矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol.45, 2026

基于数据驱动和传统综述双范式的中国氦气研究现状与战略展望

李华洋,刘全有*

北京大学 地球与空间科学学院 能源研究院, 北京 100871

摘　要: 氦气作为国防军工、航空航天等领域不可或缺的稀缺战略资源,我国长期面临供应短缺与高度对外依存的严峻挑战。为厘清中国氦气研究的发展脉络、核心成果与战略方向,本文采用数据驱动+传统综述的双维度研究框架,对我国氦气勘探开发领域展开全方位、深层次分析。在数据驱动层面,以2000年以来中国知网收录的228篇相关文献为数据源,基于知识图谱与大数据相结合的手段,从载文期刊、基金资助、发文机构和作者合作网络等4个维度揭示学科格局与发展规律。在传统综述层面,系统梳理了我国氦气研究的方法体系、核心成果与未来方向。结果表明,学术论文发表高度集中于少数核心期刊与头部单位,国家自然科学基金及多类型协同资助构成了研究经费主干;作者合作呈现“石油系统主导、地调单位协同、科研院校支撑”的集群格局,多机构、多热点、多领域合作,存在以李玉宏、陶士振、刘全有等学者为引领的若干核心研究团队,形成“量产型”与“精研型”并存的产学研差异;研究方法已形成以地球化学分析为核心以地质-物化探综合评价为支撑、资源量估算为目标的多学科交叉体系;核心成果方面,明确了我国氦气以壳源为主、壳幔混源与幔源为辅的三大成因类型,建立了基岩供氦、基岩-沉积岩联合供氦和沉积岩供氦三类供氦模式,形成了“近氦源-邻断裂-低势高部位”的富集规律与“源-运-聚-保”四因子控制框架,揭示了“三态三方式”运移规律与“抬升脱溶型”“置换脱溶型”等成藏模式,阐明了“中西部富集、东部分散”的区域分布格局,发现了鄂尔多斯东胜、塔里木和田河等多个特大型富氦气田;提出五大研究与政策重点:精细化氦源岩识别与定量、四场耦合的运聚数值模拟、低丰度氦高效提纯工艺、国家战略储备与产业链协同,以及页岩/煤层/幔源等特殊类型氦藏的专项勘探与技术攻关。本文通过双维度研究范式,实现了我国氦气研究现状的量化表征与理论成果的系统整合,为我国氦气资源勘探开发、技术攻关与战略布局提供科学依据。

关　键　词: 氦气;成藏条件;富氦气藏;氦源岩;富集机理;数据驱动+传统综述双范式

中图分类号: P618.13　　**doi:** 10.3724/j.issn.1007-2802.20260014

Current status and strategic outlook of helium researches in China: Based on dual paradigms of data-driven and traditional reviews

LI Hua-yang, LIU Quan-you*

Institute of Energy, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, *China*

Abstract: Helium, as an indispensable scarce strategic resource in fields such as national defense, aerospace, and other key sectors, has long faced the severe challenges of supply shortage and high degree of dependence on imports in China. In order to clarify the development context, core achievements, and strategic directions of the helium research in China, in this study, by innovatively adopting a two-dimensional research framework with the combination of data-driven analysis + traditional review, we have conducted a comprehensive and in-depth analysis of the helium exploration and development in China. At the data-driven research level, 228 relevant literatures indexed in the CNKI (China National Knowledge Infrastructure) from 2000 are used as the data

收稿编号:2025-0311,2025-12-19 收到,2026-01-19 改回
基金项目:国家自然科学基金资助项目(42141021);国家深地科技重大专项课题(2025ZD1010601);中国科学院学部前沿交叉研判项目(XK2023DXA004)
第一作者简介:李华洋(1999—),男,博士研究生,研究方向:油气地质和稀贵气体. email:lihuayang110@stu.pku.edu.cn
*通信作者简介:刘全有(1975—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:天然气地球化学. email:liuqy@pku.edu.cn

引用此文:
李华洋,刘全有. 2026. 基于数据驱动和传统综述双范式的中国氦气研究现状与战略展望. 矿物岩石地球化学通报,doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260014
Li H Y, Liu Q Y. 2026. Current status and strategic outlook of helium researches in China: Based on dual paradigms of data-driven and traditional reviews. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260014

source. By integrating the knowledge graph and big data methods, this study reveals the disciplinary patterns and development rules of helium researches in China from four perspectives: publishing journals, funding sources, research institutions, and author collaboration networks. At the traditional review aspect, this study systematically summarizes the methodological systems, core achievements, and future directions of helium researches in China. The results show that academic papers published are highly concentrated in a few core journals by some leading institutions, with the major research fundings provided by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and multi-type collaborative fundings. In the aspect of author collaboration, there is a cluster pattern of research teams characterized by ″dominance of researchers from petroleum systems, collaboration of reseachers from geological survey institutions, and support of researchers from universities and research institutes″. There are multi-institutional, multi-hotspot, and multi-field collaborations, with several core research teams led by scholars such as Li Yuhong, Tao Shizhen, and Liu Quanyou, resulting in differences between ″high-output research type″ and coexisted ″in-depth research type″ in the industry-university-research collaboration models. In the aspect of research methodology, a multi-disciplinary integration system, with the center of geochemical analysis, support of the comprehensive geological-geophysical-geochemical evaluation, and target of the resource quantity estimation, has been developed. In the aspect of core achievements, three genetic types of helium in China are identified, with the crust-derived helium as the main type of helium, and the crust-mantle mixed-sourced and mantle-derived helium as the supplementary types of helium. Three helium supply models, including the bedrock-derived helium supply, combined bedrock-sedimentary rock helium supply, and sedimentary rock helium supply, are established. The helium enrichment rule of ″proximal to helium source, adjacent to faults, and high-position in low-potential zones″ and the four-factor controlling framework of ″source-migration-accumulation-preservation″ are proposed. The helium migration laws of ″three states and three modes″ and reservoir-forming models such as ″the uplifting exsolution type″ and ″the displacement exsolution type″ are revealed. The regional distribution pattern of ″the enriched helium resources in central and western China and the dispersed helium resources in eastern China″ is clarified. Several super-large helium-rich gasfields, such as the Dongsheng gasfield in the Ordos Basin and the Hetianhe gasfield in the Tarim Basin, have been discovered. Five key research and political priorities, including the refined identification and quantification of helium source rocks, numerical simulation of migration and accumulation under four-field coupling, efficient purification technology for low-abundance helium, national strategic reserve and industrial chain synergy, and special exploration and technological breakthroughs for special types of helium reservoirs such as shale, coalbed, and mantle-derived reservoirs, have been proposed. Through this two-dimensional research paradigm, this study achieves the quantitative characterization of the current status of helium researches and the systematic integration of theoretical achievements in China and provides a scientific basis for the exploration and development, technological breakthroughs, and strategic layout of helium resources in China.

Key words: helium; accumulation condition; helium-rich gas reservoir; helium source rock; enrichment mechanism; dual paradigms of data-driven and traditional reviews

0 引言

氦气(He)以其极低的熔沸点和独特的物理化学性质(惰性、强扩散性、强导热性等)在国防军工、航空航天、医疗和半导体等多领域都有广泛的应用(秦胜飞等,2024;Hoseinzade and Adams,2019)。这种贯穿基础民生、经济命脉与科技突破的核心物资,在保障国家安全与高科技产业发展中具有不可替代的特殊地位。受氦气资源地理分布影响导致全球氦气产业呈现一超多强的特征,美国一国的储量即占全球氦气资源总量的40%以上,其产量更是占全球的56%以上(He et al.,2024),并通过战略储备体系掌控全球定价权,另外如卡塔尔、阿尔及利亚和俄罗斯等资源国已占据一定市场份额(Li et al.,2025)。我国氦气对外依存度长期维持在95%以上,近年来降低至85%左右,但资源短缺问题并未得到有效缓解。2023年我国氦气自主产量约为388万m^3,而同年消费量却高达约2618万m^3(许光等,2023;刘成林等,2025)。预计2025年我国氦气需求量将突破2800万m^3,2030年将达3500万m^3,年均增长率超12%。由于我国氦气供应在历史上曾长期严重依赖进口,导致我国本土的从资源勘探到液化储运的氦气全产业链均存在技术短板,且产供储销受国外资源、技术和企业垄断,资源安全形势极为严峻,解决这个“卡脖子”问题已经刻不容缓。

20世纪60年代四川盆地威远气田的氦气开发可以说是我国工业化利用氦气的起点(戴金星,2003),但应用场景单一且需求量极低。2000年之前我国氦气勘探开发工作进展缓慢,20世纪90年代虽然在松辽、苏北和三水盆地发现了幔源氦异常(徐永昌等,1990),但研究成果多停留在零散的个案阶段,并未引起广泛重视。近年来,随着我国科技水平的不断提高和工业能力的快速提升,我国对氦气的需求逐年增大,供需矛盾日益突出。要解决我国当前面临的氦气资源短缺问题,最经济可行的方式是从氦气含量较高的天然气田中提取氦(王晓锋等,2025)。然而,目前全球探明氦气储量仅占天然气探明储量的0.0056%,天然气中氦气的平均含量仅为0.04%,达到工业品位的氦气资源极少。鉴于天然气是氦气最主要的工业化来源(Wu et al.,2025),提氦经济性较低,因此深入研究并理解氦气藏尤其是富氦气藏(He含量大于0.1%)的形成机理、圈定氦气甜点区(Sweet Spot),就成为我国摆脱对进口氦气依赖、逐步实现自主供应的关键途径。此外,提氦前期投入成本巨大,选择富氦气田开发是实现氦气商业化利用的重要前提。

然而,面对大量且分散的文献数据与成果,传统研究方法难以系统整合多源信息。从大数据分析角度出发的知识图谱技术,为解决这一难题提供了全新视角。它通过构建多个维度的可视化关联网络,高效挖掘海量数据间的隐性联系。目前,氦气领域的传统综述文章较多,但基于知识图谱或文献计量研究较少。张哲等(2024)分析了全球氦气的全产业链,指出了未来的发展趋势和攻关方向。张超等(2024)利用Incopat数据库分析了330项有关氦气分离的专利文献,重点总结了膜法天然气提氦技术的发展现状及前景。李扬等(2024)通过WOS数据库,结合德温特数据分析软件,研究并揭示了石油、天然气和氦气等资源在深部地下空间的储存技术及发展态势。这些研究虽然提供了有价值的参考,但也存在一定的局限性。例如,已有的氦气领域文献计量论文往往仅是单纯的文献数据分析,对相关理论的论述不全面、不深刻。而已有的传统综述文章受限于作者的主观偏好和知识储备,文章往往侧重个人所聚焦的细分领域,过度强调作者熟悉的研究方向,而忽视了其他潜在有价值的研究线索。并且传统综述论文以文字定性描述为主,难以对氦气领域的研究现状进行精确的量化分析。

基于此,为系统揭示我国氦气勘探开发领域的研究现状、演进规律与前沿动态,助力我国氦气产业早日突破“卡脖子”瓶颈,本文融合了数据驱动和传统综述的各自优点,创新采用“数据驱动量化表征+传统综述理论整合”双维度研究范式进行研究。数据驱动研究基于2000—2025年间228篇中文文献的多维度知识图谱分析,传统综述则从研究方法、核心成果和未来方向三个方面对其进行系统梳理。本研究突破了单一研究范式局限,填补了氦气勘探开发领域系统性计量研究的空白,完善了氦气地质理论体系,提出的“勘探-开发-储备-利用”一体化建议为保障国家战略资源安全提供重要支撑。

1　基于数据驱动的中国氦气研究现状

基于数据驱动思想,采用知识图谱和文献计量相结合的方法,以2000年1月1日至2025年2月13日间中国知网收录的我国氦气勘探开发领域的228篇中文文献为数据源,从载文期刊、基金项目、发文机构和发文作者四个角度利用大数据手段分析中国氦气勘探开发研究现状,为该领域研究提供了全新的、独特的视角和方法,以期揭示该领域更深层次的发展规律和特征,为促进我国氦气产业的进一步发展提供新的思路与参考依据。

1.1　载文期刊分析

本研究统计了发文量前十位的期刊,如图1所示,期刊分布具有两个非常明显的特征。一是核心期刊主导。此处的“核心”有两层含义:一是相关研究论文高度集中发表于少数期刊,例如,《天然气地球科学》以46篇的发文量位居榜首,远超其他期刊,表明该刊在氦气研究领域具有较强的影响力和关注度,也说明其办刊宗旨等与该领域契合度极高,吸引了大量相关优质稿件,这与氦气作为稀贵气体的本身特质相关联。此外,《西北地质》(19篇,反映出西北地区,如鄂尔多斯盆地、渭河盆地和柴达木盆地为我国的氦气富集区,相关发文与区域地质调查成果密切相关)和《地学前缘》(10篇)发文数分别处于第二、第三位,原因在于这两本期刊在地质学科领域都具有较高知名度,而氦气勘探开发研究因其过程需要基于地质理论、勘查技术等多方面地质知识又与该学科联系紧密,故而研究成果也多在地质类期刊发表。“核心”的第二层含义是发文量排名前十的期刊中有8本都是北大核心期刊,有3本同时是EI期刊,《石油知识》和《低温与特气》除外,表明相关成果主要集中发表在专业领域的高水平期刊上,从侧面表露出现阶段这类研究处于高峰期,头部核心期刊更愿意发表相关成果。核心期刊的集中发表有助于研究成果在专业领域内的广泛传播和交流,促进学术思想的碰撞和研究的深入发展,同时反映出研究成果在学术界的认可度主要通过这些核心期刊来体现。

