

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.001

氦气资源调查理论与技术研究现状及建议

李玉宏¹, 张国伟^{2,*}, 周俊林¹, 李济远³, 吕鹏瑞¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;
3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要:氦气是关系国家安全和高新技术产业发展的重要关键性稀有气体资源,在国防和高科技领域不可或缺,是中国进一步走向“深空、深海、深地、深蓝”领域重要的基础原材料。当前,氦气资源已成为中国的“卡脖子”资源之一,开展氦气资源调查理论与技术研究,指导和支撑中国氦气资源勘查,已成为中国资源调查领域最为紧迫的任务之一。目前工业利用的氦资源主要是壳源氦气,其“弱源成藏”与“异源同储”机制的特殊性,导致与常规油气成藏具有重大差别。笔者根据氦气资源调查理论与技术研究现状,结合氦气成藏的特殊性,提出了亟需攻关的理论、技术问题和相关研究思路建议,供业内工作者参考、借鉴。

关键词:氦气资源;成藏理论;勘探技术;研究建议

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)04-0001-10

Research Status and Suggestions on Helium Resource Investigation Theory and Technology

LI Yuhong¹, ZHANG Guowei^{2,*}, ZHOU Junlin¹, LI Jiyuan³, LÜ Pengrui¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Helium is an important strategic rare gas resource for national security and the development of high and new technology industries. It is essential for national defense and high technology, which is an indispensable raw material for China's further development in the fields of "deep space, deep sea, deep earth and deep blue". At present, helium has become a "bottlenecks" resource in China. Theoretical and technical research on helium resource survey has become one of the most urgent tasks in the field of resource investigation in China to guide and support the investigation of helium resources in China. Industrial extraction of helium resources is currently primarily of crustal origin. Industrial extraction of helium resources is currently primarily of crustal

收稿日期:2022-07-18; **修回日期:**2022-09-05; **网络发表日期:**2022-11-15; **责任编辑:**姜寒冰

基金项目:国家重点研发计划“富氢天然气成藏机制及氦资源分布预测技术-复杂地质介质中氦气运聚及富氦气藏封盖机制研究”(2021YFA0719003)、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:**张国伟(1939-),男,中国科学院院士,主要研究方向为构造地质学、大陆构造与大陆动力学、前寒武纪地质学。
E-mail: gwzhang@nwnu.edu.cn。

tal origin. The special characteristics of the “weak source reservoir” and “multiple source co-storage” mechanisms lead to significant differences from conventional hydrocarbon reservoirs. This article presents the theoretical and technical issues that need to be tackled and the relevant research proposals based on the current status of theoretical and technical research on helium resource investigation and the special characteristics of helium reservoir formation.

Keywords: helium resources; accumulation theory; exploration technique; proposa

氦气广泛应用于国防和高技术领域,在航天、国防和高端能源系统,半导体和光纤制造等工业领域,医学成像与深潜水等民生领域应用广泛且不可替代(李玉宏等,2018;贾凌霄等,2022),是关系国家安全和高新技术产业发展的重要战略资源,在“深空、深海、深地、深蓝”等领域具有重要作用。

自 20 世纪 80 年代以来,全球氦气资源长期短缺,供需矛盾突出,特别是中国氦气年需求量近 3 000 万 m^3 ,但其年产量不足 100 万 m^3 ,严重依赖进口。近年来,中国发现的可供工业开发的氦气资源量极少,氦气的生产和供应水平远远不能满足科学技术和经济发展的需求,但中国具有氦气成藏地质条件与资源潜力,深入研究氦气成藏与勘探理论、技术,寻找氦气资源是中国资源调查领域最为紧迫的任务之一。目前,我们对氦气成藏的特殊性缺乏足够认识,常规油气地质理论不能很好地解释氦气成藏机制,氦气资源调查缺乏理论指导,天然气勘探过程中在点上发现的氦气无法形成规模,且其找氦模式难以推广,亟须深入研究氦气成藏理论和评价技术,指导氦气资源调查。此外,可以利用氦气等稀有气体的化学惰性为壳幔流体示踪及防灾减灾、环境污染过程等研究提供服务。

1 氦气研究现状

氦气在壳幔流体示踪领域得到广泛研究和应用,但氦气成藏研究相对薄弱,氦气成藏研究的经典成果是 Brown(2010)在 AAPG 会议上发表的“高氦天然气的形成:勘探指南”。20 世纪末,中国学者对氦气等稀有气体研究成果进行了学习引进(王先彬,1989;孔令昌,1997;徐永昌,1998),并以流体示踪为重点开展了系统的氦气及其同位素研究,取得了大量重要成果(徐永昌等,1994,1996a,2003;戴金星等,1995;陶明信等,2001)。上述专家及其他学者(郭念发,1999;冯子辉等,2001;付晓飞等,2005)对

