

全球天然氢气研究现状与发展趋势

韩双彪¹,王 缙¹,黄 劼¹,王成善²

[1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京 100083]

摘要:未来能源格局中,低碳甚至零碳能源将成为重要组成部分,而天然氢气的发展前景尤为广阔。全球已掀起了天然氢的探寻热潮,回顾天然氢气研究历史与进展,评价当下所面临问题与未来发展趋势,可为下一阶段天然氢气勘探工作方向与研究计划制定提供参考依据。利用中国知网和 Web of Science 等数据库,系统检索了全球与天然氢气主题相关的学术论文,通过对 200 余篇论文的分布特征研究,揭示了研究机构、科研群体及基金资助等情况,分析了全球天然氢气研究现状,探讨了其现阶段面临的问题与未来研究的发展方向。研究结果表明:①相较于国外,中国天然氢气论文总数偏少,且理论体系并不完善,但受到国家资助的研究项目比例较前期明显增加,呈现出典型的快速发展阶段特征。②在未来较长的时间内,构建完善的天然氢气系统以及建立科学的资源评价理论方法,将成为天然氢气研究的核心方向。以天然氢气专探井为主要手段的地质基础研究工作必将受到高度重视,围绕氢源潜力、天然氢气赋存相态以及天然氢气储层封闭性等关键问题的相关研究工作也将逐步有序展开。③未来天然氢气领域的发展,离不开多学科的交叉融合,国家层面的政策与资金支持、科技攻关及国际合作将会是中国天然氢气相关研究与勘探迅速发展的必要条件。

关键词:研究进展;趋势展望;富集成藏;氢气系统;天然氢气

中图分类号:TE132.3

文献标识码:A

Current status and future trends of global research on natural hydrogen

HAN Shuangbiao¹, WANG Jin¹, HUANG Jie¹, WANG Chengshan²

[1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Low-carbon or even zero-carbon energy will become an integral part in future energy landscape, with natural hydrogen emerging as a particularly promising resource. In the context of the global surge in natural hydrogen exploration, reviewing the history and advances in research on natural hydrogen, as well as assessing current challenges and predicting future trends in the research, will provide a reference for determining the subsequent exploration directions and research schemes. In this study, we systematically retrieve global academic articles on natural hydrogen from databases such as CNKI and Web of Science. By analyzing the distribution of over 200 articles, we identify the research institutions, scientific communities, and funding sources involved. Furthermore, we assess the status quo of global research on natural hydrogen and explore the challenges faced at the present stage and future directions. The results of this study indicate that compared to international publications on natural hydrogen, domestic articles are fewer in number and exhibit theoretical systems poorly-established. However, the proportion of state-funded research projects involved in the domestic articles has significantly increased, indicating that the domestic research is typically entering a rapid development stage. For a prolonged period in the future, constructing a comprehensive natural hydrogen system and developing theoretical methods for scientific resource evaluation will remain a central focus of natural hydrogen research. Fundamental geological research on natural hydrogen centered around dedicated natural hydrogen exploration wells, will be undoubtedly valued. Furthermore, research on key topics, such as hydrogen source potential, the occurrence state of natural hydrogen, and the sealing performance of natural hydrogen reservoirs, will be undertaken systematically. Interdisciplinary integration will be essential for advancing the natural hydrogen field. Furthermore, the

收稿日期:2024-11-18;修回日期:2025-05-06。

第一作者简介:韩双彪(1987—),男,副教授、博士研究生导师,天然氢气地质评价、非常规油气成藏机理。E-mail:bjcuphan@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42072168);中央高校基本科研业务费项目(2023ZKPYDC07)。

rapid advancement in natural hydrogen research and exploration in China will require national-level policies and financial support, technological breakthroughs, and international cooperation.

Key words: research progress, trend and prospect, enrichment and accumulation, hydrogen system, natural hydrogen

引用格式:韩双彪,王缙,黄勃,等. 全球天然氢气研究现状与发展趋势[J]. 石油与天然气地质,2025,46(3):790–808. DOI:10.11743/ogg20250307.

HAN Shuangbiao, WANG Jin, HUANG Jie, et al. Current status and future trends of global research on natural hydrogen [J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(3):790–808. DOI:10.11743/ogg20250307.

能源的发展史是从低效、高碳、昂贵的燃料逐渐向高效、清洁、低廉的燃料过渡的历史。从钻木取火到煤炭、石油、天然气及风能、氢能等绿色能源,能源革命不断推动着人类社会的发展。氢气作为一种极具潜力的气体能源,凭借其清洁和高效的特性,在未来能源结构中展现出极大的发展前景^[1],吸引了世界各国的关注。近年来,天然氢气的研究已成为全球能源研究的一个重要热点^[2–3],许多国家已经开展了天然氢气的勘探与研究工作,且在这一领域已经取得突破性进展^[4–8]。然而,相较于国外,中国天然氢气的研究与勘探开发仍处于探索与起步阶段。国外学者不仅在天然氢气理论方面取得了一定的成果,还开展了多项氢气渗漏的勘探与检测活动^[9–12]。这些研究成果与实践案例,对中国未来天然氢气的勘探与研究工作具有重要的借鉴意义。

在任何研究领域,学术论文的分布不仅反映该领域的发展历程,还在一定程度上预示未来的发展趋势。因此,分析全球天然氢气相关论文的产出特点,追踪研究机构和团队的动态,对于回顾全球天然氢气的研究历史、总结其形成机制与勘探方法、分析当前研究中存在的问题以及预测未来的发展趋势具有重要的指导意义。尽管国内外学者已对天然氢气的分布、成因来源以及赋存环境等方面进行了探索,但整体上对这一领域的认识仍显不足^[13],这表明对天然氢气的各个方面进行系统性研究有助于更好地理解当前的研究现状,并为后续研究提供理论基础和方向指引。本文利用国内外期刊论文数据库,对近百年来全球天然氢气相关论文进行了全面评价,通过对这些统计数据进行分析,研究了论文在发表时间、数量及研究主题等方面的分布特征。这种定量分析不仅能够为中国在这一领域的发展提供指导,还能为全球的地质氢能源研究提供借鉴和参考,进而指导未来天然氢气的勘探并促进其产业化应用进程。

1 天然氢气论文检索分析

1.1 论文总体分布情况

中国与国外相比,其天然氢气主题论文数量和研

究深度略显不足,中国天然氢气研究处于初级阶段。近40年,中国天然氢气相关论文总数极少,年平均仅约1.85篇,反映出中国天然氢气研究程度较低(图1)。在论文类别分布方面,期刊论文占90.70%,会议摘要占8.14%,学位论文占1.16%(表1)。以氢气为主题的相关论文占比为70.45%,以石油天然气工业为主题的相关论文占比为29.55%,且石油天然气工业主题论文中的天然氢气仅作为天然气组分的一部分出现在相关数据内容中。尽管直接与天然氢气主题相关的文章内容占到了一半数量以上,但其中56.60%的论文主要内容叙述的是地震(断层)附近或者断层中氢气的浓度变化,没有对天然氢气的勘探、成因等方面进行

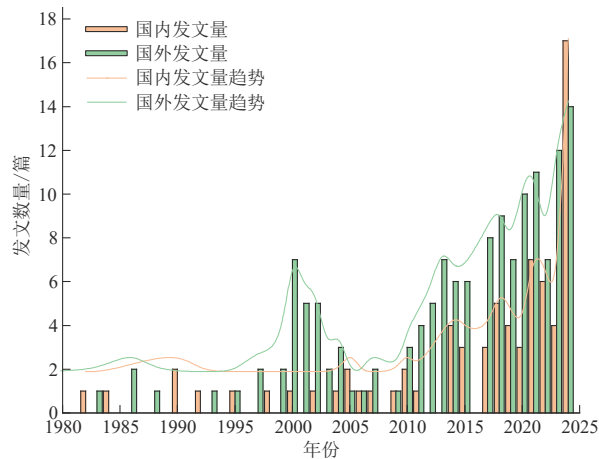


图1 天然氢气研究论文分布特征柱状图

Fig. 1 Distribution of global research articles on natural hydrogen

表1 中国天然氢气主题论文类型数量统计

Table 1 Statistics on the types of domestic articles on natural hydrogen

年份	数量/篇		
	期刊论文	会议论文	学位论文
1982—1999	6	0	0
2000—2009	14	0	1
2010—2019	20	2	0
2020—2024	38	5	0
总计	78	7	1

系统研究。除此之外,16.98%的论文叙述了氢气的成因及来源,15.09%的论文是对国外现有实例的综述与总结(集中在21世纪20年代),9.43%的论文是对国外成果的翻译与转述(集中在20世纪90年代前后),仅有1.89%的论文内容涉及到天然氢气的检测方法。截至目前,中国天然氢气主题相关论文总被引频次为513,篇均被引频次6.33,篇均下载量295.94次,体现了目前中国天然氢气研究成果虽然较少但仍受到学术界密切关注的特点。

国外天然氢气相关论文数量众多,从1888年至今,论文主题以及摘要中涉及天然氢气的文章总数为186篇,年平均4.04篇。其中绝大部分为期刊论文(占89.06%),少部分为会议摘要(占7.13%)与学位论文(占3.81%)。期刊论文中,综述类文章占总期刊论文数量的3.90%,45.65%的文章内容涉及火山气体和温泉天然氢气的成因与来源(集中在20世纪初—21世纪20年代),41.30%的文章内容涉及区域内天然氢气勘探研究成果(集中在2020年至今),13.32%的文章涉及到煤田和油气钻井中的天然氢气发现(20世纪之前)。所有的论文均涉及地质学领域,近半数的文章内容涉及到环境科学与生态学,近30%的文章涉及到生物化学、地球化学、地球物理学以及微生物学等学科领域。从跨学科研究广度和文献产出规模来看,国际天然氢气研究已形成显著优势,目前仍处于快速发展期;相比之下,中国在该领域的研究仍存在明显差距。