期刊分布的第二个特征是多学科期刊参与。除了地质类期刊外像《石油勘探与开发》(7篇)、《石油实

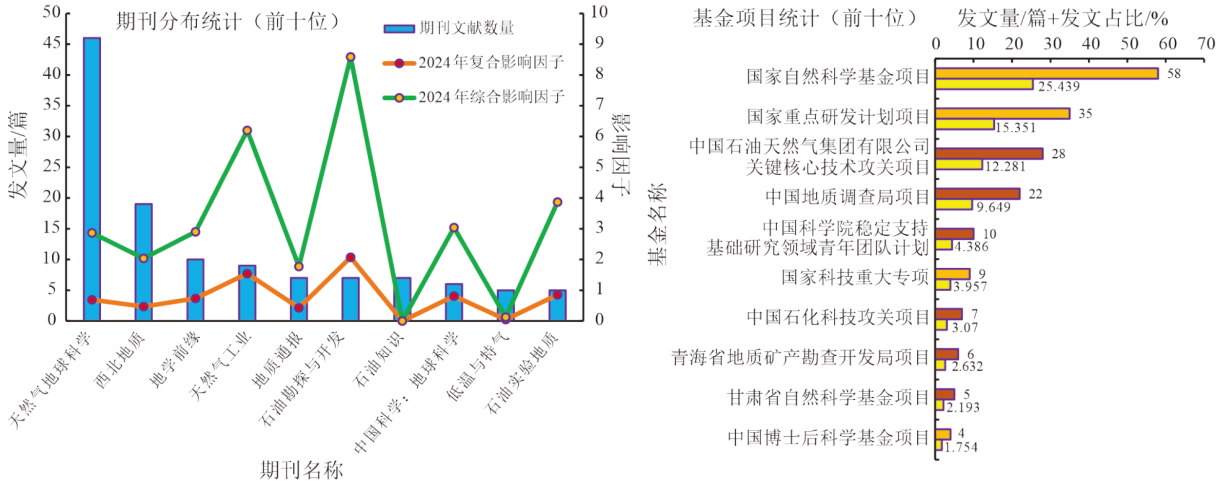
验地质》(5篇)等石油类期刊也有一定论文发表，体现出氦气与石油勘探开发领域存在高度交叉之处。实际上氦气的主要来源就是油气(含煤层气和页岩气)的伴生气，目前全球尚未发现独立成藏的氦气藏(许光等，2023)，也说明氦气勘探开发研究具有跨学科特点。同时，《中国科学：地球科学》(6篇)等综合性、权威性较强的高水平期刊也有一定发文，这进一步提升了氦气勘探开发研究在整个国内地球科学领域的地位，表明这类研究成果具有较高的科学价值和学术影响力。

1.2 基金项目分析

如图1所示，发文量前十位的基金项目全部为基金项目，可分为两类：一类是国家级项目(图中橙色部分)，另一类是地方级项目(图中棕色部分)。现阶段发文所属的基金项目存在两个大特征或三个小特点，即国家自然科学基金项目引领和多类型基金协同支持两大特征，国家级项目主导、企业研发投入加大和地方配套不足三个小特点。

国家自然科学基金项目资助论文数量最多(58篇)，反映出氦气勘探开发研究在前沿科学问题、基础理论创新等方面得到了国家层面的高度重视和大力支持，这既是由我国相对贫氦的国情决定的，也是摆脱以美国为首的国外氦气垄断，加大资源独立自主，牢牢端稳能源的饭碗。多类型基金协同支持，是指国家重点研发计划项目(35篇)、中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目(28篇)、中国地质调查局项目(22篇)等多类型基金项目也在其中，呈现出协同支持的态势。国家重点研发计划项目体现了国家在战略层面对于氦气等关键资源勘探开发技术攻关的布局，旨在解决行业关键技术瓶颈，推动产业化应用。企业(主要是石油系统，如中石油和中石化)内部的核心技术攻关项目则聚焦于企业实际生产中的技术难题，以提升企业资源开发效益与核心竞争力。中国地质调查局项目侧重于氦气资源地质调查评价等工作。此外，中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划、中国博士后科学基金、地方科研项目(如临沂市城市地质调查项目)以及单位内部科研基金(如山东省第七地质矿产勘查院院控科研基金)等项目均为所属单位的科研工作提供了资金支持，多方合力推动该领域的技术进步。

国家级项目主导，是指国家自然科学基金、国家重点研发计划和国家科技重大专项(9篇)等国家层面



序号	期刊名称	期刊类型	主办单位
1	天然气地球科学	北大核心	中国科学院资源环境科学信息中心
2	西北地质	北大核心	中国地质调查局西安地质调查中心；中国地质学会
3	地学前缘	北大核心、EI	中国地质大学（北京）北京大学
4	天然气工业	北大核心、EI	中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司
5	地质通报	北大核心	中国地质调查局
6	石油勘探与开发	北大核心、EI	中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院；中国石油集团科学技术研究院有限公司
7	石油知识		石油工业出版社有限公司；中国石油学会
8	中国科学：地球科学	北大核心	国家自然科学基金委员会；中国科学院
9	低温与特气		光明化工研究设计院
10	石油实验地质	北大核心	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院；中国地质学会石油地质专业委员会

图1 国内氦气勘探开发研究中文论文的载文期刊及基金分布统计

Fig.1 Statistics for the distribution of journals and fundings of published Chinese papers for researches related to the domestic exploration and development of helium resources

基金占据主导地位。企业研发投入加大,是指以中石油和中石化(7篇)为代表的油气龙头企业在内部设立的技术攻关项目,将国家战略与企业需求相耦合,目的是促进商业转化,架起由学术界通往工业界的桥梁。地方配套不足,是指仅青海、甘肃、山东等资源大省设有基金,其他地区支持力度薄弱,可能进一步制约区域氦气产业链布局。

不同类型基金项目形成了多元化的资助格局,从基础研究到应用技术研发,从国家层面战略布局到企业实际需求等不同层面、多个维度为氦气勘探开发研究提供助力,提供了全方位的资金保障和政策支持,有力地推动了该领域全面、持续、深入发展。

1.3　发文机构分析

1.3.1　*发文机构影响力分析*　截至2025年2月,我国现有涵盖高校、能源企业、地质调查局和科研院所四大类机构在内的96个发文单位,本文统计了发文量前十位的机构(图2、3)。这些机构凭借丰富的科研资源、专业的人才队伍和长期的研究积累,成为我国氦气勘探开发研究的核心力量。但从发文量来看,整体分布不均,机构之间差距明显,呈现出“头部机构领先、其他机构相对分散”的态势,科研力量的分布存在较为明显的不均衡性。

图2展示了发文量前十位的机构的论文发文量、论文总被引次数与平均单篇论文的被引次数(以下简称“平均单篇被引”)三者间的关系,以图中机构名称作为气泡标签,气泡大小表示被引总次数。由图2可知,研究机构格局具有三个明显特征。一是石油系统单位优势突出。中国石油勘探开发研究院以36篇论文数量断层式排名第一,展现出其强大实力和领导地位。中国石化石油勘探开发研究院(15篇)、中国石油长庆油田分公司(11篇)等石油系统相关单位也位居前列,充分说明以中石油和中石化为典型代表的油气企业在氦气勘探开发研究中占据主导地位。笔者推测造成这一现象的原因有二,一是据前文的基金项目分析得知石油系统设立了专项基金项目用于支持研究,资金保障充足。二是得益于石油系统在油气勘探开发过程中积累了丰富的勘查理论、经验和技术手段,能够为氦气勘探开发提供坚实有力的支撑,其所属科研团队长期专注于油气资源勘探开发相关研究,具备强大技术研发实力,所以在该领域率先开展较多研究工作并发表了众多高水平的研究论文。

第二个特征是科研院校力量是重要支撑。中国科学院西北生态环境资源研究院(17篇)、中国石油大学(北京)(16篇)、北京大学(14篇)等科研院校也发挥了重要作用。这些院校均为国内知名院校,具有雄厚的师资力量、先进的实验设备以及多学科交叉融合的优势,能够从基础理论研究、技术创新研发等多个层面深入开展研究工作,培养专业人才,输送前沿科研成果,推动氦气勘探开发研究不断向纵深发展。

第三个特征是地调单位协同参与。中国地质调查局西安地质调查中心(32篇)、中国地质科学院(11篇)和青海省地矿局(6篇)等地调单位同样是重要参与者,这些单位在地质勘查、矿产资源评价等方面有着深厚的专业底蕴和丰富的实践经验。通过对全国多个含油气盆地和地热水资源,包括渭河盆地(周俊林等,2022;韩伟等,2025)、鄂尔多斯盆地(张涛等,2024;范立勇等,2025)、民和盆地(杨紫恒等,2024)、临汾-运城盆地(司庆红等,2023)、柴达木盆地 (贺政阳等,2022)、四川盆地(赵安坤等,2022)、江西温泉伴生气(邹勇军等,2022)和关中盆地(董敏等,2017)等地的氦气资源进行系统调查,建立了氦气资源数据库,开展了氦气资源潜力评价和战略选区研究,为氦气的开发提供了重要的基础数据和决策依据。地调单位通过与石油系统单位、科研院校等相互协作、优势互补,共同构建了氦气勘探开发研究多元化的主体格局,保障了研究工作的全面性和系统性。

分析论文被引用次数以反映研究机构的学术影响力、研究价值与认可度。由图2可知,西安地质调查中心虽然论文数量略少于中国石油勘探开发研究院,但其论文总被引次数高达559次,排名第一,平均单篇被引也达到17.469次,排名第二,说明该机构的研究成

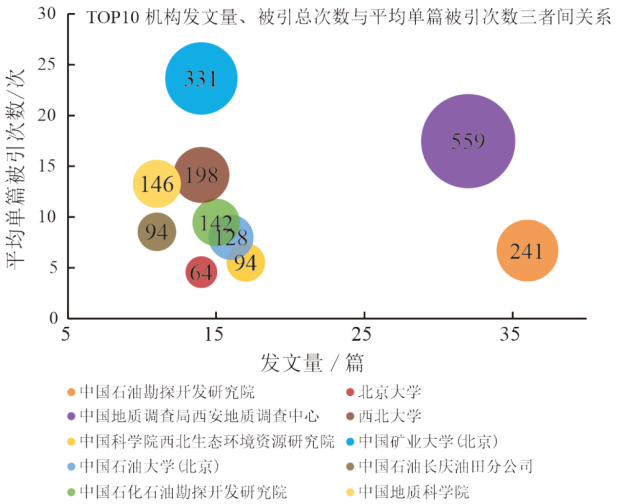


图2　国内氦气勘探开发研究机构的中文论文发文量与被引分析(TOP10)

Fig.2　Analysis of publication output and citation rate of Chinese-language papers by domestic research institutions for researches related to the exploration and development of helium resources (Top 10)

果具有较高的创新性、科学性以及实用性，能够提供有价值的参考和借鉴，得到了广泛的关注和引用，对推动整个领域的发展起到了较为关键的作用。中国矿业大学(北京)虽发文量与北京大学、西北大学相同，均为14篇，但总被引次数高达331次，平均单篇被引次数为23.643次位居榜首，说明其相关研究论文质量较高，每篇论文在行业内的认可度和影响力都极高。相比之下，中国科学院西北生态环境资源研究院发表论文17篇，被引次数94次，平均单篇被引5.529次，其研究影响力在这些机构中相对不足，受关注程度有限，但值得说明的是该机构是我国最早开展氦气研究的单位之一，具有早期深厚的研究基础，近期研究有深度。此外，学术影响力的评估是一个复杂的系统工程，被引量是现行条件下衡量学术影响力的一个重要指标，但单纯以被引量作为评价标准存在一定的局限性。论文的引用量会受到文章发表时间、热点领域和其他外部非学术因素的影响，对学术影响力应采取多元评估维度以便得出更客观的评价。

总的来看，针对国内氦气勘探开发研究领域，论文数量与被引质量(平均单篇被引次数)之间未形成明显的正相关关系，存在“量产型研究”与“精研型研究”的路径差异，不同机构在研究成果的影响力方面存在较大差距，头部机构的成果获得了更多关注。

1.3.2 发文机构研究热点及合作单位分析 图3展示了发文量前十位机构的研究热点与合作单位。综合分析可发现三个明显特征。一是研究盆地集中，即塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地是多个机构的研究热点，如中石油勘探开发研究院、中石化石勘院等都有涉及，表明上述盆地是氦气勘探开发的主力区。二是地球化学受关注，地球化学、地球化学特征等研究热点多次出现，说明为了更好地了解氦气的赋存、运移等规律，对地质体的地球化学性质研究十分关键。三是技术合作广泛，研究机构众多且合作广泛，跨单位合作模式普遍存在，产学研合作潜力巨大。这种跨单位的合作模式能够整合不同机构的优势资源，高校具有理论研究和人才培养的优势，科研院所(地调局)拥有先进的实验设备和专业的科研团队，企业(油气公司)则具备实际生产和数据积累的优势，为研究提供了实际应用场景和需求导向。通过合作，各方能够优势互补，共享数据、设备和人才资源，共克难题，将科研成果及时转化为实际生产力，类似这样的“产-学-研-用”合作还有许多(王晓锋等，2022；蒙炳坤等，2023；高宇等，2023；朱东亚等，2024；李朋朋等，2024；张海祖等，2025；杨兆彪等，2025；陈燕燕等，2025)。