不同地区的氦气资源进行了初步评价。

2003 年以来,中国地质调查局西安地质调查中心在渭河盆地(卢进才等,2005;李玉宏等,2011,2015,2016;韩伟等,2014)和柴达木盆地(张云鹏等,2016;韩伟等,2020)持续开展了氦气资源调查,提出壳源氦气“弱源成藏”认识,总结了“有效氦源岩、高效运移通道、载体气藏”是氦气成藏的基本条件(李玉宏等,2017a,2017b,2018),并利用稀有气体示踪方法研究了氦气聚集(Zhang et al.,2019a,2019b)。近年来,国内其他学者也开展了大量的氦气研究(杨振宁等,2018;张雪等,2018;陶小晚等,2019;张晓宝等,2020;韩元红等,2021;陈践发等,2021;刘超等,2021;何发岐等,2022;彭威龙等,2022;Liu et al.,2022),氦气资源的发现明显加快,塔里木盆地巴楚隆起、柴达木盆地西、北缘、鄂尔多斯盆地北缘等都有新发现(图 1)。

近年来,由于氦气价格上涨与美国氦气储量下降,国外氦气勘探与氦气成藏研究也变得火热。Danabalan 等(2022)总结了目前氦气勘探的主要原理;Halford 等(2022)报道了美国科罗拉多高原的古生界发现了氦含量大于 0.3% 的氦气田,并分析了氦气成藏过程;Tyne R L 等(2022)以 Paradox Basin 为例分析了盆地结构和地下水演化对氦气分布的控制作用;Helium One 公司在坦桑尼亚大裂谷发现储量可观的氦气资源(Danabalan et al.,2016,2022;Hand et al.,2016;Mtili et al.,2021),探索了坦桑尼亚西南部气田富氦原因;俄罗斯东西伯利亚、美国德克萨斯、南非威特沃特斯兰德盆地都开展了氦气勘探与研究(Brown,2019;Sivtsev et al.,2020;Karolyt et al.,2022)。

1.1 氦气理论研究现状

氦气的成因主要有 2 种认识,一种是幔源氦气,另一种是放射性成因壳源气。氦气具有 ^3He 、 ^4He 2 种稳定同位素,其中,目前工业利用的氦气主要是 U、Th 元素的放射性衰变形成的 ^4He 。壳源氦和幔