1.2 天然氢气研究发展特征

相较于国外,中国学者在早期研究阶段对天然氢气能源潜力的关注相对不足。直至21世纪初,国内学者才逐步聚焦于天然气伴生氢的特征分析及检测技术研发。2010年代松辽盆地等高含量氢气的发现,标志着中国天然氢气研究进入实证探索阶段,并呈现出与国际研究接轨的发展态势。中国学者早在1982年就在断裂(层)或地震发生前后的地质环境中检测到氢气的存在。21世纪初,已有学者对中国商都盆地、沁水盆地等地区天然气中氢气地球化学特征、释放规律及微量氢气检测技术进行了初步探讨^[14-22]。然而,受限于当时全球范围内缺乏天然氢气商业化开发案例,以及“氢气无法在地下环境中富集成藏”的传统认知局限,“天然气中伴生氢气”这一主题在21世纪初的前10年内未得到足够重视。这一局面在2010年代发生转变。松辽盆地徐家围子断陷连续高含量氢气的发现,促使学者们对该地区不同层位天然氢气的来源与成因

进行了初步判识,并对天然氢气形成机制进行了分类^[23-24]。2018年以来,相关理论研究显著增多,包括岩石中天然氢气吸附机制及其影响因素研究,以及基于国外天然氢气勘探研究成果的中国天然氢气潜力区预测评价等。同时,中国即墨断裂温泉、三水盆地等地区渗漏氢气的发现,也为中国天然氢气勘探工作奠定了坚实的实证基础^[25-29]。2024年前半年内发表的自然氢气勘探相关文章数量占到自1982年以来发表文章数量的1/8,研究团队主体开始从地震局向高校转移,研究内容也从天然氢气来源与成因向富集成藏条件转移,标志着中国天然氢气研究进入了一个全新发展阶段(图2)。

国外天然氢气研究始于19世纪80年代末,其早期研究特征与中国早期阶段(20世纪末)类似,主要表现为对不同地质环境中天然氢气发现的报道^[30-32]。然而,在此后的百余年间,国外学者针对天然氢气的有机与无机成因来源展开了大量研究。20世纪末,微生物作用与有机质热解过程中氢气的形成与消耗作用成为主要研究方向。随着在火山喷口、洋中脊、温泉、森林与土壤环境中不断发现异常天然氢气含量,研究重心逐渐从有机成因转向无机成因氢气,世界各地火山气体中氢气的地球化学特征研究数量迅速增加^[33-36]。至21世纪10年代中期,研究焦点进一步转向蛇纹石和前寒武系岩石等富铁岩石的成氢机制。尽管该阶段火山气体的长期检测研究仍在持续,但学界已普遍认识到岩石-流体相互作用在氢气形成中的关键地位,这也是研究阶段发生转型的重要标志^[37]。经过百余年的积累,国外已建立起较为完整的天然氢气成因理论体系,为后续快速发展奠定了坚实基础。21世纪10年代中期以来,全球掀起了新一轮的“淘氢潮”。俄罗斯、加拿大、澳大利亚、美国 and 法国等国的研究主要集中在:①地表天然氢气渗漏相关勘探理论与方法;②地下“氢系统”模型的构建。这些进展为天然氢气勘探提供了重要理论支撑,加速了

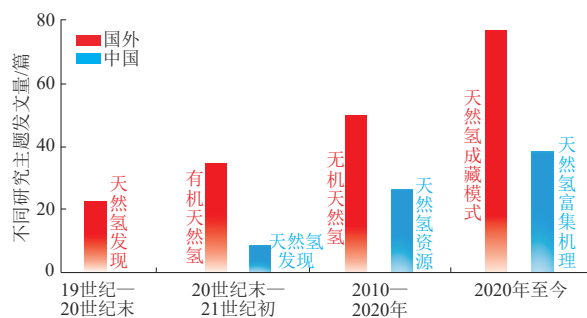


图2 天然氢气研究发展阶段时序特征柱状图

Fig. 2 Temporal characteristics of the development stages of global research on natural hydrogen

全球范围内的天然氢气勘探和开发。

1.3 天然氢气研究机构与团队

中国天然氢气研究具有明显的阶段性,从早期以地震预测分析为主逐步转向以资源属性探索为核心。前期主要由地震局等机构主导,而随后则由高校和中国石油/中国石化等国有能源企业主导,显示出研究重心的变化和日益增加的学术关注,与国外以大型能源集团/组织为主导形成鲜明对比,同时相关研究团队的作用也在逐步增强。在具体研究机构分布方面,早期阶段(2000—2015年)的研究力量主要集中在黑龙江省地震局(发文占比20.00%)、中国地震局地壳应力研究所、山西省地震局、中国地震局地震预测研究所以及中国科学院地质与地球物理研究所等机构。这些机构的研究主要聚焦于氢气释放与地震活动的关系探索,其发文量占该阶段总发文量的65.00%。中后期阶段(2016年至今),开始重点关注天然氢气资源属性,研究机构以北京大学、中国石化石油勘探开发研究院、中国矿业大学(北京)、中国地质大学(北京)、中国石油勘探开发研究院以及中国科学院广州地球化学研究所等为主,其发文量占总

体的58.90%。其中,高校系统[北京大学、中国矿业大学(北京)和中国地质大学(北京)]表现尤为突出,发文量占比达34.25%;能源企业研究机构(中国石化石油勘探开发研究院和中国石油勘探开发研究院)合计占比24.66%。其余41.10%的研究力量分散于其他高校和科研机构,主要聚焦于国际天然氢气勘探进展综述和国内资源潜力评估等方面(图3)。

国外天然氢气研究机构主要包括高校、国家科研机构以及能源公司。在以天然氢气勘探为研究重心的阶段,高校和能源公司的发文比例占据了相当大的部分,分别为45.89%和36.30%,合计82.19%;国家科研机构发文占比最低,仅仅为17.81%。具体来看,法国石油研究院(IFP)、波城大学(UPPA)、格勒诺布尔阿尔卑斯大学以及巴西国际天然氢开发研究公司(GEO4U)分别以6.16%,6.16%,5.48%和4.11%的发文占比位居前列,其余如美国斯坦福大学、科罗拉多矿业学院以及Natural Hydrogen Energy公司等占比均低于3.00%。天然氢气勘探相关研究学科带头人主要以Isabelle Moretti, Alain Prinzhofer, Laurent Truche和Eric Deville等为主,他们的个人发文占比均为

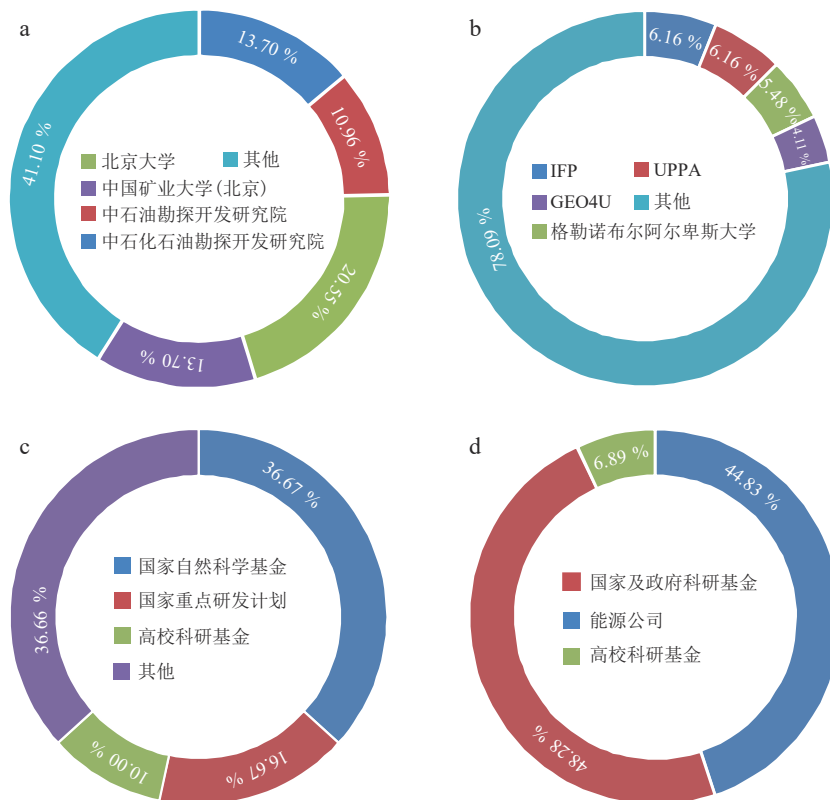


图3 国内外天然氢气主要研究机构与基金分布

Fig. 3 Major global research institutions and funding source distribution for natural hydrogen research

a. 中国研究组织机构; b. 国外主要研究组织机构; c. 中国研究基金资助来源; d. 国外研究基金资助来源

3.50%;文章通信作者中以 Isabelle Moretti (10.53%) 与 Omar Maiga (7.89%) 为主, Laurent Truche, Nicolas Lefeuvre, Emanuelle Frery 和 Alain Prinzhofer 等人的发文占比保持在5.00%左右。这些学者引领的团队在全球氢气勘探研究方面走在了世界前列,主导了天然氢气勘探研究的学术走向。而在以天然氢气发现、氢气有机成因理论为主的前期阶段,高校(发文占比65.08%)与科研机构(发文占比22.22%)构成了绝对主体,能源公司参与度最低。该阶段尚未出现具有明显优势的学科带头人,各团队文章发表数量较为平均,与此后阶段有明显区别。