1.4 发文作者分析

1.4.1 作者合作网络视图分析 如图4、5所示，通过学术合作图谱的量化解析，不仅能系统识别和精准定位某领域的权威学者，还能可视化呈现学者间的关联网络。借助节点影响力参数与集群密度指标，可有效解构核心研究组群，为学术前沿动态追踪提供可视化导航路径(李华洋等，2024a，2024b)。

图4中每个节点由圆圈与名称标注共同构成，用以表征特定作者。不同颜色的节点表示不同组群归属，同一组群内的作者标示相同颜色。节点的尺寸反映作者的发文数，连接线段则揭示作者间的合作关系。连接不同节点的辐射状线段密度与其合作活跃度呈正相关，线段交汇越密集代表该作者的合作枢纽地位越显著。由图4可知，中国氦气勘探开发领域的作者合作网络结构复杂，存在多个不同颜色的聚类群体，表明该领域内形成了多个相对独立的合作团队。每个团

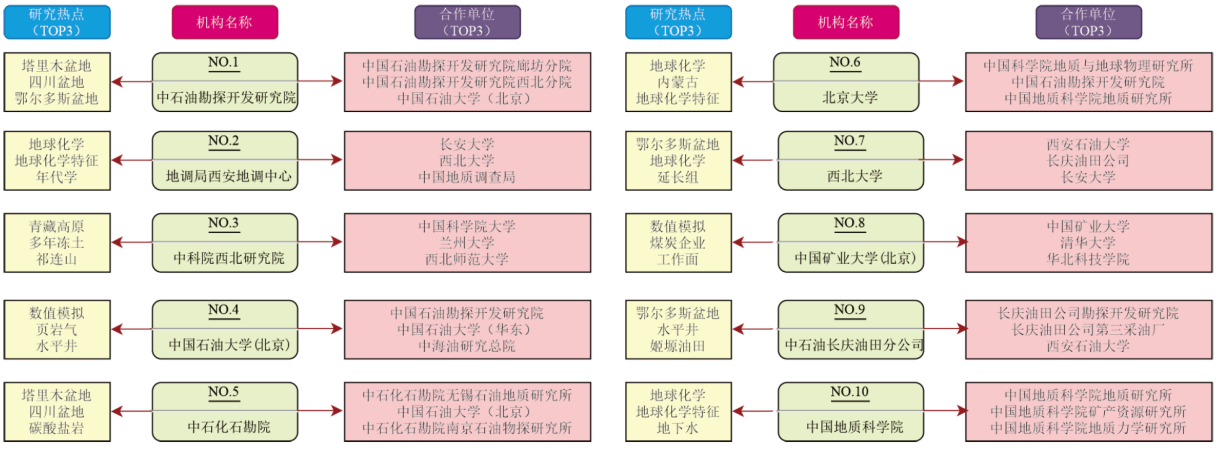


图3 国内氦气勘探开发研究机构的研究热点及合作单位(TOP10)

Fig.3 Research hotspots of research institutions for the domestic exploration and development of helium resources and their collaborative partners (Top 10)

队内作者间连线密集,说明组内合作紧密,如红色群体以“李玉宏(中国地质调查局西安地质调查中心)”为中心节点,周围有较多紧密相连的节点,如“刘文进”“吕鹏瑞”等,形成了一个较大的合作群体。蓝色群体以“陶士振(中国石油勘探开发研究院)”“冯建秋”“高建荣”等节点构成了一个较为明显的研究群体,其内部节点之间的连线也较为丰富。黄色群体中“刘全有(北京大学)”“吕佳豪”“彭威龙”等节点相对较大且周围有一定数量的关联节点,构成了一个相对独立的合作群体。上述研究团队内部有着较为频繁紧密的合作,可能在某些特定的研究方向或科研项目上共同开展工作,这有利于协同创新。部分节点

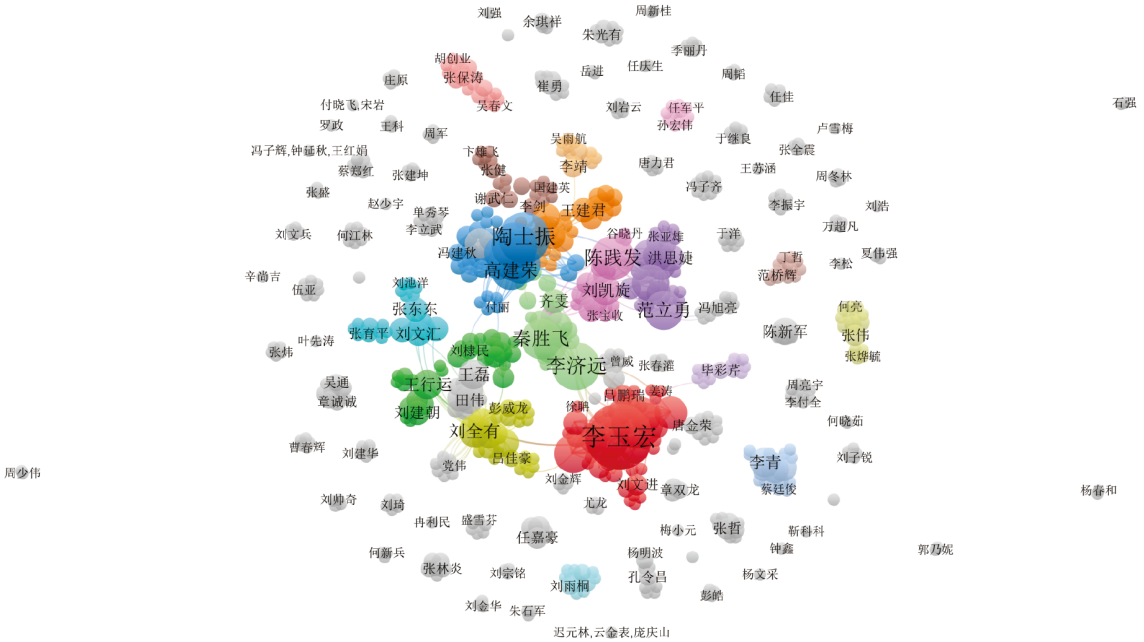


图4　我国氦气勘探开发领域全部作者及其合作关系聚类网络视图

Fig.4　Cluster network visualization of all authors and their co-authorship relationships in the field of researches related to the helium exploration and development in China

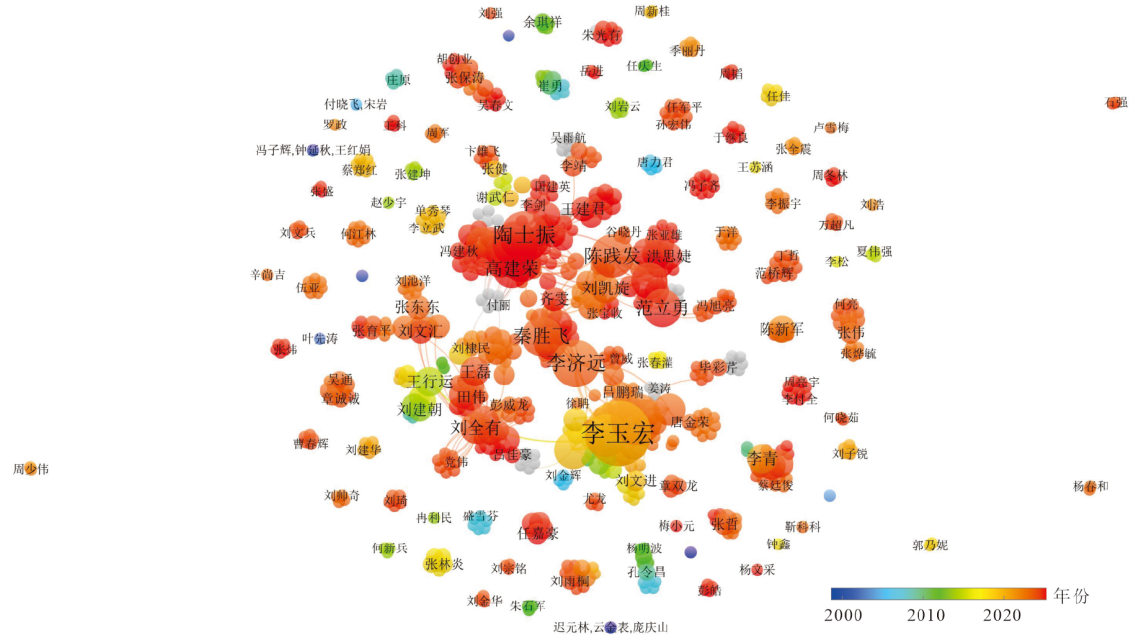


图5　我国氦气勘探开发领域全部作者及其合作关系时间线视图

Fig.5　Timelines visualization of all authors and their co-authorship relationships in the field of researches related to the helium exploration and development in China

上连线较多的作者，如李玉宏、刘全有、陶士振、秦胜飞和陈践发（刘成林等，2024）等人，与其他作者合作频繁，围绕着上述核心作者形成了多个合作紧密的子群体，他们在合作网络中处于关键位置，起到了桥梁和纽带作用，促进了信息在不同作者和组群间的传播，有助于整合不同研究团队的资源和优势，推动协同研究。此外，存在灰色标识的小群体，小群体连线相对较稀疏，表明作者间的合作相对较少，处于相对独立的状态，可能只是在某些特定课题上有过偶尔的合作，存在一定的知识壁垒。大量较小的节点意味着多数作者在此期间发文量较少，可能是偶尔参与者或新进入者。当然，无论是核心团队、小团队还是独立研究个体，这些代表着不同地区、机构和研究方向的学者们，共同构成了中国氦气勘探开发领域多元化的研究格局。此外，处于图4中心位置的不同核心团队间存在一定的合作关联，但整体而言不同核心团队间连线相对较少，反映出各团队之间存在一定程度的研究壁垒，不利于知识的跨组群流动和融合创新，不同团队间的交流与合作有待加强。

图5展示了全部作者的发文时间线网络图，节点的颜色反映了论文的发表时间，从蓝色（2000年）到红色（2025年）逐渐过渡。由图可见，早期（2000—2010年）的研究主要集中在少数几位学者身上，节点颜色以蓝色和绿色为主，且节点的尺寸小（发文量少）、数量少（发文的学者少）、分布相对分散（学者间合作较少），表明该时期氦气勘探开发研究处于相对起步阶段，参与的研究人员较少，研究力量较为薄弱。随着时间的推移（2011—2021年），节点颜色逐渐变为黄色和橙色，节点数量显著增加且部分节点规模增大，表明关注该领域的学者增多，研究团队逐渐壮大。近期（2022—2025年）节点颜色以红色为主，节点数量和规模进一步增大，且节点间的连线更加密集，表明研究进入了高度活跃期。参与研究的学者数量大幅增加，核心作者的研究活跃度也在提升，研究团队之间的合作更加频繁，研究内容更加深入和细化。

综上所述，我国氦气勘探开发领域作者合作网络视图可以清晰了解到该领域内作者的合作群体分布、高影响力作者和合作紧密度，以及合作网络的发展趋势。这些认知对于进一步了解中国氦气勘探开发领域的研究现状，规划未来发展方向，促进学术交流与合作，推动该领域进一步研究发展具有重要的参考价值。