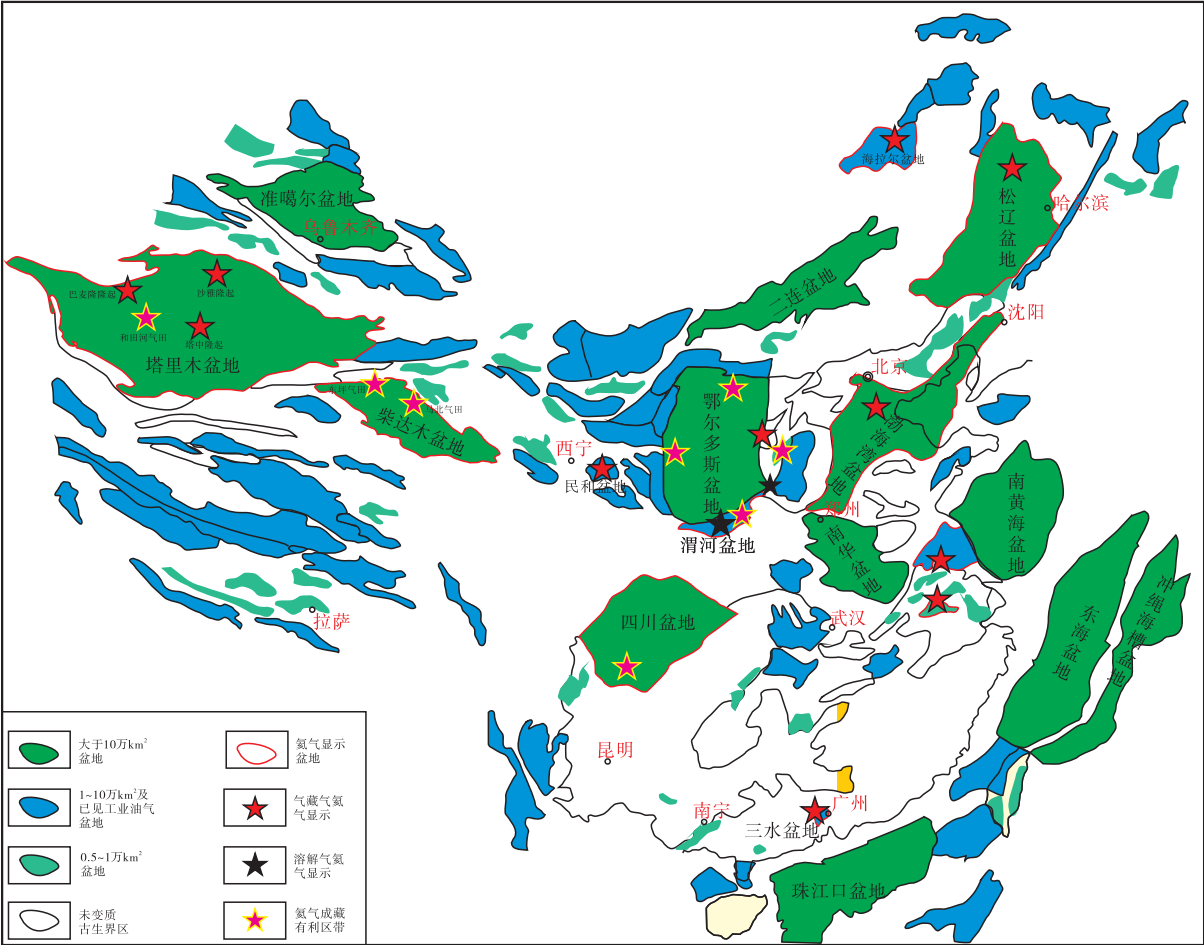


图 1 中国氦气资源发现情况示意图

Fig. 1 Schematic showing that helium resources understanding of exploration in China

源氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值差别较大,壳源氦气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般取 2.0×10^{-8} ,幔源氦气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值取 1.1×10^{-5} (王先彬等,1992,1993;徐永昌等,1994,1996b)。因此,通过 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值可以有效判别氦气来源。

氦气成藏过程与油气虽有相似性,但也有明显的差异。氦气的“弱源性”是影响其成藏过程与天然气(烃类)差异的最重要因素,决定了氦气只能是烃类等载体气的伴生气,其成藏与天然气(载体气)密切相关(李玉宏等,2022a)。富氦气藏形成需要有载体气藏的存在,还必需要有富U、Th且贫有机质的岩类作为氦源岩,以避免氦气被过度稀释。

U、Th以微量元素广泛赋存于岩石中,盆地基底、岩体、盆地沉积地层都可成为潜在的氦源,但多数地质体都是“贫乏”的氦源岩(Ballentine et al., 2002a; Brown, 2010; Danabalan, 2017; 张文等, 2018; 张乔等,

2022)。铀矿之外,花岗岩类(酸性岩)U、Th含量较高;与花岗岩相比,普通砂岩生氦潜力小,而富有机质泥页岩(烃源岩)中U、Th含量高于花岗岩。Brown(2010)通过计算,认为生烃潜量2 mg/g的页岩成熟后产生的甲烷是其10亿年产生氦气的3 000倍。在没有外部氦源的情况下,难以形成氦气富集;富氦天然气的形成需要再配备生氦能力较好,且不生烃或弱生烃的外部氦源,例如花岗岩、铝土岩等(图2)。蒙炳坤等(2021)对上扬子地区不同类型岩石生氦潜力进行了评价;秦胜飞等(2022)提出了“多源供氦、主源富氦”的认识。李济远等(2022)对华北地区本溪组铝土岩的生氦能力的研究表明,铝土岩的U、Th含量高于花岗岩,生氦速率仅次于烃源岩,由于时代较老,单位体积生氦总量好于鄂尔多斯盆地长7烃源岩和渭河盆地花岗岩。可见,铝土岩系是优质氦源岩。氦源岩具有分布的广泛性,但是

目前对氦气成藏有重要贡献的有效氦源岩缺乏具体评价标准。

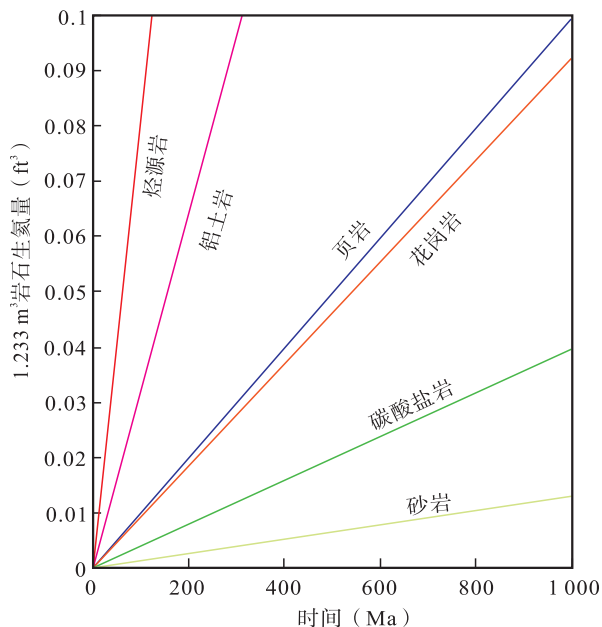


图2 不同岩石生氦速率(李济远,2022 修改)

Fig. 2 The helium generation rate of different rocks
(Modified from Li jiyuan,2022)