天然氢气研究的资助格局呈现出显著的国内外差异(图3)。在国内研究资助方面,2021年中国国家自然科学基金对天然氢气研究的资助占比达到36.66%,较同期以地震关联性为目标的研究增长了17.62%。国家重点研发计划和中央高校基本科研业务费专项资金的资助占比分别为16.67%和10.00%,均呈现显著增长态势。这一资助趋势的转变表明,学术界和国家层面正日益重视天然氢气的能源价值,其研究定位已从最初的地震前兆气体,逐步演变为天然气伴生气直至独立的能源气体,标志着我国天然氢气研究已进入新的发展阶段。与国内不同的是,国外天然氢气相关文章获得赞助的情况较少,仅有30.95%的国外研究论文明确标注了资助来源,这些资助主要来自能源企业(44.83%)和国家政府项目(48.28%)。其中,法国道达尔石油及天然气公司与波城大学是重要的资助方,而高校科研基金的资助比例相对较低(6.89%)。这种资助结构反映出国外已形成相对成熟的产-学-研合作模式,研究机构呈现多元化发展态势。当前,中国已形成以金之钧院士、王成善院士和张水昌院士等为核心的学术引领团队。随着国家对天然氢气重视程度的提升,这些团队有望在未来的研究中承担更多重大课题,发挥关键引领作用。密切跟踪这些核心团队的科研动态,将有助于准确把握国内天然氢气研究的发展趋势和研究前沿。

2 天然氢气研究与勘探现状

2.1 天然氢气富集成藏理论

从最初发现天然氢气到如今天然氢气动态成藏理论的初步建立,人们对天然氢气的认识逐渐完善。厘清天然氢气富集成藏理论研究的发展历程有助于更加深入地完善天然氢气理论模型。随着全球范围内土壤

氢气渗漏检测数据的积累,人们初步尝试对这些地区的天然氢气富集特征进行解释,但这种特定地区的天然氢气赋存模式的解释侧重于氢气的成因与地下的环境特征^[38-43],可以概括为:①根据气体同位素或者地下岩石特征判定氢气来源;②区域内的断裂(层)系统可能是氢气运移的通道或者圈闭的一部分;③“仙女圈”(fairy circle)作为地表氢气渗漏的典型地貌标志,表现为半圆形至圆形的特征性凹陷结构。当前理论认为,深部生成的氢气经扩散作用向上运移,其活跃的化学性质导致与围岩发生系列反应,生成水、碳氢化合物及酸性物质等产物,同时这些产物与岩石可能发生二次反应并随着地下流体迁移出反应区。这些化学反应不仅改变岩石组分和孔隙结构,促进氢气垂向运移通道的形成,同时引发围岩塌陷,最终在地表形成各类凹陷地貌,即“仙女圈”^[38,41]。2020—2024年间,诸如此类针对特定区域的氢气富集研究模型研究呈现快速增长趋势(图4)。这种特定区域氢气富集模型的建立通常基于客观环境因素的研究预测,但对地下氢气生成和运移过程的直接验证仍存在局限。值得注意的是,现有模型虽借鉴了常规油气系统理论,并初步区分了氢气与烃类气体的成因差异,在整体上为进一步建立更为合理的“氢系统”提供了充足的实例与理论基础,但尚未充分考量氢气扩散作用强、化学性质活泼等关键特性,导致其与常规油气系统在本质上的差异未能得到充分体现。

本研究结合大量天然氢气勘探成果,从众多天然氢气富集模型中分析出符合天然氢气自身特点且区别于常规石油天然气系统的3大动态富集成藏规律(图5):①天然氢气成藏过程是动态的,氢的生成和消耗作用在地下同时发生,工业级天然氢气富集体的形成依赖稳定持续的氢源补给系统^[27];②天然氢气通常形成于地下较深的位置,而众多勘探发现表明天然氢气往往富集在较浅的位置(深度<1 km),因此需要沟通氢源与富集层的断裂通道^[44];③天然氢气渗漏检测工作与实验成果证明天然氢气的扩散能力较强,形成有利资源富集区可能需要致密的储-盖组合或者构造圈闭^[27]。当前国内外研究不仅开始注意氢气区别于石油天然气的特殊性质,还跳出了特定地质区域与环境等局限因素,开始根据大量的勘探研究成果尝试总结出如何寻找并且判识“氢系统”的科学范式。

2023年发表的一篇探讨天然氢气扩散机制的论文通过类比传统“烃系统”(hydrocarbon systems),创新性地提出了“氢系统”(hydrogen system)的概念框架,并对两类系统之间的区别与联系进行了初步解释^[44]。

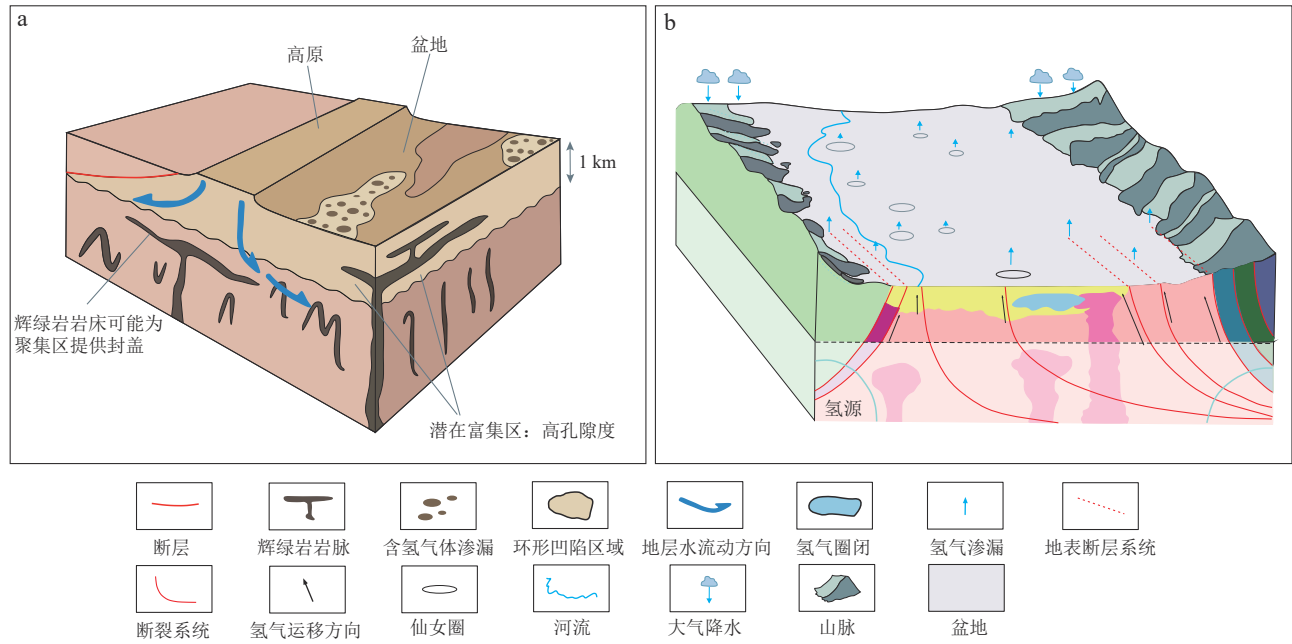


图4 天然氢气富集模型(据参考文献[13,38]修改)

Fig. 4 Schematic diagrams showing natural hydrogen enrichment models (modified after references [13,38])

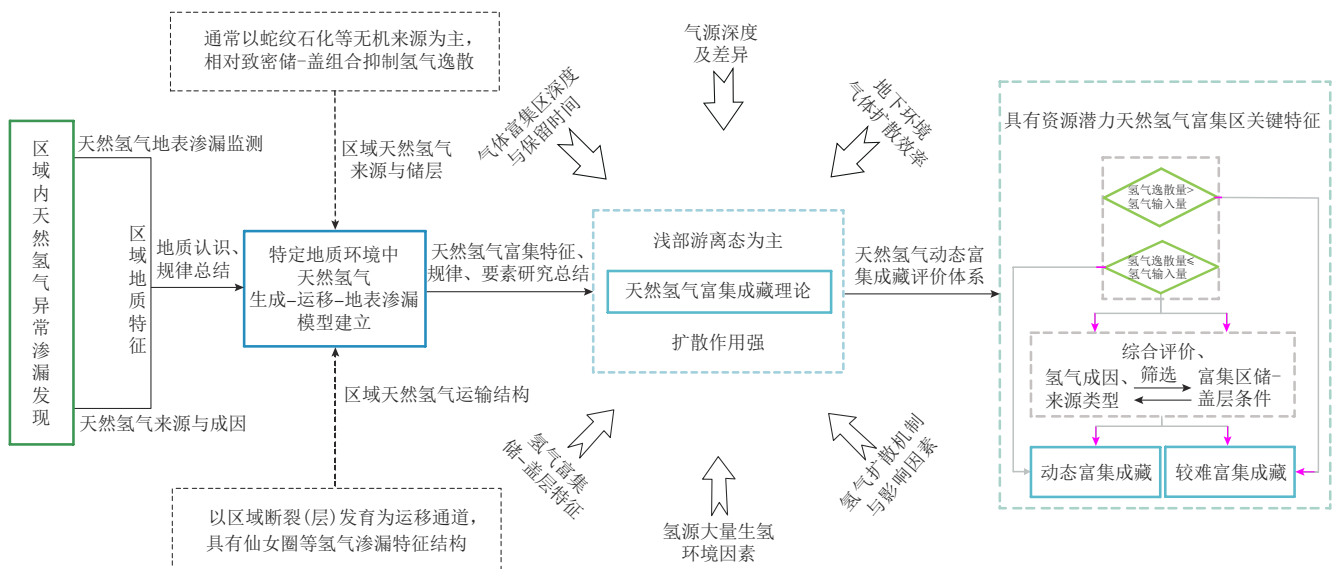


图5 天然氢气富集成藏规律评价流程

Fig. 5 Flow chart showing the assessment of the enrichment and accumulation patterns of natural hydrogen

在该理论体系中,尽管有学者提出氢气可能来源于有机质演化后期的裂解作用,但目前普遍认为天然氢主要源自无机成因,即与铁氧化相关的水岩反应、水辐射分解作用、黄铁矿化过程以及地幔或地核脱气作用。“氢系统”中的“产氢灶”被认为比常规油气窗的埋深更大,两类系统最显著的差异在于形成时间尺度:成熟的“烃系统”需要数百万年的地质演化,相比之下人类文明存在的时间显得极为短暂,这使得已发现的“烃系统”在人类时间尺度上呈现相对静态的特征。值得注