1.4.2 发文量前十位作者分析 我们统计了TLS

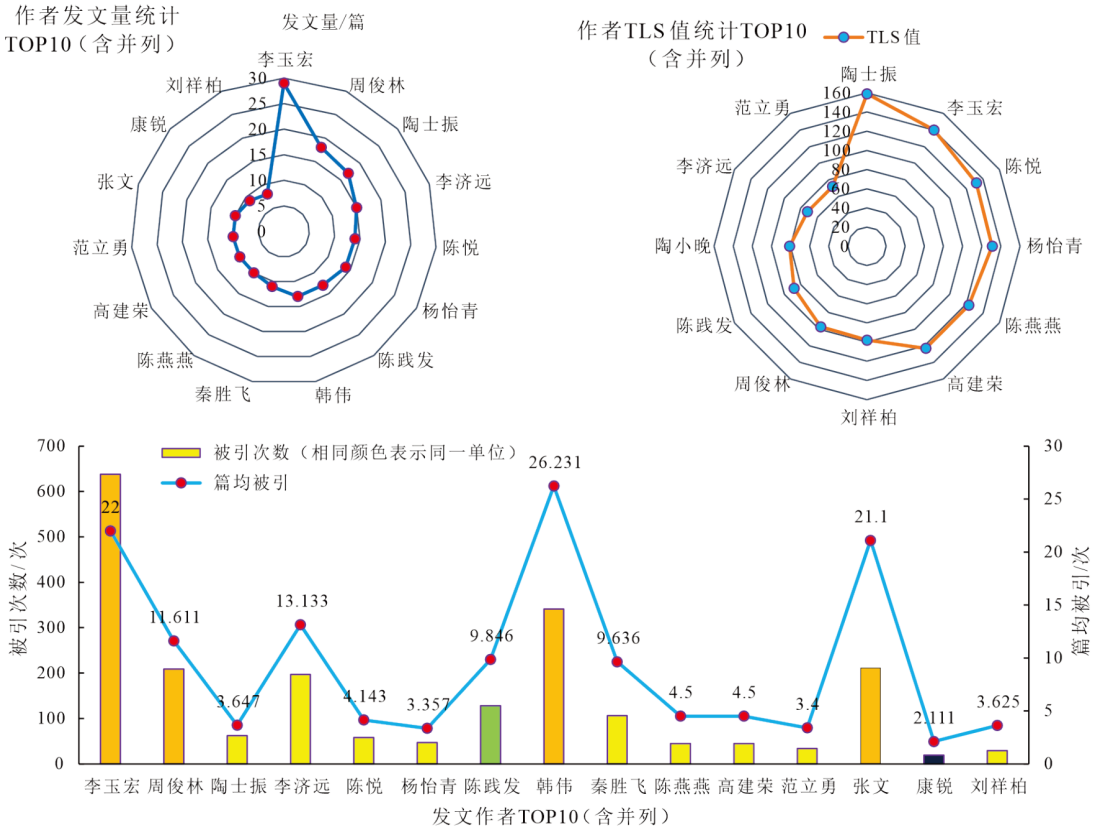


图6 我国氦气勘探开发领域的作者发文量、TLS值和被引分析（发文量TOP10，含并列）

Fig.6 Analysis of authors' publication volume, TLS (Total Link Strength), and citation rate of Chinese papers for researches related to the exploration and development of helium resources in China (Top 10, including ties)

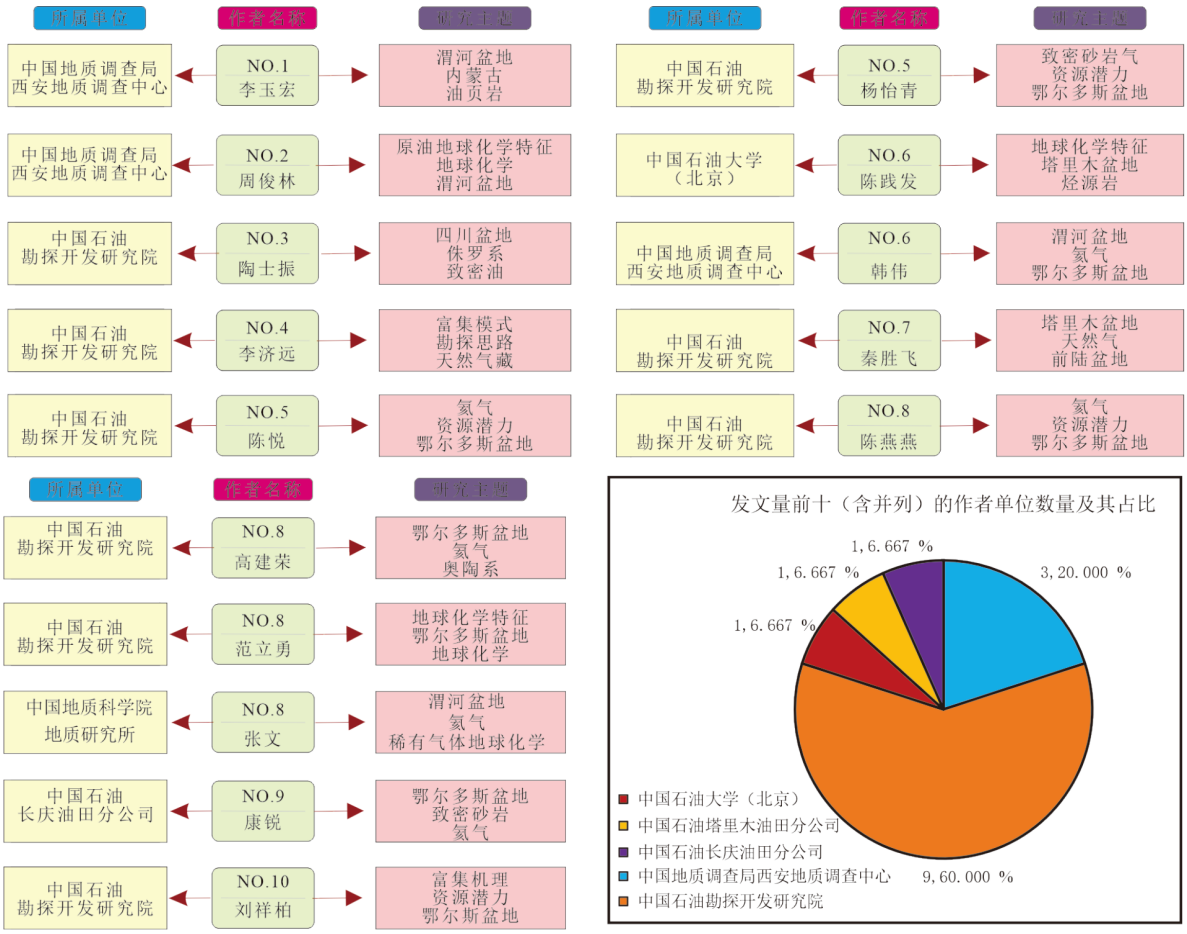


图7 我国氦气勘探开发领域作者的研究重点(发文量TOP10,含并列)

Fig.7 Research focus of authors for researches related to the helium exploration and development in China (Top 10 in publication volume,including ties)

(Total Link Strength,总联系强度参数)值前十位(含并列)的作者和发文量前十位(含并列)的作者及其被引次数、所属单位和研究主题(图6、7)。TLS值是一种综合关联度指标,该指标通过量化研究人员在学术网络中的协作密度来评估其科研合作活跃度。TLS值越高表明该学者构建的合作网络越复杂,其参与的多边科研项目、合著论文等学术互动行为的频率和广度越大(李华洋等,2024a)。

从作者影响力与学术贡献角度看,李玉宏(西安地调中心)以29篇发文量位居榜首,总被引次数638次,平均单篇被引22次(第二名),显示出具有较高的研究活跃度和学术影响力,研究成果受到广泛关注和引用。实际上,发文数量并非衡量学术贡献的唯一标准,论文被引更能体现其在学术界的认可度和对后续研究的推动作用。韩伟(西安地调中心)虽发文量仅13篇,与陈践发和秦胜飞并列第六位,但其总被引次数(341次)和平均单篇被(26.231次)均远高于另两人,其平均单篇被引更是位居榜首。此外,发文量并列第八位的张文(中国地质科学院地质研究所)以发文10篇但总被引次数211次(第三名)和平均单篇被引21.1次(第三名)的表现同样十分突出。究其原因,结合前文分析(图4)可知,这三人同属一个研究组群,该研究组群在学术产出上,既有数量的保障,又在质量上达到了较高水平,在学术界影响广泛。这再次验证了核心组群在学术产出与影响力上的卓越表现。尽管组群成员并非均来自同一单位,但彼此间通过资源共享、知识互补、分工协作等方式,充分发挥各自的优势,共克难题。这种合作模式有助于集中力量开展深入研究,提高研究效率和质量,进而在学术成果的数量和影响力上实现双丰收。

从TLS值看,陶士振(TLS=159)以最高合作强度成为网络核心节点,其所在的中国石油勘探开发研究院包揽TLS前十名(含并列,共12名)中的9个席位(陶士振、陈悦、杨怡青、陈燕燕、高建荣、刘祥柏、陶小晚、李济远、范立勇,除陶小晚外其余作者同时属于发文量TOP10),占比为75%,形成显著的内部协作集群。中

国石油勘探开发研究院作者平均TLS值达110.111，远超其他机构，表明其通过密集的团队分工实现规模化论文产出，呈现出显著的“超集约化合作模式”。相反，西安地质调查中心则在合作规模上略逊一筹，呈现出一定的“精英型合作模式”，李玉宏（TLS=140）与周俊林（TLS=97）虽合作强度低于中石油研究院群体，但其研究成果（总被引次数847次）显示更高学术影响力，反映其合作更注重质量导向，围绕关键科学问题组织小规模精英团队。但该组群存在合作网络外延性缺失的不足。西安地调中心未进入TLS前十的其他高产作者（如韩伟，发文量居第六位）未被纳入高TLS群体，表明其合作网络集中于少数核心成员开展小范围合作。由此可得出另一关键结论，即发文量与TLS值并非完全正相关，既有发文较多且TLS 值高的作者，如李玉宏，也有发文相对较少但TLS值仍处于前列的作者，如陶小晚。又比如，陈悦和杨怡青（二者同属中石油勘探院）发文数均为14篇，但陈悦的 TLS 值稍高，这表明陈悦在与他人合作过程中，建立了相对更广泛的联系或者其合作的学者在整体网络中更具关联性，从而使其TLS更大。刘祥柏发文8篇（发文量排第十），TLS值却相对较高，达到98（排第六），进一步说明合作的质量和广度对于作者的TLS有显著影响，即使发文数量不是最多，但通过有效的合作也能在学术网络中占据重要位置。

从机构主导性与研究力量分布的角度看，我国氦气勘探开发研究领域的机构集群效应十分显著。中石油勘探院（包括陶士振、李济远和陈悦等人）和西安地质调查中心（包括李玉宏、周俊林和韩伟等人）在相关研究中占据重要地位。这两个机构均呈现多作者协同发文模式，分别有9位和3位学者进入发文量前十名（含并列），所占比例分别高达60%和20%，符合大型科研团队的“导师-学生”或“首席-梯队”结构。除这两个机构外，中国石油大学（北京）、中国石油长庆油田分公司也各有1位作者进入发文量排行榜前十，反映出相关研究集中在少数重点高校、科研机构和企业，这些机构在推动领域关键技术、理论或方法创新方面发挥主导作用。

2 基于传统综述的中国氦气研究方法、核心成果及未来方向

我国氦气长期依赖进口（刘全有等，2025），近年来得益于天然气勘探的持续推进和对战略资源的高度重视，我国学者对氦气资源的研究取得了显著进展（Wang et al.，2023；彭威龙等，2023；Zhao et al.，2024；Liu et al.，2024；Wu et al.，2025；Lv et al.，2025），这些研究多基于地球化学分析、地质构造背景和天然气伴生特征展开，旨在揭示氦气的成因、成藏规律和勘探潜力。本研究将从研究方法、核心成果和未来方向三方面对其进行系统梳理。

2.1 研究方法

中国氦气研究历经数十年发展，逐步形成了一套以地球化学分析为核心、地质-物化探综合评价为支撑、资源量估算为目标的多学科交叉、理论与实践结合的多维度研究方法体系，为氦气成因判识、成藏机制解析及资源潜力评价提供了坚实技术支撑。

2.1.1 地球化学分析方法 地球化学方法是氦气成因识别、运聚过程示踪及成藏机制解析的核心手段，已形成以同位素示踪、相平衡计算、元素地球化学分析为主体的技术体系。

（1）氦同位素比值（$^3He/^4He$）和稀有气体同位素辅助判识法：氦同位素示踪法是判别氦气源类型的关键方法，通过测定氦同位素比值（$^3He/^4He$）及相关派生参数（如R/Ra，其中Ra为大气中$^3He/^4He$值，即1.4×10^{-6}），可精准区分壳源氦、幔源氦及壳幔混源氦（聂海宽等，2023；陶士振等，2024a；李朋朋等，2024）。通过计算样品的$^3He/^4He$值与大气氦比值（Ra）的比值（R/Ra），来量化不同来源氦的贡献比例，即当R/Ra>1时，表明存在明显幔源氦混入；当R/Ra<0.1时，氦气基本为壳源成因。目前陶士振等（2024a）已建立基于气相色谱与四级杆质谱协同应用的氦气含量及同位素测试方法，可有效区分不同成因氦气的同位素差异。他们通过对中国典型含油气盆地氦同位素分析，提出不同来源氦气的$^3He/^4He$值存在显著差异，壳源氦的$^3He/^4He<2.0\times10^{-8}$，幔源氦大于$1.1\times10^{-5}$，壳幔混源氦介于两者之间，该划分标准已成为中国氦气源类型判别的重要依据（陈践发等，2021；彭威龙等，2022，2023）。李朋朋等（2024）进一步验证，中西部稳定克拉通盆地（如鄂尔多斯、塔里木）氦同位素比值多在10^{-8}、10^{-7}量级，为典型壳源成因；而东部构造活动区（如松辽、渤海湾盆地）比值为10^{-7}、10^{-6}量级，呈现壳幔复合成因特征。陶士振等（2024a）测得松辽盆地庆深气田$^3He/^4He$值为1.08×10^{-6}~8.18×10^{-6}，证实幔源氦贡献份额达9.4%~72.9%。在塔里木盆地，28井次天然气样品的$^3He/^4He$比值分析表明，台盆区和前陆区壳源氦贡献均超过98.8%，仅阿克莫木气藏AK1井幔源氦贡献约6.8%（彭威龙等，2023）。鄂尔多斯盆地东胜气田5个样品的$^3He/^4He$值为3.03×10^{-8}~3.44×10^{-8}，壳源贡献超过99%（彭威龙等，2022）。上述研究也佐证了李朋朋等（2024）的结论。