总体而言,地质体中 U、Th 等氦源元素丰度低,半衰期极长,生氦速率极低,不存在生气高峰,突破“压力封存箱”的大规模集中排气而形成气柱,在浮力驱动下进入圈闭形成氦气藏的情况难以发生,属典型的“弱源气”(图 3)(李玉宏等,2017a,2018)。氦气生成的“弱源性”决定了其成藏的特殊性,优质氦源岩是形成富氦气藏的物质基础。

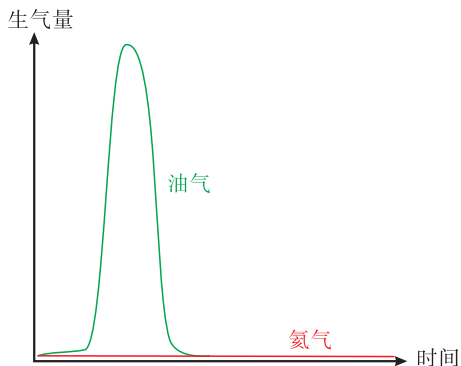


图3 油气与氦气生成过程差异示意图

Fig. 3 Difference between the processes of hydrocarbon and helium generation

在氦气释放机理方面,Ballentine 等(2002a)认为氦气可通过 α 辐射、扩散、裂隙和矿物重结晶而从源岩中释放出来。封闭温度也是控制氦气从源岩中释放的重要因素(Farley,2000;张文,2019;Zhang et al.,2020),相同条件下不同矿物对 He 的保存能力不同(张东亮等,2011)。

在氦气运聚方面,由于地壳中氦气含量低,氦气不能单独形成连续流体,因此氦气的运移依靠地下流体(Ballentine et al.,2002a)。Ballentine 等(2002b)认为美国 Hugoton—Panhandle 气田的氦气是通过地下水而运移的。Brown(2010)认为矿物产生的 He 首先溶于孔隙水,当有载体气经过时,载体气中氦气分压低,氦气便会脱溶进入载体气而随其运移至气藏。李玉宏等(2017a,2022b)建立了渭河盆地氦气弱源成藏模式。可见,氦气的运聚与其他地下流体关系密切。

在氦气的保存方面,由于氦气是自然界已知最小的物质(H_2 为双原子),但作为广泛发育的泥页岩盖层,其孔径大于氦气分子直径,当盖层中没有其他流体时,不仅无法封闭氦气,也不能封闭 CH_4 、 CO_2 等气体。而泥页岩盖层一般都亲水,气体以游离态散失必需克服毛管力。可见,游离态氦气的封堵机制与载体气相似。气体分子扩散是永恒的,但气藏气扩散主要通过盖层孔隙水实现。气藏中氦的低分压,保障了氦气难溶于盖层水中,减缓了扩散(李玉宏等,2022a)。

1.2 氦气勘查技术与提氦技术现状

在氦气勘查技术方面,国内外学者均做了一些探索,并取得了较为显著的成效。例如,2009 年以来,中国地质调查局西安地质调查中心初步探索了地质指方向,地震、重力、电法探结构,磁法识别磁性岩体、化探圈定异常、气测录井标定富集层段的氦气调查技术方法(李玉宏等,2017a,2017b,2022c),但该方法不够系统、缺少勘查验证。2016 年以来,牛津大学 Chris Ballentine 和杜伦大学 Danabalan D 等在坦桑尼亚地区开展氦气勘探,探索了氦气勘探方法,实现了独立于油气勘探的氦气找矿,并初步发现了坦桑尼亚氦气田(Danabalan D,2016,2017; Danabalan D et al.,2022)。

关于提氦的技术方法,目前工业氦气生产主要通过富氦天然气提氦和液化天然气(LNG)尾气联产提氦等 2 个途径来实现。低温冷凝法(深冷法)是

氦气提纯的有效手段,其他提氦方法还有吸附法、吸收法、扩散法、膜渗透法等。深冷法是目前各国从天然气中提取氦气广泛采用的方法,联合提氦技术和联产提氦工艺正在得到广泛应用(李玉宏等,2022c)。

2 氦气调查亟需解决的关键问题

2.1 氦源岩与资源量评价

目前工业利用的壳源氦气资源基本来源于U、Th元素的放射性衰变。地质体中U、Th等氦源元素丰度极低,半衰期极长,按现在油气地质理论难以达到有效源岩标准。然而,花岗岩、铝土岩等作为重要的氦源岩,其生氦潜力、控制因素尚不明确,尚未建立有效的氦源岩识别方法、评价参数体系及参数标准。

2.2 氦的运移

氦的初次运移:氦气在氦源岩中形成后从矿物中释放的动力和方式、不同矿物封闭温度是否受到地层压力和其他因素影响,U、Th赋存状态对氦气初次运移的影响等问题认识还不深入,氦气初次运移过程有待进一步细化。

氦气二次运移聚集成藏:无机成因氦气与有机成因烃类气体分别来自不同源岩,其异源同储过程的运移载体、相态、动力及气水界面溶解交换机理和效率尚处在理论研究阶段,需开展实验加以明确,并通过勘查实践进行验证。