意的是,虽然现今仍有碳氢化合物在地下缓慢生成,但其形成速率远不能满足人类对化石能源的消耗需求。与之形成鲜明对比的是,天然氢在人类时间尺度上表现出可再生特性,马里和美国部分钻井的监测数据显示氢气含量随开发过程呈现明显的动态补充特征^[45-46]。与“烃系统”中不同的生油气阶段类似的是,“氢系统”也存在不同的“年龄阶段”,愈加年轻的“氢系统”中氢气的含量占比越高。

随着天然氢气勘探研究的深入,学界对“氢系统”

的定义日趋完善,认为完整的“氢系统”应该包含氢气的产生、运移和密封(或捕获)3个关键环节,具体可分为2个子系统:①在“氢源子系统”(source-generation sub-system)中,需要具备超镁铁质岩石(通常在盆地基底)和途径基底岩石的充足地下水;②在“运移-保留子系统”(migration-retention sub-system)中,气态氢的运移机制和圈闭特征与烃类气体相似^[47]。与“烃系统”不同的是,“氢系统”中的“氢源岩”通常位于基底,与运移通道和赋存区域在空间上是分离的,而烃源岩则作为盆地动力学的有机组成部分存在于盆地内部。当前学界普遍认同“氢系统”的形成时间相对于“烃系统”百万年级别的演化过程而言堪称“瞬时”,可能仅需数百年的时间。尽管在此过程中会有部分氢气从圈闭中扩散损失,但类似甲烷的散失情况,这种损失对整体储量影响有限。全球典型含氢盆地的气体组分分析显示:马里 Bourakebougou 气藏含 98.0% 氢气、1.0% 氮气、1.8% 甲烷和 500×10^{-6} 氦气,形成于约 500 a 前;澳大利亚袋鼠岛低甲烷气藏形成于约 2×10^4 a 前;Amadeus 盆地气藏具有约 100×10^4 a 的历史;菲律宾和土耳其蛇绿岩相关混合气藏则分别形成于 5 000 a 和 4×10^4 a 前^[44]。这些实证研究表明氢气可以在圈闭中长期保存,若氢气生成作用持续进行,则可能形成具有可持续开发潜力的天然氢资源。现有研究虽然初步揭示了地下“氢系统”的结构特征,但氢气成因来源复杂、易扩散、易消耗,地下气体的平衡方程也表明“氢系统”中并不是简单的气体之间的物理分馏,导致目前尚难准确判定氢气在地下的确切保存时限。不过大量研究数据表明,多数地质环境中“氢系统”的寿命大致介于 $10 \sim 100$ a^[44];随着时间推移,“氢系统”可能逐渐向“烃系统”转化,氢气从气体的主要组成逐渐变成甲烷等天然气中的伴生气,所以越“年轻”的“氢系统”或许更加具有勘探开发潜力。

2.2 勘探技术及目标区优选

天然氢气的勘探主要集中在裂谷、仙女圈、寒武系克拉通以及蛇绿岩富集区,这些靶区的选择是基于对氢气成因机理和赋存特征的深入认识^[48]。值得注意的是,这些潜在氢源区往往表现出显著的重力或磁力异常特征,这为地球物理勘探技术的应用提供了重要依据。地震勘探技术不仅能有效识别地下构造特征,还可以对区域内气体烟囱特征进行分析,如地震数据成像揭示了澳大利亚 Darling 断层与氢气潜在迁移路径之间的关联性^[49]。航磁技术可以分辨地下磁异常,在寻找富铁矿体、基性-超基性岩带等潜在富铁氢源

岩的工作中起到重要作用。国际研究案例表明,法国巴黎盆地 Evry 断裂带附近的含氢钻井区就是通过航磁异常识别出其下伏的基性岩与片麻岩-花岗岩复合体^[50];中国学者在青藏高原通过高精度航磁资料分析,成功刻画了蛇绿岩的分布特征,并进一步推测出地下隐伏蛇绿岩带的分布情况^[51]。因此,在寻找潜在氢源岩的过程中,通常将地震与航磁等技术相结合,以期获得更为精确的地下环境特征。

在地表氢气渗漏调查方面,遥感技术发挥着不可替代的作用。多源遥感数据(包括数字高程模型 DEM、多光谱卫星影像、数字地质图和植被指数等)的综合分析,为识别潜在富氢区提供了有效手段^[42,49,52-53]。其中,DEM 数据可精确获取研究区地形地貌特征;通过结合 Landsat 影像和陆地成像仪(OLI)传感器数据,对遥感图像进行云层去除、光谱校正和影像滤波等预处理,可以在 30 m 空间分辨率下提供高精度地表信息;卫星图像能够清晰识别具有椭圆或圆形特征的表面异常形态及其空间分布规律;数字地形模型则能全面反映高程、坡向和坡度变化率等地形因子的空间特征;在植被分析方面,归一化植被指数(NDVI)通过计算红色波段和近红外波段的反射率比值来评估植被覆盖状况(NDVI 取值范围为 $-1 \sim 1$, $0 \sim 1$ 代表活跃和茂密的植被,而低于 0 的值则代表水体或无植被区域)。为弥补 NDVI 在低植被覆盖区的局限性,研究人员提出了土壤调节植被指数(SAVI),并引入校正因子(L),使模型更为广泛适用于不同植被覆盖程度的评估。此外,拉曼激光雷达系统也是氢气遥感探测的重要技术,能够远程测量氢气的分布范围和浓度。然而,由于氢气的拉曼反向散射截面小,导致散射信号较弱,特别是在自然光环境下,背景干扰会进一步降低信噪比,使得远距离探测面临较大挑战。

手持便携式仪器也被广泛用于土壤和温泉等环境中的氢气含量测定。在测量土壤中氢气含量时,首先需在土壤中钻孔,钻探深度通常为 $0.5 \sim 1.0$ m,随后需立即将不锈钢管插入孔中以隔绝空气干扰,并连接检测仪进行实时监测,待读数稳定后记录数据。而在温泉氢气探测中,需先利用便携式多参数水质分析仪测定水温、pH 值及氧化还原电位,再采用排水集气法采集逸出气体,最终通过气体分析仪测定气体成分及含量。目前常用的便携式氢气探测器包括 GA5000, Variotec 460 Tracergas 和 MS400-FU-H₂ 等^[4,7,11-12,27,39-40,54]。GA5000 能够直接测量多种气体的含量,其氢气的测量上限为 $1\,000 \times 10^{-6}$;Variotec 460 Tracergas 仪器最初设

计用于监测工业设施和建筑工地的氢气泄漏(且只能检测氢气),能够覆盖0~100%的氢气浓度。将Variotec与GA5000结合使用,可以更全面地分析现场采集的气体成分;MS400-FU-H₂便携式氢气检测报警仪则用于快速检测氢气浓度,并测量环境的温度和湿度。然而,这些便携式仪器也存在局限性,如果在土壤气体检测过程中进气口与不锈钢钢管连接不良,可能会混入空气,影响数据准确性。因此,进行土壤测量时,不锈钢钢管钻头的直径应与管径匹配,以避免测试结果出现偏差。

在已实施钻探作业的地区,测井技术的应用对识别氢气富集层位及表征储层性质具有决定性作用。2023年10—12月,澳大利亚成功实施了Ramsay 1和Ramsay 2天然氢气专探井的钻探,揭示了多个深度层段存在显著的氢气和氦气异常^[55]。Ramsay 2井的测井记录显示氢气富集区可划分为7个明显的层段,其中531 m深度处经过空气校正后,氢气纯度高达95.8%,未经校正的氦气纯度也高达17.5%。在奥陶系Kulpara组白云岩剖面612~777 m深度处有氦气显示,而180 m深度处的产层显示出相当高的氦气含量,储层白云岩及其裂缝具有高渗透率的特征^[55]。马里Bougou-19井的测井结果显示,在110~150,330~390和465~520 m深度均有氢气聚集,浅部氢气储层岩性以白云质碳酸盐岩为主,且大部分呈岩溶状态,孔隙度不均匀(0.21%~14.32%);深部氢气储层为多孔砂岩,孔隙度相对均匀(4.52%~6.37%),显示出更稳定的储气特性^[43]。

传统观念长期认为氢气在地下难以存在或量少而无勘探价值,但随着全球多地检测到氢气,天然氢气已成为地质与能源领域的关注热点。目前,国内外的天然氢气勘查体系包括遥感、地震、航磁、钻探等多种技术方法,通过选择潜在有利区开展调查以明确氢气的来源、成因、运移和成藏机制。氢气检测技术是限制对这一自然资源认识的主要因素之一,目前的勘探技术仍处于起步阶段,且现有勘探方法主要集中在已知的氢气渗漏表面或井附近,或通过地貌特征(如仙女圈)和土壤采样寻找氢气迹象。结合多学科方法的天然氢气勘探将是未来的发展趋势,明确具体的工作流程,将为天然氢气的勘探开发提供有力支撑(图6)。

2.3 典型勘探开发实例与启示

2018年,马里成功实现了天然氢气的商业化开发,目前在全球多种地质环境中均发现一定含量的氢

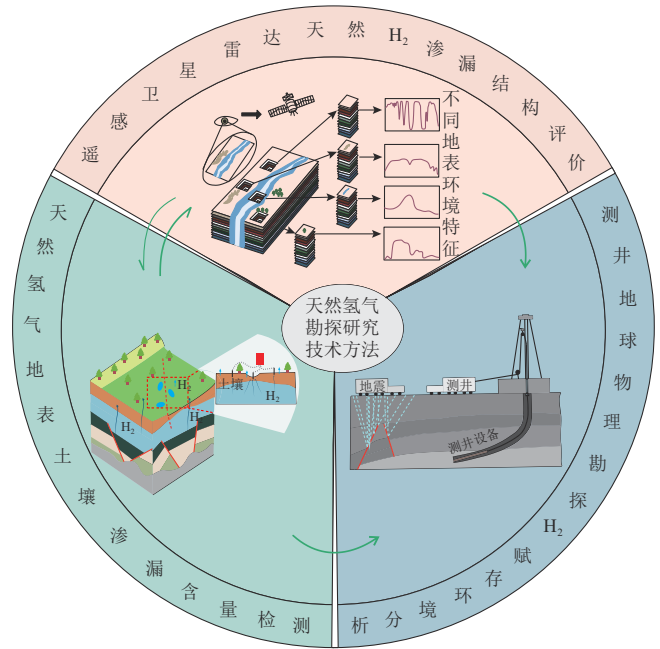


图6 天然氢气勘探技术与流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing technologies, methods, and processes used in natural hydrogen exploration