此外，结合氩（$^{40}Ar/^{36}Ar$）、氖（$^{20}Ne/^{22}Ne$）等其他

辅助稀有气体同位素比值,可进一步验证氦气成因与壳幔相互作用强度(陶士振等,2024a)。以壳源氦为主的天然气藏通常表现为低$^{3}He/^{4}He$值、高$^{40}Ar/^{36}Ar$值和高$^{21}Ne/^{22}Ne$值。四川盆地威远气田震旦系–寒武系储层天然气的$^{40}Ar/^{36}Ar$值平均达7000,显著高于三叠系、二叠系储层(分别为846和969),反映了古老基底长期放射性衰变的年代积累效应,间接佐证了壳源氦的主导地位(陈践发等,2021)。

(2)元素地球化学分析法:通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等技术测试氦源岩中铀(U)、钍(Th)元素的含量与分布可为氦源潜力评价提供直接依据,揭示氦气生成与运移的物质基础。例如,张宝收等(2024)测得四川盆地金秋气田ZJ2井二叠系–侏罗系地层平均U含量为3.10×10^{-6}、Th含量为8.86×10^{-6},提出氦气生气强度概念,并据此建立了基于U/Th含量、地层厚度与衰变时间的三维评价模型,计算得出侏罗系氦源岩生气强度为60×10^{4}~85×10^{4} m^3/km^2。秦胜飞等(2023a)测试了中国部分含油气盆地花岗岩、泥页岩、碎屑岩等岩石的U、Th含量,发现烃源岩中U、Th含量普遍高于花岗岩,贵州贵定地区煤中U含量最高可达288 μg/g。李朋朋等(2024)通过对全球75个富氦气田氦源岩进行分析,发现花岗岩、富有机质泥页岩及铝土岩中U、Th含量显著高于上地壳平均水平(U=2.5×10^{-6},Th=10.3×10^{-6}),是壳源氦的主要贡献者。

(3)相平衡计算方法:该方法基于亨利定律和本森系数(Bunsen Coefficient),为氦气溶解-脱溶过程定量分析提供了理论支撑。亨利定律表明,气体在液体中的溶解度与平衡分压成正比,氦气的亨利常数受温度、压力及盐度调控(彭威龙等,2023)。李玉宏等(2017)将亨利定律系统应用于壳源氦气弱源成藏研究,通过模拟渭河盆地氦气在不同温压条件下的溶解度变化,揭示了氦气在深部氦源岩中高压高温条件下溶解运移,至浅部气藏区因分压骤降而脱溶富集的“置换成藏”机制,计算得出当氦气分压从20 MPa降至0.02 MPa时,99.9%的水溶氦可脱溶进入气藏。赵栋等(2023)基于本森系数建立了氦气溶解度计算模型,提出地层条件下氦气溶解度主要受埋深(温度、压力)和摩尔分压控制,随埋深增加呈指数增长,当埋深10 km、He摩尔分数(X_{He})=10%时,溶解度可达1.73×10^{-3} g/g,为定量评价孔隙水中氦气储量提供了关键方法。吴小奇等(2025)分析了新场气田地层水矿化度与氦含量的关系,发现二者呈负相关,当矿化度超过60g/L时,氦含量均低于0.01%,证实高矿化度不利于氦气溶解与脱溶。塔里木盆地和田河气藏的研究显示,地层水向上运移过程中温度降低,氦气分压减小,加之遇到烃类气体时发生置换作用,促使氦气从水体中析出并混入烃类气体聚集成藏,地层水在此过程中起到“提氦泵”作用(彭威龙等,2023)。通过模拟不同地质条件下氦气的溶解-脱溶效率,可量化“提氦泵”作用的强度及对成藏的贡献。

2.1.2　地质背景约束与流体地球化学关联分析方法　氦气“弱源成藏”的特殊性(生氦速率低、无法独立成藏),决定了其成藏机制研究需结合地质背景和流体地球化学等多方法联用。

(1)地质背景约束法:氦气成因与盆地构造背景、岩浆活动及基底岩石类型等因素密切相关。在构造活动强烈的裂谷盆地(如苏北盆地、渤海湾盆地),深大断裂沟通地幔,幔源氦贡献相对较高。而在构造稳定的克拉通盆地(如塔里木、鄂尔多斯盆地),古老花岗质基底富含U、Th元素经长期放射性衰变主导氦气生成,壳源氦占绝对优势。通过分析盆地构造演化史、岩浆活动期次及基底岩石铀钍含量,可对同位素判识结果进行有效验证,揭示氦气脱溶富集与贫化的地质过程。赵栋等(2023)基于构造抬升对氦气脱溶的控制作用,将壳源富氦气藏划分为“抬升脱溶型”(如四川威远气田)和“置换脱溶型”(如柴达木东坪气田)两类成藏模式,指出威远气田地区累计构造抬升4600 m使孔隙水中的氦气脱溶释放,其平均He含量(1598×10^{-6})远大于临近的安岳气田(103×10^{-6}~539×10^{-6})。吴小奇等(2025)对比了四川盆地新场气田与金秋气田的埋藏史,发现新场气田喜马拉雅期抬升幅度仅1100 m,远低于金秋气田的2100 m,导致地层水脱溶作用较弱,是氦气贫化的重要因素。秦胜飞等(2023a)通过美国潘汉德–胡果顿(Hugoton-Panhandle)气田与四川盆地威远气田的构造抬升分析,证实大幅度构造抬升是古老地层水向上运移并释放氦气的核心动力。

(2)流体地球化学关联分析法:通过分析天然气中氦与其他组分(N_2、CO_2、烃类气体)的相关性,来揭示氦气运移聚集规律。研究发现,塔里木盆地天然气中He与N_2相对含量呈正相关关系,氦气含量高的气藏氦气含量通常较高(彭威龙等,2023),这一现象源于二者相似的亨利常数变化规律,导致其在水体中具有协同溶解与释放特征。此外,通过分析乙烷碳同位素、甲烷氢同位素与氦含量的关系,可排除烃源岩母质类型、沉积环境对氦气富集的直接影响,明确氦气与烃类气体的异源成藏特征。李朋朋等(2024)通过统计全球1048个天然气样品数据,建立了He含量与He/N_2值判识图版,实现了壳源型氦气藏供氦模式(基岩供氦、基岩-沉积岩联合供氦、沉积岩供氦)的快速识别。秦胜飞等(2023b)通过对柴达木盆地、四川盆地及美国Hu-

goton-Panhandle气田的氦、氮含量相关性分析，发现富氦气藏中氦气与氮气的相关系数R^2普遍大于0.8，部分气藏/地区如柴达木盆地北缘、四川盆地威远气田、美国德克萨斯州Hugoton-Panhandle气田BrownDol组的R^2高于0.9，提出氦氮富集耦合作用理论——共同以地下水为运移载体，在构造抬升驱动下沿断裂向上运移并释放；可能来自相同的古老基底岩石（氦气来自U、Th衰变，氮气来自含氮化合物高温分解）；氮气对氦气富集起积极作用，其他气体则起稀释作用。

2.1.3 勘探与资源评价方法 （1）天然气兼探氦气方法：氦气勘探评价方法基于天然气兼探理念，形成了多参数协同的有利区优选技术，实现了资源高效勘探。陶士振等（2024a）提出氦气勘探需兼顾氦气“源-运-聚”要素与天然气“生-储-盖”条件的耦合匹配性，重点评价通源连圈、低势高位和气氦适配三大关键条件，强调富氦气藏圈闭需具备高部位、低势能和强封闭特征，盖层以膏盐岩、厚层泥页岩为佳，建立了从区域筛选到目标优选的二级评价流程。李朋朋等（2024）通过对全球富氦气田统计，发现埋深小于4500 m、位于古老克拉通隆起区的圈闭氦气富集概率最高，储层以碳酸盐岩和碎屑岩为主。结合中国氦气资源禀赋与提氦工艺水平，提出基于氦气品位、资源规模和工业化程度的三维优选标准，明确中西部鄂尔多斯、塔里木、四川、柴达木盆地富氦气田（He≥0.1%）为优先部署区，含氦气田（He=0.05%~0.1%）为接替区域。陶士振等（2024b）结合地质理论认识、勘查评价和产业链评估，创新性地提出氦气全产业链一体化评价框架，具体包括投资经济模型，考虑氦气提取成本、运输和储备，考虑高品质源岩、有效迁移和适宜载气体的控制三要素，强调摆脱油气勘探思维，选区基于氦气富集条件，避免稀释区。秦胜飞等（2023a）提出氦气勘探选区思路，避免天然气甜点区、煤层气和火山岩气藏，聚焦基底断裂和古老地层水系统控制的构造高部位。

（2）氦气资源评价方法：中国氦气资源评价方法逐步从传统的体积含量法向成因法过渡，形成了地质条件分析-地球化学表征-资源量估算的综合评价流程。

体积含量法，是通过实测天然气样品中氦气含量，结合气藏地质储量，折算氦气资源量。工业提氦的最低品位标准为氦气含量≥0.1%，当含量≥0.3%时具有显著经济价值（陈践发等，2021）。基于该方法，塔里木盆地和田河气田折算氦气探明地质储量$1.9591\times10^8 m^3$，可采储量1.2137×10^8 m^3（彭威龙等，2023）。鄂尔多斯盆地东胜气田92个样品氦气平均含量0.133%，65个样品含量≥0.1%，折算探明氦气地质储量约$1.96\times10^8 m^3$，均达到特大型富氦气田标准（彭威龙等，2022）。吴小奇等（2025）根据四川新场气田各层位天然气探明储量与平均氦含量，得出该气田氦气探明储量为25.45×10^6 m^3，达到中型气田规模。

成因法，是基于放射性衰变原理，结合氦源岩体积、U/Th含量、衰变时间及运聚系数，量化氦气生成量与资源潜力。核心公式为：$Q=V\times\rho\times C\times T\times K$，其中$Q$为氦气资源量，$V$为氦源岩体积，$\rho$为岩石密度，$C$为U/Th平均生氦速率，$T$为衰变时间，$K$为运聚系数（李玉宏等，2022）。由于我国尚未建立系统的成因法评价参数体系，目前该方法仍处于探索阶段，但已在渭河盆地、柴达木盆地北缘的研究中得到初步应用，通过估算花岗质基底的生氦潜力，预测了区域氦气资源远景（李玉宏等，2022）。陶士振等（2024b）以240 ℃作为生氦深度下限温度，确定氦源岩厚度与体积，通过衰变公式求取四川盆地威远气田U和Th生氦量分别为210×10^8 m^3和225×10^8 m^3，结合运聚系数（0.5%~1.5%），预测研究区氦气资源量为2.18×10^8~6.53×10^8 m^3。

地质-物化探综合评价法，是通过整合地质、地球物理、地球化学数据，圈定氦气有利勘探区。具体流程包括：①地质调查明确氦源岩（花岗质基底、富U/Th沉积岩）分布及运移通道（断裂、不整合面）；②地球物理勘探（重力、电法、磁法）识别隐伏花岗质岩体及断裂系统；③土壤化探圈定氦气异常区，当化探样品氦气丰度高于大气氦丰度（4.6×10^{-6}~5.2×10^{-6}）时，指示深部存在壳源氦供给（李玉宏等，2022）；④地震测量落实圈闭目标，结合氦气录井标定富集层段。该方法已在柴达木盆地北缘、渭河盆地的氦气调查中成功应用，有效圈定了有利勘探区。

资源评价方法体系不断完善。陶士振等（2024b）针对不同载体气藏（常规碎屑岩、碳酸盐岩、致密砂岩、页岩气等）与勘探程度，建立了包括百分含量法（容积法、概率容积法等5种）、统计法（规模序列法）、类比法（丰度类比法、含量类比法等3种）、成因法（生氦法）在内的4类共10种评价方法，形成了基于源储共生关系的系统评价方法体系，解决了氦气资源分级分类评价的技术瓶颈。该方法体系在国内外11个盆地的应用表明，评价结果准确可靠，与体积含量法的计算值相比误差小于30%。

2.2 核心成果梳理

2.2.1 成藏机理研究取得重大突破 借鉴含油气系统理论，围绕氦气“源-运-聚-保”全链条，构建了多要素耦合的成藏模式与评价框架，明确氦气成藏受控于“优质氦源、高效输导、适宜载体”三大主控要素，提出“近氦源、邻断裂、低势区、高部位”的分布规律，为

富氦气藏预测提供了地质理论支撑。

(1)氦源类型与供氦模式多元化:明确了中国氦气具有壳源、幔源和壳幔混源三大成因类型,其中壳源氦为主体,占比超90%(陶士振等,2024a),同时识别出局部地区的幔源氦混入现象(朱光有等,2024)。壳源氦主要来自富U、Th岩石的放射性衰变,有效氦源岩包括古老花岗岩、变质岩、富有机质泥页岩及铝土岩(陶士振等,2024a;张宝收等,2024)。陶士振等(2024a)通过剖析塔里木盆地和田河气田,证实盆地基底新元古代花岗岩U含量达5.13×10^{-6}、Th含量达18.75×10^{-6},是氦气的主力贡献者。在构造活动强烈的盆地及断裂带附近,发现了幔源氦混入的证据。塔里木盆地阿克莫木气田的$^{3}He/^{4}He$值为0.55Ra,幔源氦贡献约7%(陈践发等,2021);苏北盆地、渤海湾盆地因靠近郯庐断裂带,岩浆活动强烈,幔源氦贡献相对较高,部分气藏的R/Ra>1(李玉宏等,2022);松辽盆地北部气藏为壳-幔混合成因,部分气藏以幔源氦为主,其分布受控于盆地内交叉分布的深大断裂。