2.3 氦气保存

氦气的分子直径仅0.26 nm,远小于作为泥页岩盖层的纳米级孔喉直径(以30~100 nm为主),也小于低演化程度的柴达木盆地北缘绿草山侏罗系页岩的微孔孔径(0.4 nm以上)(邹才能等,2014;李玉宏等,2022c)。虽然从盖层类型、压力异常、基底与盖层氦通量差等方面对氦气保存进行初步研究,但在地层条件下,盖层保存伴生于载体气(CH_4 等)中的氦气的形成机制需进一步认识。 CO_2 对氦气保存和富集的作用需加强研究。

2.4 非常规天然气富氦规律和主控因素

非常规天然气(页岩气、煤层气)相较于常规天然气资源量更为丰富,勘探开发潜力较大。近年来,随着勘探开发技术的不断发展,中国非常规天然气产量逐年升高,未来可作为氦气勘查的重要目标之

一。全球不同类型非常规天然气中氦气含量差异较大,其中水溶气氦含量最高,属于高含氦天然气,而其他类型天然气中氦气含量不等,但整体偏低,多属于贫氦天然气。非常规天然气领域氦气富集规律、运聚成藏和主要控制因素等研究方面亦较为薄弱,有待进一步探究。

2.5 氦气资源勘探理论和技术体系

需针对氦气成藏理论、找矿模式等关键地质问题和地球物理、地球化学探测方法,以及有效测井系列和解释模型,录井、测试利用技术方法等勘查技术手段开展研究攻关,形成不同于油气的氦气勘查思路与技术方法体系。

2.6 氦气与共生资源综合利用

因为氦气的稀有性,目前利用的氦气为天然气藏的伴生气,但中国已发现的富氦天然气藏规模小、数量少。地层水水溶氦气资源量可观,但利用难度大、效益差。亟须探索不同赋存状态氦气(游离态、溶解态)、油气、地热等具成因联系的多种共生资源综合利用工艺技术,提升氦气资源保障能力和综合经济效益。

2.7 人才队伍是解决氦气勘查瓶颈的关键

氦气作为一种新型稀有资源,国内外缺乏专业调查队伍和专家团队;氦气调查研究需要分析测试体系的有力支撑,目前能够开展氦及其同位素分析的单位少,实验测试能力不足,及时有效的氦气相关分析测试难以保障。亟需分区域形成氦气测试专业实验室,支撑大规模调查取样分析工作,建设氦气成藏研究与调查评价队伍,支撑全国氦气资源调查评价工作。

3 攻关方法建议

3.1 氦气资源量评价

氦气资源量评价可参考油气成因法,根据放射性衰变原理,以氦源岩为基础进行氦气资源量评价,摸清资源家底。但是,成因法预测氦气资源量从理论、方法到参数值选取等近乎空白。因此,建议可应用地球物理资料,结合地质、钻井等资料,采用定性解释和定量拟合相结合的方式,研究隐伏氦源岩的空间分布及其属性。

通过全国氦气资源潜力评价,预测资源量,划分氦气成藏远景区和有利区带,选择具有氦气资源前

景的盆地和地区开展基础地质调查;同时与页岩气基础地质调查、铀矿资源调查、干热岩调查、深部探测等工作相结合,开展氦气兼探工作,为后续勘查开发提供基础,引油气企业在氦气远景区开展气一氦兼探,提高氦气资源保障水平。

3.2 氦气成藏富集过程研究

通过实验模拟深部地质过程,以地下水循环为纽带,水-岩-藏关系与赋存状态转换(水溶相运移、游离态聚集)为核心,源-聚-保为关键点,开展氦气成藏富集的气源条件、赋存状态、运聚机理、储集和盖层要求、圈闭与保存条件等成藏要素的基础研究,总结和深化壳源氦气弱源成藏理论,指导氦气资源调查评价。

需要开展的模拟实验主要包括:①通过地层温压下,氦与载体气竞争性溶解影响因素实验。②地层压力与现有实验室真空条件下,矿物的氦气封闭温度差异实验。③成岩温压与变质温压下,氦行为差异实验。④气藏中 CO_2 溶解于地层水中而大量消耗,可促进气藏中氦气的富集; CO_2 在封盖层的孔缝中沉淀,堵塞气体逸散通道,有利于构造改造区气藏的保存(图 4)。需通过气藏中 CO_2 气溶解消耗促进富氮的变化过程定量模拟及气藏 CO_2 “自封闭”能力对氦气保存的影响机制与作用过程模拟研究,对以上想法进行验证。