气。陆上火成岩区构成了富氢天然气的重要赋存环境,包括蛇绿岩、裂谷带、火山热液、间歇泉等;金伯利岩裂缝同样具备储氢潜力;在火成岩与沉积岩共生区域,与铁、金、铀、汞、铜等金属矿床伴生的氢气资源值得关注;蒸发岩地层(如硫酸盐蒸发岩和钾盐蒸发岩)因其优异的封闭性常形成优质氢储层;常规油气田通常氢气含量较低,但部分高氢油气田可能与深部天然气液化过程存在成因联系;在大洋中脊裂谷带的基岩中,氢气常以流体包裹体形式存在;全球最主要的天然氢富集区集中于前寒武系结晶基底及其上覆的克拉通盆地,然而目前针对这些区域的专项勘探钻井仍十分有限(表2)。

全球范围内已发现多口与高含量氢气相关的典型钻井,主要包括:非洲马里Taoudeni盆地的Bougou井,美国堪萨斯州的Heins#1, Scott#1与Sue Duroche#2井,美国内布拉斯加州Geneva地区的一口深度3 400 m的深井,吉布提Asal-Ghoubet裂谷的地热钻井,中国松辽盆地大陆科学钻探项目的松科2井,以及澳大利亚约克半岛与袋鼠岛的Ramsay 1号与Ramsay 2号钻井。由于部分钻井资料尚未披露,本次研究重点对马里、美国堪萨斯州及中国松辽盆地的天然氢气勘探情况展开系统分析。

马里氢气田的发现具有里程碑意义,作为全球首个商业化开发的天然氢气田,其氢气浓度高达98%。在正式钻探前,Hydroma公司对马里25个区块进行了

表2 全球典型的天然氢气发现
Table 2 Typical global discoveries of natural hydrogen

国家	典型氢气发现	赋存相态	资料来源
美国	堪萨斯洲钻井中发现 H ₂ 含量最高 91.70 %, 在加利福尼亚和北卡罗来纳州地表均检测到 H ₂ 浓度 $(0 \sim 1\,043) \times 10^{-6}$	游离态	文献[11,53,56]
哥伦比亚	Cauca-Patia 山谷圆形结构中检测到 H ₂ 浓度为 $(6 \sim 330) \times 10^{-6}$	游离态	文献[13]
加拿大	加拿大地盾的许多勘探钻孔中 H ₂ 的含量最高可达 30.00 %; 雪茄湖铀矿床上伏黏土层中最高 H ₂ 浓度为 500×10^{-6}	游离态、 吸附态、 溶解态	文献[57-58]
阿曼	Semail 蛇绿岩上方温泉中 H ₂ 含量为 0 ~ 8.79 %; Hajar 山脉渗漏 H ₂ 浓度分布范围为 $(20 \sim 650) \times 10^{-6}$	游离态、 溶解态	文献[7]
菲律宾	Zambales 蛇绿岩裂缝渗漏气体中 H ₂ 的含量最高可达 42.00 %	游离态	文献[59]
法国	比利牛斯山地表渗漏 H ₂ 浓度最高超过 $1\,000 \times 10^{-6}$	游离态	文献[39-40]
俄罗斯	俄罗斯克拉通数千个直径从 100 m 到几千米的亚圆形构造中 H ₂ 最高含量为 1.25 %	游离态	文献[4]
土耳其	土耳其 Tekirova 蛇绿岩中可能存在含有大量 CH ₄ 与 H ₂ 的储层, 其中 H ₂ 的含量可达 10.00 %	游离态	文献[60]
阿尔巴尼亚	Bulqizë 铬铁矿中 H ₂ 含量最高可达 84.00 %	游离态、 溶解态	文献[6]
新喀里多尼亚	新喀里多尼亚领土全境中均发现有 H ₂ , 其中部分温泉溶解着 0 ~ 36.07 % 的 H ₂ 含量	游离态、 溶解态	文献[39]
马里	马里 Taoudeni 盆地 H ₂ 含量最高可达 98.00 %, 成功商业化开发	游离态、 溶解态	文献[1]
澳大利亚	约克半拉姆齐 1 号与拉姆齐 2 号钻井中 H ₂ 含量最高可达 95.80 %; Frog's Leg 金矿检测到 H ₂ 含量为 19.90 % ~ 68.70 %; Grass Patch 与 North Perth 盆地地表圆形结构中检测到 H ₂ 浓度为 $(0 \sim 70) \times 10^{-6}$	游离态、 溶解态、 包裹体态	文献[30,41-42, 54,61]
中国	中国松辽盆地钻井中的 H ₂ 含量为 0 ~ 85.54 %; 三水盆地中渗漏 H ₂ 浓度最高可达 $6\,948 \times 10^{-6}$; 即墨断裂周围温泉溶解气体中 H ₂ 含量为 2.40 % ~ 12.50 %	游离态、 溶解态	文献[27-28,64]

初步的土壤地球化学勘测,发现“仙女圈”地表土壤的氢气渗流可能源于地下氢气的运移,即该地区的天然氢气并非来自深部的地幔脱气,氢气的形成可能与蛇纹石化和富铁矿物在水辐射分解作用有关。马里 Taoudeni 盆地氢气藏具有独特的地质特征:上部辉绿岩盖层厚度在 15 ~ 50 m,且厚度与氢气浓度正相关,而黏土层厚度则与氢气含量负相关。岩相分析显示,辉绿岩主要由斜长石、辉石及含铁矿物组成,其中远离储层的辉绿岩裂隙发育较差(孔隙度=0.39 %),而与储层接触带则发育密集裂隙网络(孔隙度 > 3.00 %)。该区氢气储集层具有明显的垂向分带特征:浅部以碳酸盐岩储层为主,孔隙度介于 0.20 % ~ 14.30 %,平均值为 4.27 %,强烈的喀斯特作用形成了富含氢气的岩溶孔隙系统;深部则为砂岩储层,可进一步划分为富铁细砂岩、含磁铁矿砂岩及赤铁矿砂岩,孔隙度介于 4.50 % ~ 6.40 %,平均值为 5.50 %,发育良好的裂缝系统。浅层氢气主要以游离态赋存于岩溶孔隙中,而深层砂岩中的氢气则多以溶解态封存在地下水中,通过钻井降压过程得以释放。

美国堪萨斯州的 Heins#1, Scott#1 和 Sue Duroche#

2 井自 1980 年钻探以来,持续产出富含氢气和氮气并伴生碳氢化合物的混合气体^[56]。气体组分分析结果显示,该地区氢气具有深部与浅部两种来源,在早期认识中认为该地区的氢气是由于地球深部脱气作用形成,但根据地层水与氢气的 $\delta D(SMOW)$ 值($-836\text{‰} \sim -740\text{‰}$, SMOW 为标准平均海洋水,是氢和氧的同位素国际统一标准)计算得到的氢气形成温度约在 25 °C,与地幔脱气作用下的高温效应明显不符。同位素地球化学证据显示,氢气与惰性气体同位素的组合关系指示部分气体确实来源于深部,可能通过断裂系统从前寒武纪基底运移而来。该区域显著的地磁异常现象为氢气成因提供了重要线索,表明前寒武系基底中发生的铁(II)氧化反应可能是深部氢气的主要生成机制。同时,浅部氢气则可能由含溶解态化合物在低温催化条件下分解生成。值得注意的是, Sue Duroche#2 井的长期监测数据显示,水中的氧化还原电位存在明显动态变化,这一现象可能与油管表面发生的氧化还原反应密切相关。研究过程中观测到 3 个关键证据:①高铁(II)含量的水样伴随高浓度氢气产出;②水样暴露大气后管壁迅速出现铁(III)沉淀;③实验证实

铁(Ⅱ)在管壁反应中确实参与了氢气生成过程。这些发现共同支持了铁矿物催化水岩反应产氢的机理^[45,49,62]。因此该地区氢气可能主要源于深部地下空间,而位于宾夕法尼亚系和二叠系之下的密西西比系沉积含水层及其下伏地层,可能构成了一个潜在的天然氢气储集系统。

中国松辽盆地多个区域均检测到不同浓度的氢气显示。北部浅层天然气中氢气含量受到生物活动的影响,范围在0.001%~0.352%^[63];大庆油田的萨尔图、朝阳沟、葡萄花和扶余等地区深层天然气中的氢气含量变化范围在0.070%~1.990%;南部德惠断陷的有机热成因天然气伴生的氢气含量相对较低,在0.010%~0.100%^[64];中央坳陷区徐家围子断陷中的氢气含量相对较高,部分井甚至超过10.000%,如松科2井在登娄库组、营城组、沙河子组及基底等多个层段均探测到氢气,气测录井氢气含量峰值达2.390%,实测天然气样品中氢气含量高达10.380%~26.890%。

研究表明,松科2井中登娄库组氢气主要来源于水的辐射分解及含氮岩石的高温变质作用;沙河子组储层中的氢气则具有混合成因特征,既包含有机质热解生成的有机成因氢,也含有幔源无机成因氢。基底天然气中的氢气以幔源成因为主(与地幔脱气作用相关),部分为混合成因(源自深部含 Fe^{2+} 矿物的水-岩反应)^[24]。由于松辽盆地基底深大断裂为幔源气体(以游离态或溶解态)提供了垂向运移通道,加之甲烷稀释作用及复杂的地下环境,最终导致氢气含量相对