提出了三类供氦模式:①基岩供氦型,如加拿大Canadian Shield气田,氦气来自前寒武纪火山-变质岩基底,He含量达1.51%~19.10%;②基岩-沉积岩联合供氦型,如美国Hugoton-Panhandle气田和中国威远气田,氦气来自基底花岗岩与沉积岩的共同贡献,He含量为0.29%~1.05%;③沉积岩供氦型,如中国鄂尔多斯盆地东胜气田和四川盆地金秋气田,氦气主要来自石炭-二叠系煤系地层或侏罗系砂岩,He含量为0.13%~0.20%(李朋朋等,2024;张宝收等,2024)。

(2)运移机制与赋存状态明确化:揭示了氦气“三态三方式”运移规律,即赋存状态包括水溶相、气溶相和游离相,运移方式分为集流、渗流和扩散。陶士振等(2024a)通过地下流体相平衡分析,提出氦气在深部以水溶相为主,沿“岩石圈断裂-基底断裂-沉积层断裂-有效输导层”复合体系运移,至浅部气藏区因温压降低脱溶为气溶相或游离相,最终在浮力、水动力和压差驱动等因素下聚集。李玉宏等(2017)基于亨利定律验证了氦气在水溶运移过程中,当遇到CH_4或CO_2气藏时,因分压骤降发生快速脱溶,载体气则溶解进入水中,形成“置换式”运移。

明确了不同类型氦气的运移差异。壳源氦主要通过基底断裂、沉积层断裂和有效输导层运移,运移距离较短(通常小于50 km)(陶士振等,2024a)。幔源氦则需穿越岩石圈深大断裂,沿岩浆活动通道向上运移,运移距离可达100km以上(李朋朋等,2024)。

(3)运聚动力与成藏模式系统化:提出了氦气的三类运聚动力,即脱溶汇聚(含氦地下水运移至气藏气水界面时,因亨利效应脱溶进入天然气相)、浮力驱动(游离相氦气在浮力作用下向构造高部位运移聚集)和压差驱替(生烃增压或氦浓度差导致氦气向低势区运移)。陶士振等(2024a)通过典型气田解剖,证实常规储层氦气聚集以浮力驱动为主,非常规储层(页岩气、煤层气)以压差驱替为主,构造活动强烈区以脱溶汇聚为主。

建立了两类成藏模式:①壳源型成藏模式,进一步分为壳源同源型(自生自储,如四川盆地页岩气藏)和壳源异源型(异地供氦,如柴达木东坪气田);②壳-幔复合型成藏模式,如松辽盆地庆深气田,幔源氦与壳源氦混合聚集,He含量达0.0016%~0.0460%,幔源贡献份额达9.4%~72.9%(李朋朋等,2024)。

(4)保存条件与散失机理清晰化:明确了氦气保存的核心条件是优质盖层、稳定构造背景和低渗透侧向封堵(李朋朋等,2024;陶士振等,2024a)。盖层类型以膏盐岩和厚层泥页岩为佳,突破压力需大于15MPa,美国Hugoton-Panhandle气田二叠系Wichita组石膏层和中国威远气田寒武系暗色泥质岩是典型优质盖层。陶士振等(2024a)通过实验证实,氦气分子直径仅0.26 nm,扩散系数是CH_4的4倍,当盖层孔隙喉道小于0.3 nm时才能有效封闭,但氦气的扩散仍以极其缓慢的速度发生。

揭示了氦气散失的三种主要途径:①扩散散失,通过盖层孔隙喉道扩散,扩散系数随氦气含量升高而增大(李朋朋等,2024);②构造破坏,强烈构造活动导致断裂开启,氦气散失量可达90%,如沁南煤层气田因晚期抬升形成微裂缝,氦气含量仅为8×10^{-3} mg/g(陶士振等,2024a);③水体冲刷,地下水循环活跃区,氦气随水体流失,水溶氦气浓度降低(李玉宏等,2017)。

2.2.2　分布规律与主控因素系统阐明　(1)区域分布特征显著:中国氦气资源呈现“中西部富集、东部分散”的分布格局。中西部克拉通盆地(鄂尔多斯、塔里木、四川、柴达木)是富氦气藏主要分布区,He含量普遍在0.10%以上,已发现东胜、和田河、东坪等特大型富氦气田。鄂尔多斯盆地东胜气田He含量0.13%,地质储量1.96×10^{8} m^3;塔里木盆地和田河气田He含量0.32%,地质储量1.92×10^{8} m^3;柴达木盆地东坪气田He含量0.27%~1.069%,是中国首个基岩型富氦气田;四川盆地威远气田He含量0.24%,是中国首个工业提氦基地(李朋朋等,2024)。

我国东部构造活动区(松辽、渤海湾和苏北等盆地)氦气含量较低(0.0008%~0.048%),但存在壳幔混源氦气,如渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区He含量达2.08%~3.08%,幔源贡献份额约45%(李朋朋等,

2024)。此外，渭河和晋中等盆地还发育水溶氦气资源，渭河盆地华阴渭热76井水溶氦含量高达9.23%，晋中盆地晋热1号井氦气含量达8.50%~18.86%，但因分离成本过高尚未实现工业化开发(陶士振等，2024a)。

(2)富集主控因素明确：明确氦气富集受源、运、聚、保四大因素控制，即①优质氦源，氦源岩U、Th元素含量高($U\geq2.5\times10^{-6}$，$Th\geq10\times10^{-6}$)、规模大(分布面积≥1000km^2)、埋藏浅(≤5km)(陶士振等，2024a；张宝收等，2024)；②高效输导，具备断裂-不整合面-储层构成的复合输导体系，断裂活动强度适中(活动速率≤0.1 mm/a)(陶士振等，2024a)；③适宜载体，天然气载体气含量适中(储量丰度≤2×10^8m^3/km^2)，避免氦气过度稀释(张宝收等，2024)；④有效保存，盖层封闭性强(突破压力≥15MPa)、构造稳定(晚期构造抬升幅度小于2 km)(李朋朋等，2024；陶士振等，2024a)。陶士振等(2024a)强调“气氦适配”，天然气规模与氦气供给通量匹配时才能形成规模性富氦气藏，天然气规模过大或过小均不利于氦气富集。

2.2.3 资源评价与有利区优选成果丰硕 (1)资源潜力评估取得进展：初步查明全国氦气总资源量约为78.5亿m^3(刘成林等，2025)，远超美国地质调查局估算的11亿m^3。李朋朋等(2024)通过对全国主要含油气盆地评价，预测鄂尔多斯盆地氦气资源量最大，达3.5×10^8 m^3，其次为塔里木盆地(2.8×10^8 m^3)、四川盆地(2.2×10^8 m^3)、柴达木盆地(1.5×10^8 m^3)。此外，四川盆地页岩气中氦气资源潜力巨大，五峰组-龙马溪组页岩气氦气含量约0.04%，探明储量达10.8亿m^3，属于特大型贫氦气田，通过液化天然气(LNG)尾气提氦技术可实现有效利用。

(2)有利区带划分明确：提出了全国氦气三大有利勘探区带，包括①中西部克拉通盆地隆起带，包括鄂尔多斯盆地伊盟隆起、塔里木盆地麦盖提斜坡、四川盆地乐山-龙女寺古隆起、柴达木盆地北缘斜坡，He含量0.10%~0.34%，是优先部署区；②东部构造活动区深大断裂带，包括松辽盆地三肇凹陷、渤海湾盆地济阳坳陷、苏北盆地溪桥地区，He含量0.008%~3.08%，幔源氦贡献较高，是潜在勘探区；③水溶氦气富集区，包括渭河盆地渭南地区、晋中盆地、三水盆地，水溶氦含量0.259%~18.86%，是远景储备区(李朋朋等，2024；陶士振等，2024a)。

2.2.4 典型富氦气田取得重要发现 鄂尔多斯盆地东胜气田是中国首个特大致密砂岩型富氦气田(彭威龙等，2022)，储层为二叠系下石盒子组致密砂岩，He平均含量0.13%，地质储量1.96亿m^3(赵栋等，2023；李朋朋等，2024)。氦气主要来自石炭系本溪组铝土岩和石炭-二叠系煤系地层，U、Th含量分别为24.47×10^{-6}和82.4×10^{-6}，属于沉积岩供氦型(李朋朋等，2024)。成藏模式为抬升脱溶型，喜马拉雅期构造抬升幅度达4 km，导致孔隙水中氦气大规模脱溶，在浮力驱动下聚集于构造高部位(赵栋等，2023)。四川盆地金秋气田是典型中生界沉积岩供氦型气田，储层为侏罗系沙溪庙组砂岩，He含量0.02%~0.20%，平均含量0.07%。氦气来自侏罗系储层自身。成藏受控于高生气强度氦源岩、适度烃类充注和构造抬升脱溶三大因素，压力系数0.32~1.17，天然气储量丰度小于2×10^8 m^3/km^2(张宝收等，2024)。柴达木盆地东坪气田是中国首个基岩型富氦气田，储层为古近系下伏基底结晶岩系，He含量0.045%~1.069%，平均0.27%。氦气来自元古宙-加里东期花岗岩基底，U含量3.2×10^{-6}、Th含量20.99×10^{-6}，属于基岩供氦型(李朋朋等，2024)。成藏模式为置换脱溶型，天然气沿基岩不整合面向隆起区运移，萃取孔隙水中的氦气，在上覆古近系路乐河组含膏泥岩封闭下聚集(赵栋等，2023)。塔里木盆地和田河气田是中国首个特大型富氦气田，氦气含量0.2%~0.36995%，折算氦气探明地质储量1.9591×10^8 m^3(彭威龙等，2023)。此外，塔里木盆地巴什托构造、雅克拉气田，四川盆地威远气田，柴达木盆地北缘等地区均发现富氦天然气显示，氦气含量0.1%~2.19%(陈践发等，2021；李玉宏等，2022；彭威龙等，2023)。

2.3 未来研究方向展望

基于现有研究方法与成果进展，结合我国氦气资源相对匮乏、对外依存度居高不下的现状，未来应重点围绕以下方向开展研究：

(1)氦源岩精细识别与定量评价技术攻关。现有研究对沉积岩氦源潜力的定量评价不足，未来可重点关注以下三方面。第一，建立沉积岩氦源岩评价标准，明确不同类型沉积岩(泥页岩、砂岩、铝土岩)的U、Th含量下限和生氦强度阈值。第二，结合重磁电震数据与测井自然伽马能谱分析开发氦源岩三维预测技术，实现氦源岩分布与厚度的精准刻画。第三，建立考虑铀钍元素含量、衰变时间、岩石孔隙度、氦气释放系数等多因素的氦气生成量定量计算模型，提高氦源潜力评价精度。

(2)氦气运聚过程定量模拟与成藏效应耦合研究。当前氦气运聚模拟研究多为单因素静态模拟，未来需发展多场耦合动态模拟技术：①构建“温度-压力-流体-构造”四场耦合模型，模拟不同构造演化阶段氦气的赋存状态转换与运移路径变化；②建立氦气与天然气耦合成藏模拟技术，定量分析天然气充注强度对氦气富集的影响，明确“气氦适配”的量化指

标;③开发氦气保存条件动态评价模型,预测不同地质时期盖层封闭性演化与氦气散失量。

(3)低丰度氦气高效提纯与开发技术研发。中国低丰度氦气资源(He=0.05%~0.1%)占比大,但现有技术提氦成本过高,未来需重点研发:①复合提纯技术,结合膜分离、变压吸附、低温精馏等工艺,降低低丰度氦气提纯成本;②气田开发优化技术,针对富氦气藏制定合理开采速度与压力保持策略,减少氦气散失;③水溶氦气开发技术,研发高效水-气分离与氦气提纯一体化设备,实现渭河盆地、晋中盆地等地高含量水溶氦气的工业化开发。

(4)氦气资源战略储备与产业链协同发展。面对中国氦气对外依存度长期超过90%的现状,需构建勘探-开发-储备-利用一体化产业链:①开展全国氦气资源详查,重点勘探鄂尔多斯、塔里木、四川盆地等有利区带;②建立战略储备基地,在中西部富氦气田周边建设氦气储备库;③加强产学研协同,突破氦气提纯、储运、应用等关键技术,降低对进口的依赖。

(5)特殊类型氦气藏勘探开发潜力研究。现有研究主要聚焦于常规天然气伴生氦气,未来需拓展特殊类型氦气藏研究。对于页岩型氦气藏,重点评价四川盆地寒武系、奥陶系页岩氦气潜力,建立页岩气与氦气共采技术;对于煤层型氦气藏,对鄂尔多斯盆地东缘、沁水盆地煤层气田氦气资源进行勘探,开发煤-气-氦共采工艺;对于幔源型氦气藏,在东部构造活动区深大断裂带开展勘探,寻找高含量幔源氦气藏。

3　结语

作为应用广泛的稀缺资源,氦气的勘探开发研究关乎国家战略安全。本文构建了数据驱动量化表征与传统综述理论整合的双范式研究方法体系,突破了单一研究范式的局限,系统解读了我国氦气勘探开发领域的学术格局、发展规律、研究方法、核心成果与战略方向。数据驱动部分以中国知网相关中文文献为数据源,基于知识图谱方法实现载文期刊、基金、机构、作者的可视化与定量化分析,克服传统综述的作者主观偏好缺陷,揭示领域发展的隐性规律。传统综述部分基于“源-运-聚-保”成藏理论,系统整合地球化学、地质勘探等多学科方法,厘清氦气研究的技术脉络与理论突破,详细论述了研究方法、成藏机理、分布规律和资源潜力的一体式理论体系,弥补数据驱动研究机理阐释不足的短板。两种方法的有机融合既实现了对研究现状的客观刻画,又完成了对理论成果的系统升华,为氦气战略资源领域研究提供了新的方法论参考。

作者贡献声明: 李华洋,论文构思、数据收集、方法分析、文稿撰写及修改、图表绘制等;刘全有,文稿指导、基金支持等。

利益冲突声明: 作者保证本文无利益冲突。

致谢: 审稿专家对本文进行了认真审阅,提出了许多细致且宝贵的意见,在此致以诚挚的谢意!