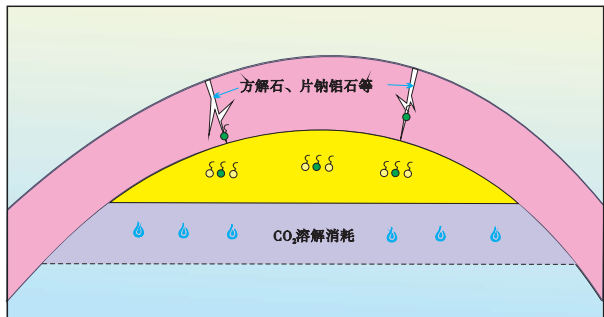


图 4 CO_2 溶解消耗与“自封闭”的富氮作用示意图

Fig. 4 Diagram of dissolved carbon dioxide depletion and self-capping helium enrichment

3.3 非常规天然气富氮规律和主控因素研究

在氦气源运聚保等研究成果基础上,结合页岩气和煤层气地质条件,分析富有机质页岩和煤系地层中 U、Th 等放射性元素的含量和地质时代,厘定有效氦气源岩体积,通过理论计算得到非常规气藏中氦气的生成量,并与实际气藏中氦气丰度的对比,

探讨有效氮与损失氮的关系。

通过分析不同性质盖层下页岩气和煤层气中的氦气含量及其对比,探讨非常规天然气中影响氦气聚集和保存效率的盖层条件。

研究外源输入氮与内源原生氮的贡献,探讨主要氮气源的类型及氦气聚集机制,揭示烃类组分影响氦气浓度的机制,探讨生烃、生氮过程与氦气浓度的协变关系,总结非常规天然气领域壳源氦气富集模式(图 5)。

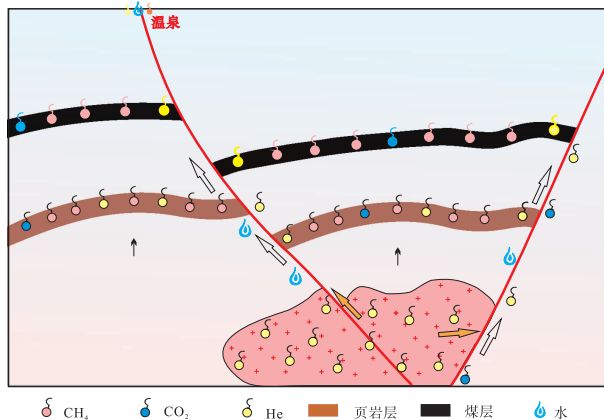


图 5 外源氮供应页岩气、煤层气模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of outer sources helium supply model for shale gas and coalbed methane

评价水溶氮资源量,研究水溶氮与气藏游离氮的转换效率与控制因素,支撑氦气富集成藏模式构建,探索促进水溶氮赋存状态转化的利用方法。

3.4 氦气资源勘查方法技术研究

深化基础地质指方向,地震、重力、电法探结构,磁法识别磁性岩体、化探异常圈定远景区、气测录井标定富集段、测井评价气层的氦气资源调查思路与方法技术。

3.5 氮提取及共生资源综合利用技术研究

进一步完善联合法氮提取、提浓、提纯工艺,形成氮与 CH_4 、 CO_2 、地热等多种资源综合利用技术方法。大力推动液化天然气(LNG)尾气等联产提氮工艺应用,探索管输气膜渗透法与深冷法联合提氮技术。

3.6 人才团队建设

以氦气成藏研究、氦气调查评价技术、氦气综合利用工艺和成果转化与服务为学科发展方向,建设氦气成藏研究与调查评价队伍,提升氦气成藏研究

与调查评价能力,支撑找矿突破。通过国际合作、联合培养、人才引进等方式,聚集国内外一流人才,形成国际一流调查研究团队。进一步拓展氦气(稀有气体)研究应用领域,建立应用氦气等稀有气体同位素进行地壳稳定性与地震风险评估、监测,服务防灾减灾,示踪壳幔流体交互作用及其构造、资源、环境意义的理论和技术方法。

4 结论

(1)氦气通常作为烃类等天然气藏的伴生气产出,专门针对氦气生成、运聚、保存的氦气成藏系统研究极少,氦气藏发现也少。

(2)氦气具有“弱源成藏”与“异源同储”的特殊机制,导致常规油气地质理论不能很好的解释氦气成藏,针对氦气的勘查技术手段基本空白

(3)亟需开展氦气资源勘查理论与方法技术攻关,建立氦气成藏理论与资源评价方法技术体系,支撑中国氦气战略资源勘查突破,促进氦气产业发展。

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.

戴金星,宋岩,戴春森,等.中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995.

DAI Jinxing, SONG Yan, DAI Chunsen, et al. Inorganic gas and its reservoir forming conditions in eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1995.

冯子辉,霍秋立,王雪.松辽盆地北部氦气成藏特征研究[J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 27-30+10-9.

FENG Zihui, HUO Qiuli, WANG Xue. A study of helium reservoir formation characteristic in the north part of Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(05): 27-30+10-9.

付晓飞,宋岩.松辽盆地无机成因气及气源模式[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 23-28.

FU Xiaofei, SONG Yan. Inorganic gas and its resource in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(04):

23-28.