较低。

典型天然氢气勘探研究实例充分证明,在天然氢气相关研究中,氢源是灵魂,合适的储-盖层是躯体,而断裂系统则是连接两者的骨架,三者缺一不可。缺乏充足的氢源,再好的储层也没有开发价值;缺少有效的储-盖层,再丰富的氢气也会散失殆尽;没有氢源与运移通道持续补给,区域内聚集的天然氢气最终会枯竭。

因此,深入理解天然氢气藏中源-运(断)-储-盖之间的耦合关系,对未来天然氢气勘探开发工作至关重要。天然氢气的勘探和开发是一个复杂的系统工程,需综合考量地质构造背景、成因机制、储层特征等多方面因素(图7)。随着对氢气成因与来源、储集运移特征、地下壳-幔结构及相关地球化学过程的深入理解和勘探技术的进步,未来在全球众多潜在富氢区的开发将有望取得更大突破,从而推动地质氢能在全球能源转型中发挥更重要的作用,助力低碳可持续发展。

3 关键问题及发展趋势

3.1 “氢源”潜力评价

尽管对天然氢气的成因和消耗机制已形成初步认识,但复杂的地质环境使得氢气的来源与消耗特征多样化,因此未来研究需建立综合的氢气来源与消耗耦合模型,以优化潜力评估和勘探策略。在不同的地质

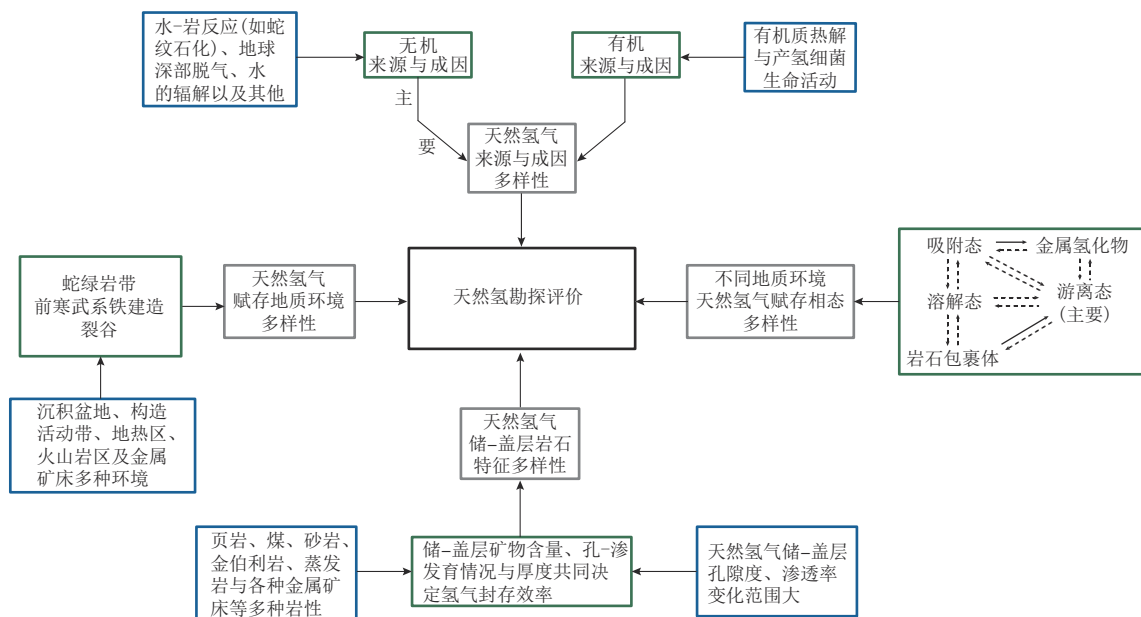


图7 天然氢气勘探特征多因素评价流程图

Fig. 7 Flow chart showing the multi-factor assessment of natural hydrogen exploration characteristics

环境中,氢气同位素值存在差异:基于全球16个典型天然氢气产区的同位素数据分析及理论验证,目前普遍认为通常幔源氢气的 $\delta D_{H_2}(VSMOW) > -650\text{‰}$,而壳源氢气的 $\delta D_{H_2}(VSMOW) \leq -650\text{‰}$ 。此外,根据其同位素特征可以对其赋存地质环境进一步划分,蛇纹岩、常规油藏、含水层、非沉积硬岩和沉积热液体系的 $\delta D_{H_2}(VSMOW)$ 一般大于 -650‰ ;火山/岩浆热液系统的 $\delta D_{H_2}(VSMOW)$ 普遍大于 -700‰ ;绝大多数大洋中脊样品的 $\delta D_{H_2}(VSMOW)$ 在 $-500\text{‰} \sim -230\text{‰}$ [65-68]。除了气体同位素,高浓度的 CO_2 与 ^{222}Rn 代表着氢气可能来自深部 [9,69]。地下环境中氢气的消耗与生成同时进行,不同来源的氢气其产率也存在差异(表3)。在有机质向烃类转化的过程中,氢气主要通过催化反应和促进杂原子脱除等途径被消耗,其中多环芳烃的加氢过程遵循特定规律,且受温度、压力等外部环境因素的显著影响 [70-71]。此外,地下环境中存在大量以氢气为能量来源的微生物,它们通过氧化还原反应消耗氢气以维持生命活动 [72]。氢气的无机消耗作用主要表现为氢气、水与矿物之间的相互作用,特别是黄铁矿、菱铁矿和赤铁矿等含铁矿物对氢气具有显著的消耗能力 [73-74]。然而,并非所有矿物都能参与氢气消耗,如常见的黏土矿物几乎不参与相关反应,砂岩中的石英、长石和云母等矿物在短时间内也表现出较低反应活性 [75-76]。在特定环境下,氢气还可能解离成氢离子和自由电荷,使地下水变为弱酸性,而被溶解的金属阳离子可被氢气还原,进一步消耗氢气 [76]。

在实际勘探工作中,部分勘探区的氢气渗漏检测结果并不理想,很可能与地下氢源潜力评价不充分有关。复杂的地质环境直接导致天然氢气来源与消耗作用呈现多样性特征,这导致仅基于单一氢源进行区域资源潜力评价存在明显局限性。有必要将氢气来源与消耗过程纳入统一研究框架,构建多源氢气生成与消耗效率的耦合计算模型,通过量化区域内氢气生成量

超过消耗量的动态平衡关系,建立以多源氢气产率为基础、以氢气预估消耗量为约束的氢源潜力评价体系。为此,需要在现有研究基础上深化对氢气成因与消耗机制的认识:首先需系统研究不同来源氢气的地球化学特征,建立合适的评价模版;其次要完善不同成因来源对区域氢气产率的贡献度量化方法;再者应重点探究矿物、有机质及微生物对氢气的消耗机理,开发可靠的氢气消耗量预测模型;最终通过整合上述研究成果,构建更精确的氢气生成-消耗预测模型,为资源潜力评估和勘探靶区优选提供理论支撑。由此可见,建立系统完善的天然氢气成因判别体系和产量(消耗量)预测方法,将成为未来氢源潜力评价研究的核心方向。

3.2 天然氢气赋存相态

天然氢气在地质环境中以多种赋存状态存在,其相态之间的转化关系和富集特征对资源潜力的影响机制尚不明确,因此未来需加强对不同相态迁移及转化机制的研究,以优化氢气勘探策略和开发方案。目前研究表明,天然氢气在地质环境中主要以包裹体态、溶解态、游离态、吸附态以及金属氢化物等5种赋存状态存在 [80],且这些相态之间受地质环境特征的影响存在相互转化关系(图8)。游离态氢气大量存在,也被认为是天然氢气藏形成的必要因素之一,如在土耳其和菲律宾等地发现了天然氢气的渗点,检测发现气体中天然氢气的含量在40%左右 [59-60,81-83]。在西非马里的天然氢气开发井的生产过程中发现,地下压力并没有随着氢气的开发而降低,反而出现了上升的趋势,这可能是蛇绿岩带持续生成的游离态氢气快速补充了开采消耗 [8,43]。溶解态氢气被认为是溶解在地下流体(水)中的氢气,在俄罗斯和哈萨克斯坦的地下水和油田水中检测到一定含量的氢气,但含量差异较大,分布在5.1%~70.0%,平均值为30.9% [84-85]。实验表明,在地下高温($> 1\,000\text{℃}$)、高压($> 100\text{ MPa}$)环境中,氢气

表3 不同成因来源天然氢气产量(率)差异

Table 3 Differences in natural hydrogen production (rate) across varying genetic sources

地质环境/成因来源	形成氢气年通量/速率	数据来源
全球蛇纹岩带	0.18 ~ 0.36 Tg	文献[13]
全球前寒武系岩石圈	$(0.36 \sim 2.27) \times 10^{11} \text{ mol}$	文献[38]
全球洋中脊裂谷系	$1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$	文献[77]
全球洋壳玄武岩	$6.3 \times 10^{12} \text{ mol}$	文献[78]
橄榄石蛇纹石化	182 Bcf/km^3	文献[79]
U, Th 和 K 元素衰变辐射裂解	$1.9 \times 10^{-9} \text{ Bcf/km}^3$	文献[57]

注:橄榄石蛇纹石化形成的氢气年通量是在 300℃ 、 35 MPa 及 $R_{w/r}$ (水/岩比)=1.6~2.6的实验条件下测试计算的;U, Th 和 K 元素衰变辐射裂解形成的氢气年通量是在标准状况温度与压力(0℃ 、 101.325 kPa)实验条件下测试计算的。 $Tg=10^6\text{ t}$; $Bcf=10^9\text{ ft}^3$ 。