参考文献 (References):

陈燕燕, 温志新, 陶士振, 吴伟, 刘祥柏, 杨秀春, 高建荣, 刘庆尧, 李靖, 杨怡青, 陈悦. 2025. 页岩气和煤层气中氦气富集机理与资源潜力: 以川南页岩气和鄂东缘煤层气为例. 地学前缘, 32(5): 244–257［Chen Y Y, Wen Z X, Tao S Z, Wu W, Liu X B, Yang X C, Gao J R, Liu Q Y, Li J, Yang Y Q, Chen Y. 2025. Enrichment mechanism and resource potential of helium in shale gasand coalbed methane plays: A case study of shale gas in Southern Sichuan Basin and coalbed methane in Eastern Ordos Basin. Earth Science Frontiers, 32(5): 244–257 (in Chinese with English abstract)］

陈践发, 刘凯旋, 董劾伟, 汪华, 罗冰, 戴鑫. 2021. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景. 天然气地球科学, 32(10): 1436–1449［Chen J F, Liu K X, Dong Q W, Wang H, Luo B, Dai X. 2021. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China. Natural Gas Geoscience, 32(10): 1436–1449 (in Chinese with English abstract)］

戴金星. 2003. 威远气田成藏期及气源. 石油实验地质, 25(5): 473–480［Dai J X. 2003. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gasfield. Petroleum Geology & Experiment, 25(5): 473–480 (in Chinese with English abstract)］

董敏, 王宗秀, 董会, 李宏, 张林炎, 马立成. 2017. 关中盆地花岗岩石英脉流体包裹体与氦气成藏特征研究. 西北地质, 50(3): 222–230［Dong M, Wang Z X, Dong H, Li H, Zhang L Y, Ma L C. 2017. Fluid inclusions characteristics of quartz vein in granite and helium accumulation in Guanzhong Basin, Shaanxi Province. Northwestern Geology, 50(3): 222–230 (in Chinese with English abstract)］

范立勇, 魏建设, 胡爱平, 李玉宏, 谢林泽, 姜涛, 张宇轩, 马尚伟. 2025. 鄂尔多斯盆地苏里格气田含氦天然气地球化学特征、氦气成因来源及成藏主控因素. 天然气地球科学, 36(3): 399–412［Fan L Y, Wei J S, Hu A P, Li Y H, Xie L Z, Jiang T, Zhang Y X, Ma S W. 2025. Geochemical characteristics, origin and main controlling factors of helium gas accumulation of helium-bearing natural gas in Sulige Gas Field, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 36(3): 399–412 (in Chinese with English abstract)］

高宇, 刘全有, 吴小奇, 朱东亚, 李朋朋. 2023. 鄂尔多斯盆地东胜与大牛地气田壳源氦气成藏差异性. 天然气地球科学, 34(10): 1790–1800［Gao Y, Liu Q Y, Wu X Q, Zhu D Y, Li P P. 2023. Research on the difference of crustal helium accumulation in Dongsheng and Daniudi gas fields, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 34(10): 1790–1800 (in Chinese)］

韩伟, 李玉宏, 任战利, 刘晓晔, 周俊林, 李成福. 2025. 渭河盆地构造热演化对富氦天然气成藏的影响. 天然气地球科学, 36(3): 390–398［Han W, Li Y H, Ren Z L, Liu X Y, Zhou J L, Li C F. 2025. Influence of tectonic thermal evolution on the accumulation of helium-rich natural gas in Weihe Basin. Natural Gas Geoscience, 36(3): 390–398 (in Chinese with English abstract)］

He J L, Li S J, Zhao A K, Wang D, Gao J, Zhou X L, Ahmed M S, Wang Z H, Zhu L X. 2024. The relationship between helium-rich gas and regional shale in the Sichuan Basin, Southwest China. Frontiers in Earth Science, 12: 1491017

贺政阳, 杨国军, 周俊林, 李玉宏, 张文, 何文发, 郑斌, 韩伟, 马尚伟. 2022. 柴达木盆地北缘天然气中氦气富集规律与远景区预测. 西北地质, 55(4): 45–60［He Z Y, Yang G J, Zhou J L, Li Y H, Zhang W, He W F, Zheng B, Han W, Ma S W. 2022. Helium enrichment law and predication of prospective areas of the north Qaidam Basin. Northwestern Geology, 55(4): 45–60 (in Chinese)］

Hoseinzade L, Adams T A II. 2019. Techno-economic and environmental analyses of a novel, sustainable process for production of liquid fuels using helium heat transfer. Applied Energy, 236: 850–866

Li W Q, Liu H C, Holland G, Zhou Z, Chen J F, Li J, Wang X B. 2025. Accumulation mechanism of crust–mantle mixing helium-rich reservoir: A case study of the Subei Basin (Eastern China). International Geology Review, 67(8): 1132–1145

李扬, 彭皓, 赵婉雨, 杨雨寒. 2024. 全球深地储能技术研究态势分析. 高科技与产业化, 30(12): 100–103［Li Y, Peng H, Zhao W Y, Yang Y H. 2024. Analysis of global deep underground energy storage research situation. High-Technology & Industrialization, 30(12): 100–103 (in Chinese with English abstract)］

李朋朋, 刘全有, 朱东亚, 朱地, Zheng ZHOU, 吴小奇, 孟庆强, 吕佳豪, 高宇. 2024. 含油气盆地氦气分布特征与成藏机制. 中国科学: 地球科学, 54(10): 3195–3218［Li P P, Liu Q Y, Zhu D Y, Zhu D, Zhou Zheng, Wu X Q, Meng Q Q, Lü J H, Gao Y. 2024. Distribution characteristics and accumulation mechanism of helium in petroliferous basins. Science China Earth Sciences, 54(10): 3195–3218 (in Chinese with English abstract)］

李华洋, 邓金根, 谭强, 陈家傲, 董保宏, 朱施杰, 严科, 白炜政. 2024. 基于知识图谱的中国碳捕集、利用与封存领域研究历程. 中国电机工程学报, 44(13): 5219–5234［Li H Y, Deng J G, Tan Q, Chen J A, Dong B H, Zhu S J, Yan K, Bai W Z. 2024. Research process of carbon capture, utilization and storage in China based on knowledge map. Proceedings of the CSEE, 44(13): 5219–5234 (in Chinese with English abstract)］

李华洋, 谭强, 陈家傲, 牛正文, 朱施杰, 施锡林. 2024. 基于文献计量法的中国氢能研究历程. 太阳能学报, 45(5): 276–288［Li H Y, Tan Q, Chen J A, Niu Z W, Zhu S J, Shi X L. 2024. Evolution of hydrogen energy research in China based on bibliometric analysis. Acta Energiae Solaris Sinica, 45(5): 276–288 (in Chinese with English abstract)］

李玉宏, 张文, 王利, 赵峰华, 韩伟, 陈高潮. 2017. 亨利定律与壳源氦气弱源成藏: 以渭河盆地为例. 天然气地球科学, 28(4): 495–501［Li Y H, Zhang W, Wang L, Zhao F H, Han W, Chen G C. 2017. Henry's Law and accumulation of crust-derived helium: A case from Weihe Basin, China. Natural Gas Geoscience, 28(4): 495–501 (in Chinese with English abstract)］

李玉宏, 李济远, 周俊林, 赵峰华, 徐聃. 2022. 氦气资源评价相关问题认识与进展. 地球科学与环境学报, 44(3): 363–373［Li Y H, Li J Y, Zhou J L, Zhao F H, Xu D. 2022. Research progress and new views on evaluation of helium resources. Journal of Earth Sciences and Environment, 44(3): 363–373 (in Chinese)］

刘成林, 洪思婕, 王馨佩, 范立勇, 王海东, 陈践发, 朱玉新, 丁振刚, 张雪, 胡浩然. 2025. 中国氦气勘探开发进展与展望. 石油与天然气地质, 46(3): 777–789［Liu C L, Hong S J, Wang X P, Fan L Y, Wang H D, Chen J F, Zhu Y X, Ding Z G, Zhang X, Hu H R. 2025. Progress and prospects of helium exploration and production in China. Oil & Gas Geology, 46(3): 777–789 (in Chinese with English abstract)］

刘成林, 丁振刚, 范立勇, 康锐, 洪思婕, 朱玉新, 陈践发, 王海东, 许诺. 2024. 鄂尔多斯盆地含氦天然气地球化学特征与富集影响因素. 石油与天然气地质, 45(2): 384–392［Liu C L, Ding Z G, Fan L Y, Kang R, Hong S J, Zhu Y X, Chen J F, Wang H D, Xu N. 2024. Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 45(2): 384–392 (in Chinese with English abstract)］

刘全有, 魏永波, 朱东亚, 吴小奇, 孟庆强, 李朋朋, 符印, 朱地, 张旺, 金之钧. 2025. 沉积盆地稀贵气体形成与富集机制.中国科学:地球科学, 55(10): 3401–3420［Liu Q Y, Wei Y B, Zhu D Y, Wu X Q, Meng Q Q, Li P P, Fu Y, Zhu D, Zhang W, Jin Z J. 2025. Formation and enrichment mechanisms of precious gas in sedimentary basins. Science China: Earth Sciences, 55(10): 3401–3420 (in Chinese with English abstract)］

Liu Q Y, Li P P, Zhu D Y, Zhu D, Wu X Q, Wang X F, Tao X W, Meng Q Q, Xu H Y, Gao Y, Zhou Z. 2024. Helium resource in the petroliferous basins in China and its development prospects. Cell Reports Physical Science, 5(6): 102031

Lv J H, Liu Q Y, Li P P, Liu J R, Zhou Z. 2025. Distribution and enrichment mechanism of helium in the Hetianhe gas field, Tarim basin, northwest China. Marine and Petroleum Geology, 173: 107285

蒙炳坤, 李靖, 周世新, 淡永, 张庆玉, 聂国权. 2023. 黔南坳陷震旦系–寒武系页岩解析气中氦气成因及来源. 天然气地球科学, 34(4): 647–655［Meng B K, Li J, Zhou S X, Dan Y, Zhang Q Y, Nie G Q. 2023. Origin and source of helium in the resolved gas of Sinian-Cambrian shale in the Qiannan Depression. Natural Gas Geoscience, 34(4): 647–655 (in Chinese with English abstract)］

聂海宽, 刘全有, 党伟, 李沛, 苏海琨, 包汉勇, 熊亮, 刘珠江, 孙川翔, 张培先. 2023. 页岩型氦气富集机理与资源潜力——以四川盆地五峰组-龙马溪组为例. 中国科学: 地球科学, 53(6): 1285–1294［Nie H K, Liu Q Y, Dang W, Li P, Su H K, Bao H Y, Xiong L, Liu Z J, Sun C X, Zhang P X. 2023. Enrichment mechanism and resource potential of shale-type helium: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin. Science China: Earth Sciences, 53(06): 1285–1294 (in Chinese with English abstract)］

彭威龙, 林会喜, 刘全有, 邓尚, 张继标, 张永, 冯帆, 马安来, 周波. 2023. 塔里木盆地氦气地球化学特征及有利勘探区. 天然气地球科学, 34(4): 576–586［Peng W L, Lin H X, Liu Q Y, Deng S, Zhang J B, Zhang Y, Feng F, Ma A L, Zhou B. 2023. Geochemical characteristics of helium and favorable exploration areas in the Tarim Basin, China. Natural Gas Geoscience, 34(4): 576–586 (in Chinese)］

彭威龙, 刘全有, 张英, 贾会冲, 朱东亚, 孟庆强, 吴小奇, 邓尚, 马永生. 2022. 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. 中国科学: 地球科学, 52(6): 1078–1085［Peng W L, Liu Q Y, Zhang Y, Jia H C, Zhu D Y, Meng Q Q, Wu X Q, Deng S, Ma Y S. 2022. Characteristics of Dongsheng gas field in Ordos Basin, the first super tight sandstone-type (hydrocarbon) helium-rich gas field in China. Scientia Sinica (Terrae), 52(6): 1078–1085 (in Chinese)］