郭念发,尤孝忠,徐俊.苏北盆地溪桥含氦天然气田地质特征及含氦天然气勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 24-26.

GUO Nianfa, YOU Xiaozhong, XU Jun. Geological Characteristics and Exploration Prospect of Helium-Bearing Natural Gas Field in Xiqiao, Subei Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(5): 24-26.

韩伟,李玉宏,卢进才,等.陕西渭河盆地富氦天然气异常的影响因素[J]. 地质通报, 2014, 33(11): 1836-1841.

HAN Wei, LI Yuhong, LU Jincai, et al. The factors responsible for the unusual content of helium-rich natural gas in the Weihe Basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(11): 1836-1841.

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(03): 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.

韩元红,罗厚勇,薛宇泽,等.渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 277-287.

HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and Helium Enrichment Mechanism of Geothermal Water-associated Gas in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 277-287.

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 & Experiment, 2022, 44(01): 1-10.

贾凌霄,马冰,王欢,等.全球氦气勘探开发进展与利用现状[J/OL]. 中国地质, 2022: 1-16 [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220316.1137.008.html>.

JIA Lingxiao, MA Bing, WANG Huan, et al. Global helium exploration and development progress and utilization status[J]. Geology in China, 2022: 1-16 [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220316.1137.008.html>.

孔令昌.自然界中的氦同位素[M]. 北京:专利文献出版社, 1997.

- KONG Lingchang. Helium Isotopes in Nature[M]. Beijing: Patent Literature Publishing House, 1997.
- 李济远, 李玉宏, 胡少华, 等. “山西式”氦气成藏模式及其意义[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(3): 529-536.
- LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi- type”helium accumulation model and its essentiality[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 529-536.
- 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地天然气成因特征及其意义[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(5): 11-16.
- LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Genetic Characteristics of the Natural Gas in Weihe Basin and its Significance[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2011, 26(5): 11-16.
- 李玉宏, 王行运, 韩伟. 渭河盆地氦气资源远景调查进展与成果[J]. 中国地质调查, 2015, 2(6): 1-6.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Progress and Achievements of Helium Gas Resources Survey in Weihe Basin[J]. Geological Survey of China, 2015, 2(6): 1-6.
- 李玉宏, 王行运, 韩伟. 陕西渭河盆地氦气资源赋存状态及其意义[J]. 地质通报, 2016, 35(Z1): 372-378.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Mode of Occurrence of Helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and its Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(Z1): 372-378.
- 李玉宏, 张文, 王利, 等. 亨利定律与壳源氦气弱源成藏——以渭河盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2017a, 28(04): 495-501.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Henry's Law and Accumulation of Cruise-derived Helium: A Case Form Weihe Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017a, 28(04): 495-501.
- 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, 2017b, 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, 2017b, 37(04): 565-572.
- 李玉宏, 周俊林, 张文, 等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in the Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- 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, 2022c.
- LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in the Weihe Basin (Revised) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022c.
- 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(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, 2022a, 44(2): 1-11.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 国内外氦气资源勘探开发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.
- 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(4): 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.
- 卢进才, 魏仙样, 李玉宏, 等. 汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探[J]. 西北地质, 2005, 38(3): 82-86.
- LU Jincai, WEI Xianyang, LI Yuhong, et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3): 82-86.
- 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]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2021, 41(4): 102-113.
- 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田——鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1078-1085.
- PENG Weilong, LIU Quanyou, ZHANG Ying, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(6):