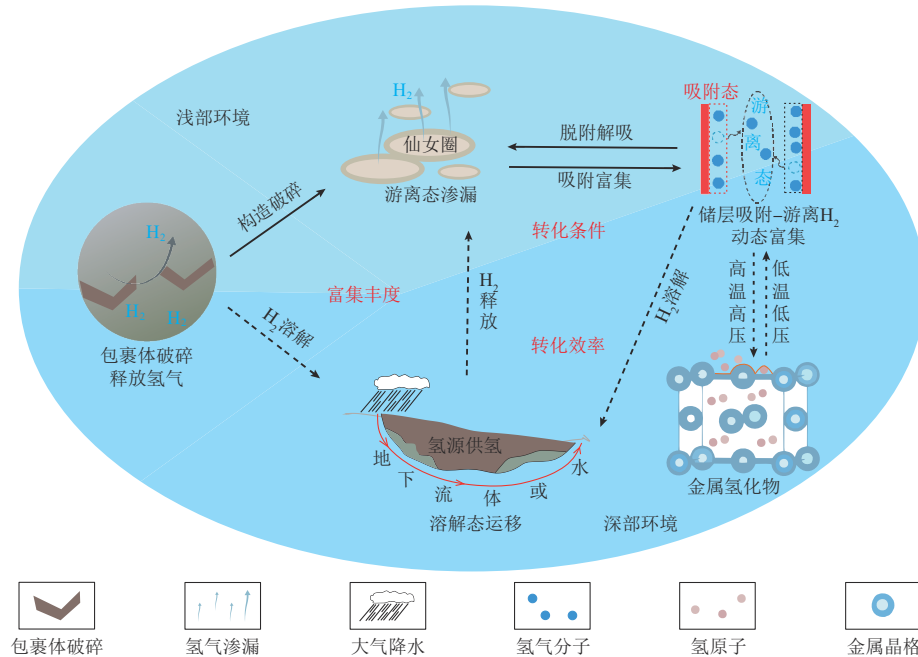


图8 天然氢气赋存相态及相互转化规律

Fig. 8 Occurring phases of natural hydrogen and the law of their mutual transformation

会与含铁、铬、钾的金属矿物发生结合形成金属氢化物,因此地壳深部中的金属氢化物可能蕴藏着巨大的资源潜力。包裹体态氢气则是以包裹体形式存在于岩石内部的氢气,在俄罗斯、加拿大和乌克兰的火成岩、管状金伯利岩或其他矿体中发现了以包裹体形式存在的天然氢气。

包裹体态氢气通过地质活动破碎释放形成游离态氢气;溶解态氢气在运移至浅部后由于外部环境压力变低,氢气溶解度下降,流体中的氢气释放形成游离态氢气;游离态氢气在高压环境中也可以形成溶解态氢气。也有观点认为,包裹体态氢气包含了因吸附作用而保留在岩石内部的氢气,但特定储层(矿物)对氢气的吸附作用是不可忽视的,如中国学者对有机质孔隙、各类黏土矿物以及煤层中的氢气吸附作用进行了研究,结果表明无论是黏土矿物还是煤均可以吸附大量的氢气^[25-27]。国外学者对铀矿床上覆的黏土层取样并进行加热解吸实验,发现可以从黏土层中解析出大量氢气,最高含量为 500×10^{-6} (0.25 mol/kg),随着环境温度的升高或者压力的降低,吸附态氢气可能会发生解吸作用,转化为其他相态类型的氢气^[58]。

尽管当前对天然氢气主要赋存状态已有较多认识,但其富集丰度、赋存相态特征及转化机制对天然氢气富集成藏的影响尚未明确。从寻找具有开发潜力的地下氢气藏角度出发,厘清溶解态-游离态-吸附

态氢气赋存行为规律至关重要。首先,需要系统研究氢气在游离态和溶解态之间的迁移规律,分析吸附态氢气的脱附条件及其相态转化过程,通过实验和数值模拟探讨不同矿物和孔隙结构对氢气吸附特性和相态转化效率的影响,明确不同地质条件下氢气的赋存特征;其次,通过诸如同位素分析、质谱分析和核磁共振等技术手段,精确测定氢气在地下环境中各相态的浓度变化。多种实验技术的联合应用将有助于揭示氢气在复杂地质环境中的行为规律,为天然氢气的勘探和开发提供重要的理论指导。通过对赋存相态的深入理解,可以优化氢气勘探策略,提高潜在富氢气藏的发现成功率。此外,明确不同相态对氢气资源潜力的贡献,有助于制定更有效的开发方案。因此,有关天然氢气在不同地质条件中的赋存相态转化作用机制与不同相态氢气的定量分析将是未来重点研究的方向。

3.3 天然氢气储层封闭性

天然氢气的存储与运移受到储层岩物性、孔隙结构及扩散机制的复杂影响,这一特性凸显了深入研究不同岩性对氢气扩散与封闭效应的重要性,从而为构建精准的运移路径预测模型奠定基础。天然氢气储层包含页岩、煤、砂岩、金伯利岩、蒸发岩与各种金属矿床等,由于氢气自身分子量较小,相较于甲烷等其他气体,其扩散能力更强,所以对储-盖条件要求更高。沉

积岩因其较高的孔隙度和渗透率,理论上不利于氢气保存,但在特定地质背景下的沉积岩层系中仍存在异常高含氢现象^[13]。从运移动力学角度分析,储层内氢气的运移主要表现为孔隙-裂隙系统的微观逃逸与区域断裂网络的宏观输导两种形式,二者均遵循相同的气相泄漏与溶解扩散双重机制^[85]。其中,气相泄漏对储层流体化学组成的扰动相对有限,得益于氢气极低的密度和卓越的扩散性能,气相平流作用在此类动态系统中往往占据主导地位。只有在特定条件下,溶解氢的扩散才会成为地下天然氢气的主要运移方式。

氢气的运移受盐度、温度、压力和流体-岩石相互作用等多种因素影响^[44]。相较于二氧化碳和甲烷,氢气由于较小的分子尺寸和密度,在储层中更易散失。研究表明,氢气扩散速率严格遵循浓度梯度驱动规律,而地层水含量和盐度的提升会显著抑制其扩散能力,在高含水、高盐度环境下,氢气扩散系数可衰减至初始值的50%甚至更低^[86],不同介质中氢气的扩散能力存在较大差异(表4)。尽管当前研究已初步识别出天然氢气的潜在储集层类型,并通过数值模拟与实验手段

对其扩散机制及控制因素进行了探索,但关于天然氢气扩散行为与储层封闭性之间的内在关联仍缺乏系统性认知。事实上,储层岩石的物性、孔隙结构及其与盖层的耦合关系,从根本上决定了氢气的赋存效率与运移特征。从勘探评价角度出发,深入揭示储层封闭性与氢气扩散机制的动态平衡关系具有关键科学意义。首先,需系统开展多岩性储层中氢气扩散动力学研究,尤其关注不同岩性组合对氢气封闭-释放机制的调控作用,进而建立定量化的氢气扩散预测模型;其次,应整合地表“仙女圈”等表生构造与深部断裂系统、氢气通量的关联性分析,构建天然氢气运移路径的三维预测与示踪体系,实现基于地表渗漏特征的氢源-运-聚过程反演。可以预见,在今后相当长的时期内,天然氢储层评价理论与渗漏溯源方法研究将成为该领域的前沿攻关方向。

3.4 天然氢气系统

天然氢气作为一种储量丰富且分布广泛的可持续无碳能源,其生成、运移与富集过程构成了动态平衡的气藏系统。未来研究应着力构建完善的天然氢气系统评价体系,既要深入探索动态富集成藏机制,也要重视“相对静态”封存型氢气藏的开发潜力。全球范围内存在大量天然氢气资源,其形成过程涉及多元化的地质作用,在地下环境中持续经历生成、运移、聚集与消耗的动态平衡过程,并由氢源、储-盖层和运移通道等关键要素共同构成了天然氢气系统(图9)。从成因来看,氢气既可通过有机质分解等有机过程产生,也能经由蛇纹石化、水辐解等无机作用形成;在储集条件方面,天然氢气可赋存于砾岩、砂岩、白云岩、蒸发岩、煤层、页岩及变质岩等多种储层中,这些储层孔隙度变化

表4 不同介质中氢气的扩散能力

Table 4 Hydrogen diffusion capacities across different media

介质类型	扩散能力/(m ² /s)	数据来源
砂岩	$(1.6 \sim 2.1) \times 10^{-9}$	文献[87]
蒙脱石	$(42.5 \sim 82.7) \times 10^{-9}$	文献[88]
蛋白石	$(1.20 \sim 5.13) \times 10^{-9}$	文献[87,89]
无烟煤	$(13 \sim 70) \times 10^{-9}$	文献[90-91]
页岩	$(13 \sim 24) \times 10^{-9}$	文献[92]
石盐	$(1.4 \sim 13.0) \times 10^{-9}$	文献[93]
纯水	$(3.9 \sim 6.1) \times 10^{-9}$	文献[75,94-95]
空气	$(0.756 \sim 1.604) \times 10^{-4}$	文献[83]
不锈钢	0.015×10^{-9}	文献[96]

