early Cambrian, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86:297-308.
- Keller W E. Helium-3 and helium-4[M]. New York: Plenum Press, 1969.
- Liu Q, Zhu D, Jin Z, et al. Effects of deep CO₂ on petroleum and thermal alteration: The case of the Huangqiao oil and gas field[J]. *Chemical Geology*, 2017, 469:214-229.
- Ni Y, Dai J, Tao S, et al. Helium signatures of gases from the Sichuan Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74:33-43.