- 1078-1085.
- 秦胜飞, 李济远, 梁传国, 等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理—古老地层水脱氦富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(08): 1203-1217.
- QIN Shengfei, LI Jiyan, 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(08): 1203-1217.
- 陶明信, 徐永昌, 韩文功, 等. 中国东部幔源流体的活动特征与成藏效应[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3): 265-270.
- TAO Mingxin, XU Yongchang, HAN Wengong, et al. Active Characteristics and Accumulative Effects of Mantle-derived Fluids in Eastern China[J]. Geotectonic et Met-allogenia, 2001, 25(3): 265-270.
- 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(3): 1024-1041.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin. Helium Resources and Discovery of First Super Giant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. Earth Science, 2019, 44: 1024-1041.
- 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- WANG Xianbin. Noble Gas Isotope Geochemistry and Cosmochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- 王先彬, 陈践发, 徐胜, 等. 地震区温泉气体的地球化学特征[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 37(2): 242.
- WANG Xianbin, CHEN Jianfa, XU Sheng, et al. Geochemical characteristics of gases from hot springs in seismic region[J]. Science in China Series B, 1992, 37(2): 242.
- 王先彬, 徐胜, 陈践发, 等. 腾冲火山区温泉气体组分和氦同位素组成特征[J]. 科学通报, 1993, 38(9): 814-817.
- WANG Xianbin, XU Sheng, CHEN Jianfa, et al. Gas Composition and Nitrogen Isoatlas Composition of Hot Springs in Tengchong Volcanic Area[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(9): 814-817.
- 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布[J]. 科学通报, 1994, 39(16): 1505-1508.
- XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Distribution of Helium Isotopes in Natural Gas from Petroliferous Basins in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(16): 1505-1508.
- 徐永昌. 天然气中的幔源稀有气体[J]. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 64-72.
- XU Yongchang. The mantle noble gas of natural gases[J]. Earth Science Frontier, 1996, 3(3-4): 63-71.
- 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——II. 幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996b, (02): 187-192.
- XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Geochemistry of Mantle-derived Volatiles from Natural Gas in Eastern Oil and Gas Region II. Helium, Argon and Carbon Compounds in Mantle-derived Volatiles[J]. Science in China(Series D), 1996b, (02): 187-192.
- 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Noble Gas Geochemistry in Natural Gas[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- 徐永昌, 刘文汇, 沈平, 等. 天然气地球化学的重要分支——稀有气体地球化学[J]. 天然气地球科学, 2003, (03): 157-166.
- XU Yongchang, LIU Wenhui, SHEN Ping, et al. An Important Branch of Gas Geochemistry Noble Gas Geochemistry[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, (03): 157-166.
- 杨振宇, 李永红, 刘文进, 等. 柴达木盆地北缘全吉山地区氦气形成地质条件及资源远景分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(6): 64-70.
- YANG Zhenning, LI Yonghong, LIU Wenjin, et al. Geological Conditions of Helium Formation and Resource Prospect Analysis in Quanjishan Area, Northern Qaidam Basin [J]. Coal Geology of China, 2018, 30(06): 64-70.
- 张东亮, 郑德顺, 彭建堂, 等. 矿物流体包裹体中稀有气体的保存能力初探 [J]. 矿床地质, 2011, 30(05): 933-940.
- ZHANG Dongliang, ZHENG Deshun, PENG Jiantang, et al. A preliminary study of the retention of noble gases in fluid inclusions of different minerals[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(05): 934-940.
- 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, 李玉宏, 王利, 等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(02): 236-244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The Analysis of Helium Accumulation Conditions and Prediction of

- Helium Resource in Weihe Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(02): 236-244.
- 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(11): 1585-1592.
- 张雪, 刘建朝, 李荣西, 等. 中国富氦天然气资源研究现状与进展[J]. *地质通报*, 2018, 37(Z1): 476-486.
- ZHANG Xue, LIU Jinzhao, LI Rongxi, et al. President Situation and Progress in the Study of Helium Gas Resources in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(Z1): 476-486.
- 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 Jincui, 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.
- 邹才能, 陶士振, 侯莲花, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- Ballentine C J, Burnard P G. Production, Release and Transport of Noble Gases in the Continental Crust[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2002a, 47(1): 481-538.
- Ballentine C J, SherwoodLollar B. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton-Panhandle giant gas field, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002b, 66(14): 2483-2497.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases; A Guide for Explorationists[C]. AAPG Conference, 2010: 11-14.
- 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.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson G G, et al. New High-Grade Helium Discoveries in Tanzania[C]. Yokohama, Japan: Goldschmidt Conference, 2016.
- Danabalan D. Helium: Exploration Methodology for a Strategic Resource[D]. Durham University, 2017.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson C G, et al. The Principles of Helium Exploration[J]. *Petroleum Geoscience*, 2022, 28(2): 1-13.
- Farley K A. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2000, 105 (B2): 2903-2914.
- Halford D T, Karolytè R, Barry P H, et al. High helium reservoirs in the Four Corners area of the Colorado Plateau, USA[J]. *Chemical Geology*, 2022, 596: 120790.
- Hand E. Massive helium fields found in rift zone of Tanzania [J]. *Science*, 2016, (6295): 109-110.
- Karolytè R, Warr O, van Heerden E, et al. The role of porosity in H₂/He production ratios in fracture fluids from the Witwatersrand Basin, South Africa[J]. *Chemical Geology*, 2022, 595: 120788.
- Liu Q, Wu X, Jia H, et al. Geochemical Characteristics of Helium in Natural Gas from the Daniudi Gas Field, Ordos Basin, Central China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 823308.
- Mtli K M, Byrne D J, Tyne R L, et al. The origin of high helium concentrations in the gas fields of southwestern Tanzania[J]. *Chemical Geology*, 2021, 585: 120542.
- Sivtsev A I, Aleksandrov A R, Petrov D M. Means to Solve the Problems of the Development of Helium Resources in Eastern Siberia[J]. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2020, 459(04): 42097.
- Tyne R L, Barry P H, Cheng A, et al. Basin architecture controls on the chemical evolution and ⁴He distribution of groundwater in the Paradox Basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 589: 117580.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019a, 251: 229-246.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Quantifying the helium and hydrocarbon accumulation processes using noble gases in the North Qaidam Basin, China[J]. *Chemical Geology*, 2019b, 525: 368-379.
- 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.