秦胜飞, 窦立荣, 陶刚, 李济远, 齐雯, 李晓斌, 郭彬程, 赵姿卓, 王佳美. 2024. 氦气富集理论及富氦资源勘探思路. 石油勘探与开发, 51(5): 1160–1174［Qin S F, Dou L R, Tao G, Li J Y, Qi W, Li X B, Guo B

C, Zhao Z Z, Wang J M. 2024. Helium enrichment theory and exploration ideas for helium-rich gas reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 51(5): 1160–1174 (in Chinese with English abstract)］

秦胜飞, 陶刚, 罗鑫, 郭艳波, 龚德瑜. 2023. 氦气富集与天然气成藏差异、勘探误区. 天然气工业, 43(12): 138–151［Qin S F, Tao G, Luo X, Guo Y B, Gong D Y. 2023. Difference between helium enrichment and natural gas accumulation and misunderstandings in helium exploration. Natural Gas Industry, 43(12): 138–151 (in Chinese with English abstract)］

秦胜飞, 周国晓, 李济远, 陶刚, 赵姿卓. 2023. 氦气与氮气富集耦合作用及其重要意义. 天然气地球科学, 34(11): 1981–1992［Qin S F, Zhou G X, Li J Y, Tao G, Zhao Z Z. 2023. The coupling effect of helium and nitrogen enrichment and its significance. Natural Gas Geoscience, 34(11): 1981–1992 (in Chinese with English abstract)］

司庆红, 曾威, 刘行, 胡少华, 张超, 王佳营, 黄忠峰, 何鹏. 2023. 临汾-运城盆地氦气富集要素及成藏条件. 西北地质, 56(1): 129–141［Si Q H, Zeng W, Liu H, Hu S H, Zhang C, Wang J Y, Huang Z F, He P. 2023. Analysis of helium enrichment factors and reservoir forming conditions in Linfen-Yuncheng Basin. Northwestern Geology, 56(1): 129–141 (in Chinese)］

陶士振, 杨怡青, 陈悦, 刘祥柏, 杨威, 李剑, 吴义平, 陶小晚, 高建荣, 陈燕燕, 王晓波, 吴晓智, 陈秀艳, 李谦, 贾进华. 2024. 氦气资源形成地质条件、成因机理与富集规律. 石油勘探与开发, 51(2): 436–452［Tao S Z, Yang Y Q, Chen Y, Liu X B, Yang W, Li J, Wu Y P, Tao X W, Gao J R, Chen Y Y, Wang X B, Wu X Z, Chen X Y, Li Q, Jia J H. 2024. Geological conditions, genetic mechanisms and accumulation patterns of helium resources. Petroleum Exploration and Development, 51(2): 436–452 (in Chinese with English abstract)］

陶士振, 吴义平, 陶小晚, 王晓波, 王青, 陈胜, 高建荣, 吴晓智, 刘申奥艺, 宋连腾, 陈荣, 李谦, 杨怡青, 陈悦, 陈秀艳, 陈燕燕, 齐雯. 2024. 氦气地质理论认识、资源勘查评价与全产业链一体化评价关键技术. 地学前缘, 31(1): 351–367［Tao S Z, Wu Y P, Tao X W, Wang X B, Wang Q, Chen S, Gao J R, Wu X Z, Liu S A Y, Song L T, Chen R, Li Q, Yang Y Q, Chen Y, Chen X Y, Chen Y Y, Qi W. 2024. Helium: Accumulation model, resource exploration and evaluation, and integrative evaluation of the entire industrial chain. Earth Science Frontiers, 31(1): 351–367 (in Chinese with English abstract)］

王晓锋, 赵栋, 张东东, 李孝甫, 陈科羽, 刘文汇. 2025. 有效氦源岩类型及氦气释放机理. 天然气地球科学, 36(3): 381–389［Wang X F, Zhao D, Zhang D D, Li X F, Chen K Y, Liu W H. 2025. Characteristics of effective helium source rocks and releasing mechanism of helium. Natural Gas Geoscience, 36(3): 381–389 (in Chinese with English abstract)］

张涛, 王晓锋, 金晓辉, 孟庆强, 王怡然, 陈晓艳, 张雯, 张隽. 2024. 鄂尔多斯盆地南部古生界天然气地球化学特征与成因. 天然气地球科学, 35(9): 1616–1625［Zhang T, Wang X F, Jin X H, Meng Q Q, Wang Y R, Chen X Y, Zhang W, Zhang J. 2024. Geochemical characteristics and genesis of Paleozoic natural gas in the southern Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 35(9): 1616–1625 (in Chinese with English abstract)］

王晓锋, 刘全有, 刘文汇, 张东东, 李孝甫, 赵栋. 2022. 中国东部含油气盆地幔源氦气资源富集成藏机理. 中国科学: 地球科学, 52(12): 2441–2453［Wang X F, Liu Q Y, Liu W H, Zhang D D, Li X P, Zhao D. 2022. Accumulation mechanism of mantle-derived helium resources in petroliferous basins, Eastern China. Scientia Sinica (Terrae), 52(12): 2441–2453 (in Chinese with English abstract)］

Wang X F, Liu Q Y, Liu W H, Li X B, Tao C, Li X F, Zhao D, Zhang J Y, Zhu D Y, Meng Q Q, Xu H Y, Wu X Q. 2023. Helium accumulation in natural gas systems in Chinese sedimentary basins. Marine and Petroleum Geology, 150: 106155

Wu X Q, Liu Q Y, Ni C H, Wang P, Zhu D Y, Jia H C. 2025. Abundance and origin of helium in the Lower Paleozoic gas: A case study from the Daniudi field of the Ordos Basin, Central China. Journal of Asian Earth Sciences, 277: 106405

吴小奇, 刘全有, 王萍, 黎华继, 朱东亚, 李朋朋. 2025. 沉积盆地天然气藏中氦气贫化机理及资源潜力: 以四川盆地新场气田为例. 吉林大学学报(地球科学版), 55(6): 1837–1850［Wu X Q, Liu Q Y, Wang P, Li H J, Zhu D Y, Li P P. 2025. Depletion mechanisms and resource potential of helium in natural gas pools in sedimentary basins: A case study of Xinchang gas field, Sichuan Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 55(6): 1837–1850 (in Chinese with English abstract)］

徐永昌, 沈平, 陶明信, 孙明良. 1990. 幔源氦的工业储聚和郯庐大断裂带. 科学通报, 35(12): 932–935［Xu Y C, Shen P, Tao M X, Sun M L. 1990. Industrial accumulation of mantle-derived helium and the Tan-Lu fault zone. Chinese Science Bulletin, 35(12): 932–935 (in Chinese)］

许光, 李玉宏, 王宗起, 尤龙. 2023. 我国氦气资源调查评价进展. 地质学报, 97(5): 1711–1716［Xu G, Li Y H, Wang Z Q, You L. 2023. Progress of investigation and evaluation of helium resources in China. Acta Geologica Sinica, 97(5): 1711–1716 (in Chinese)］

杨紫恒, 张盛, 李春亮. 2024. 综合物探技术在民和盆地氦气资源调查中的应用. 石化技术, 31(8): 239–241［Yang Z H, Zhang S, Li C L. 2024. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in helium resource investigation in Minhe basin. Petrochemical Industry Technology, 31(8): 239–241 (in Chinese)］

杨兆彪, 顾俊雨, 傅雪海, 田文广, 毕彩芹, 韩永胜, 梁宇辉, 张宝鑫. 2025. 筠连沐爱区块富氦煤层气成藏模式及其特殊意义. 煤炭科学技术, 53(3): 101–114［Yang Z B, Gu J Y, Fu X H, Tian W G, Bi C Q, Han Y S, Liang Y H, Zhang B X. 2025. Formation model and special significance of helium-rich coalbed methane reservoirs in Mu'ai Block, Junlian. Coal Science and Technology, 53(3): 101–114 (in Chinese with English abstract)］

赵安坤, 王东, 时志强, 程锦翔, 王启宇, 何江林, 李龙, 雷子慧. 2022. 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. 西北地质, 55(4): 74–84［Zhao A K, Wang D, Shi Z Q, Cheng J X, Wang Q Y, He J L, Li L, Lei Z H. 2022. Exploration status and helium resource potential of the helium-bearing natural gas field in Sichuan Basin and its surrounding areas. Northwestern Geology, 55(4): 74–84 (in Chinese with English abstract)］

Zhao D, Wang X F, Liu W H, Li X B, Zhang D D, Li X F, Zhang J Y. 2024. Mechanisms of helium differential enrichment and helium-nitrogen coupling: A case study from the Weiyuan and Anyue gas fields, Sichuan Basin, China. Geological Journal, 59(1): 272–287

张海祖, 刘佳润, 张文, 李朋朋, 黄少英, 吕佳豪, 张慧芳, 朱必清, 娄洪. 2025. 塔里木盆地哈得逊地区氦气分布特征及成藏模式. 天然气地球科学, 36(3): 444–454［Zhang H Z, Liu J R, Zhang W, Li P P, Huang S Y, Lü J H, Zhang H F, Zhu B Q, Lou H. 2025. Helium distribution characteristics and accumulation pattern in Hadexun area, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 36(3): 444–454 (in Chinese with English abstract)］

张宝收, 张本健, 汪华, 陈践发, 刘凯旋, 豆霜, 戴鑫, 陈双玲. 2024. 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. 石油与天然气地质, 45(1): 185–199［Zhang B S, Zhang B J, Wang H, Chen J F, Liu K X, Dou S, Dai X, Chen S L. 2024. 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. Oil & Gas Geology, 45(1): 185–199 (in Chinese with English abstract)］

张哲, 黄骞, 王春燕, 柳英明, 陈思锭. 2024. 中国氦气全产业链发展现状与展望. 油气与新能源, 36(2): 1–9［Zhang Z, Huang Q, Wang C Y, Liu Y M, Chen S D. 2024. Status quo and prospects of the whole helium industry chain in China. Petroleum and New Energy, 36(2): 1–9 (in Chinese with English abstract)］

张超, 郑佩君, 费鹏飞, 路厚源, 罗双江. 2024. 基于Incopat专利信息的膜法天然气提氦技术发展态势分析. 膜科学与技术, 44(3): 163–173［Zhang C, Zheng P J, Fei P F, Lu H Y, Luo S J. 2024. Analysis of the development trend of helium recovery from natural gas technology based on incopat patent information. Membrane Science and Technology, 44(3): 163–173 (in Chinese with English abstract)］

赵栋, 王晓锋, 刘文汇, 张东东, 李孝甫, 张珈毓. 2023. 孔隙水中氦气溶解与脱溶量估算方法及其地质意义. 天然气工业, 43(2): 155–164［Zhao D, Wang X F, Liu W H, Zhang D D, Li X F, Zhang J Y. 2023. Calculation method and geological significance of dissolved and exsolved helium in pore water. Natural Gas Industry, 43(2): 155–164 (in Chinese with English abstract)］

周俊林, 李玉宏, 魏建设, 张文, 张乔, 韩伟, 马尚伟, 李济远, 贺政阳. 2022. 渭河盆地固市凹陷华州北地区氦气地质条件与富集模式. 西北地质, 55(4): 33–44［Zhou J L, Li Y H, Wei J S, Zhang W, Zhang Q, Han W, Ma S W, Li J Y, He Z Y. 2022. Geological conditions and enrichment model of helium in north Huazhou area of Gushi depression, Weihe Basin, China. Northwestern Geology, 55(4): 33–44 (in Chinese with English abstract)］

朱东亚, 刘全有, 李朋朋, 高宇, 金晓辉, 孟庆强, 张军涛, 吴小奇. 2024. 富氦气藏源储关系及富集机理. 地质学报, 98(11): 3182–3201［Zhu D Y, Liu Q Y, Li P P, Gao Y, Jin X H, Meng Q Q, Zhang J T, Wu X Q. 2024. Configuration relationship of source and reservoir and enrichment mechanism of helium-rich gas reservoirs. Acta Geologica Sinica, 98 (11): 3182–3201 (in Chinese with English abstract)］

邹勇军, 肖富强, 章双龙, 李玉宏. 2022. 江西省温泉伴生气氦含量特征及其成因分析. 西北地质, 55(4): 85–94［Zou Y J, Xiao F Q, Zhang S L, Li Y H. 2022. Characteristics and causes of helium content in hot spring associated gas of jiangxi province. Northwestern Geology, 55(4): 85–94 (in Chinese with English abstract)］

朱光有, 张岩, 张志遥, 艾依飞, 李茜, 段鹏珍, 刘金城. 2024. 非传统石油地质学理论的内涵与外延. 天然气地球科学, 35(5): 763–784［Zhu G Y, Zhang Y, Zhang Z Y, Ai Y F, Li Q, Duan P Z, Liu J C. 2024. Connotation and extension of non-traditional petroleum geology theory. Natural Gas Geoscience, 35(5): 763–784 (in Chinese with English abstract)］

（本文责任编辑：龚超颖；英文审校：张兴春）