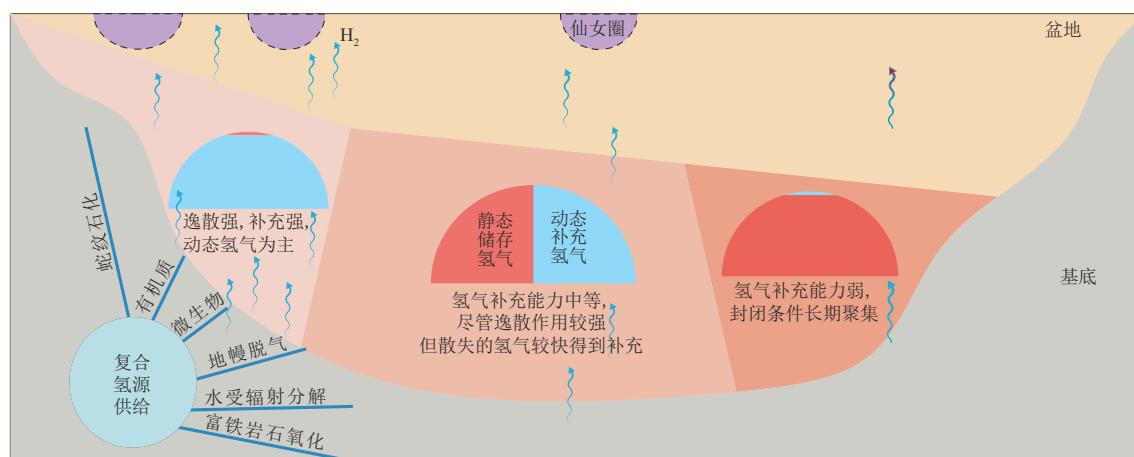


图9 天然氢气系统及其差异性评价

Fig. 9 Natural hydrogen systems and their difference assessment

范围大,埋深跨度从数百米至数千米不等;就赋存状态而言,氢气主要以游离态、包裹体、溶解态、吸附态及金属氢化物等形式存在,现有勘探数据显示地下氢气中约50%为游离态,但各相态会随地质环境变化而发生规律性转化。由于氢气分子量小、密度低,极易通过扩散和平流作用在地下运移,这导致地表常出现氢气渗漏现象。在天然氢气系统模型中,水岩反应作为主要氢源,生成的氢气通过流体或断裂系统向储层运移。然而受限于氢气特殊的物理性质,储层封存效率往往有限,部分氢气会持续散失至地表,系统通过底部新生氢气的持续补充维持动态平衡。这种特性使得现有研究过度聚焦于游离态氢气在成藏中的作用,而忽视了储-盖组合特征及其封闭性对氢气富集的关键控制。事实上,除游离态外,吸附态天然氢气在气藏形成过程中可能同样发挥着不可忽视的作用。

美国堪萨斯州部分钻井中检测到高浓度氢气,然而,各井的氢气含量随时间呈现显著差异。以Sue Duroche#2井为例,其氢气浓度从2008年的91.7%骤降至0,最终在2014年稳定在1.0%左右。这种变化特征表明,该井中的氢气可能是在漫长地质时期内通过远距离运移聚集并被水层封存,随着钻井开发逐渐消耗殆尽。这一现象揭示出Sue Duroche#2井的氢气系统缺乏类似马里气藏那样的快速补给机制,其含量变化规律更接近静态封存的常规油气藏特征。虽然存在氢源补给,但补给速率缓慢,难以形成可持续开发的动态气藏,只能通过长期积累形成一次性资源。相比之下,Scott 1井和Heins#1井的情况则有所不同,这两口井的氢气含量虽经历阶段性下降,但最终保持稳定。这一特征暗示其氢气藏可能由两部分组成:一部分是与Sue Duroche#2井类似的长期积累氢气,另一部分则来自近源氢气的快速补充,更符合动态成藏的特征。未来天然氢气系统研究亟需建立完善的评价标准与方法,既要重点探寻符合动态富集条件的天然氢气系统,也不应忽视那些静态封存的天然氢气藏的研究价值,这些以相对静态封闭在地下储层中的天然氢气同样具有开发的潜力。

3.5 启示与展望

在2021年的全球首届天然氢峰会上,天然氢领域专家指出天然氢的成本在0.5~1.0美元/kg。当前全球唯一实现商业开发的非洲马里地区,因其天然氢储层埋藏深度较浅且氢气纯度较高,生产成本或可低至0.5美元/kg,且基本不存在温室气体排放。对比来看,无论是“绿氢”还是“灰氢”,其成本均高于这一数值。

据《中国氢能产业展望》数据显示,截至2020年,“灰氢”成本在1.5~2.0美元/kg,且生产过程伴随大量温室气体排放;“绿氢”成本更高,达2.5~8.0美元/kg。在2050年净零排放情景下,全球“绿氢”和“灰氢”的平准化成本预计到2030年将收敛至1.5~4.0美元/kg。天然氢气兼具成本低廉与零碳排放的双重优势,使其在未来能源格局中展现出巨大潜力,是未来世界关注的重点研究对象之一。

天然氢气具有来源成因多元、赋存地质环境多样、储盖层岩石类型丰富及赋存相态复杂等特性,这一系列特点显著增加了天然氢气勘探工作的难度。但基于目前的认识,富含 Fe^{2+} 的岩石被认为是天然氢气的重要来源,如前寒武系铁建造、铬铁矿、基性-超基性岩石等。针对这类氢源岩的勘探与评价工作,需要地球物理学与固体矿产勘探领域专家的协同合作。在勘探实践中,需采用多种技术手段相结合的方式,按照由宏观到微观的思路对勘探区域进行选区评价。①借助遥感或卫星技术,在地表识别因天然氢气渗漏形成的“仙女圈”结构,从而圈定大致的勘探范围;②在勘探范围内利用航磁、地震等物理勘探手段剖析地下环境特征,根据含 Fe^{2+} 的岩石分布和构造发育情况等要素对勘探区进一步划分;③利用地球化学勘探手段,开展天然氢气渗漏检测,精准确定适合未来钻井作业的高潜力区域;④在钻井过程中,通过测井技术对钻井中的气体组成与含量、含氢储层及其盖层孔渗特征等因素进行分析评价,以明确该区域内天然氢气资源潜力以及富集模式。值得注意的是,由于氢气具有易燃易爆的性质,在未来的勘探开发工作中,相关安全与环境问题面临着严峻的挑战,因此,整个天然氢气勘探开发工作必然涉及多学科技术的交叉融合,多学科协同作业是天然氢气勘探工作中不可或缺的重要环节。

中国地域广袤,地质环境复杂多样,矿产资源丰富。目前全球已发现天然氢气的各类地质环境与氢源岩,如大型断裂带、沉积盆地、克拉通基底、金属矿床、前寒武系铁建造、蛇绿岩带、基性-超基性岩石、花岗岩以及铀矿床等,在中国均有分布,这既为我国开展天然氢气研究提供了宝贵机遇,也带来了相应挑战。现阶段,中国学者正同步推进天然氢气勘探实践与天然氢气系统理论研究工作,如在三水盆地内发现了高浓度的天然氢气渗漏现象,针对煤岩等多种岩石开展的氢气吸附实验,也证实了岩石中蕴含的氢气富集潜力。然而,当前中国相关研究仍处于起步阶段,仅依靠高校科研团队开展天然氢气勘探研究工作远远不够。天然氢气野外勘探需要充足的资金支持,对油气井、矿井等

进行氢气检测工作,更离不开油气公司与当地政府的支持与协助。鉴于国外已有成功钻遇氢气流的钻井案例,加强与国外学者的学术交流以及与国外油气公司的合作至关重要。通过加大天然氢气勘探实践力度、建立天然氢气富集专项实验室、争取国家及政府层面的政策与资金支持、积极开展国际合作研究项目,在“碳中和”“碳达峰”目标推进的关键时期,中国天然氢气勘探研究将迎来新的发展机遇,这不仅有助于中国实现能源转型目标,也将为全球绿色经济发展注入新的动力。

4 结论

1) 中国天然氢气论文总数相对较少,分布上具有典型的初期阶段特征。前期以地震局等机构为主导,主要围绕地震规律分析展开研究,中后期以天然氢气资源为勘探目标,高等院校、中国石化和中国石油在所有参研机构中优势较为明显。截至目前,天然氢气主题论文受到国家或高校基金资助大量增加,期刊论文发表数量也大量增加。国外天然氢气期刊论文整体数量较多,研究体系较于中国更为完善,且至今仍呈现出迅速发展的趋势,国外前期天然氢气成因研究以高校为主,后期资源勘探研究以能源公司为主,且研究的资助主要来自于能源公司。

2) 虽然天然氢气的研究与勘探经历了百余年,但仍处于起步阶段。在未来较长时期内,建立更为成熟的天然氢气系统理论将成为主要研究方向。现有以土壤渗漏氢气检测作为主要手段,未来则应主要开展钻井活动进行深入研究,系统的天然氢气地质调查研究必须受到重视。基于现有的大量油气钻井与地质资料,应该积极选择天然氢气资源潜力较大的区域进行氢检测或开展相应钻探活动,通过勘探实践深化对天然氢气系统组成要素的认识,掌握天然氢气的形成、运移和聚集过程,形成完善的勘探评价理论体系。

3) 天然氢气系统理论研究与勘探评价需要多学科交叉融合,勇于对潜在靶区开展钻探活动,这样才能取得突破性进展并向工业化方向发展。未来天然氢气的研究应该在政策扶植和基金支持下,坚持科技攻关,加强开展国际合作,增进学术交流,促进人才培养。尽管距离形成完善的天然氢气勘探指导理论体系与大规模开发尚需要较长时间,但从保障国家能源安全和低碳转型发展的战略角度考虑,寻找天然氢气资源是当务之急,全球天然氢气基础研究和勘探实践任重而道远。

参 考 文 献

- [1] PRINZHOFE A, TAHARA CISSE C S, DIALLO A B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (42): 19315-19326.
- [2] COUZIN-FRANKEL J, HAND E, LANGIN K, et al. 2023 Breakthrough of the Year[J]. *Science*, 2023, 382(6676): 1228-1233.
- [3] 刘全有, 吴小奇, 孟庆强, 等. 天然氢气: 一种潜在的零碳能源[J]. *科学通报*, 2024, 69(17): 2344-2350.
LIU Quanyou, WU Xiaoqi, MENG Qingqiang, et al. Natural Hydrogen: A Potential Zero Carbon Energy Source[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(17): 2344-2350.
- [4] LARIN N, ZGONNIK V, RODINA S, et al. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia [J]. *Natural Resources Research*, 2015, 24: 369-383.
- [5] MORETTI I, PRINZHOFE A, FRAOCOLIN J, et al. Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(5): 3615-3628.
- [6] TRUCHE L, DONZE F-V, GOSKOLLI E, et al. A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite [J]. *Science*, 2024, 383(6683): 618-621.
- [7] ZGONNIK V, BEAUMONT V, LARIN N, et al. Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains, Northern Oman [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12: 71.
- [8] MAIGA O, DEVILLE E, LAVAL J, et al. Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface, The emblematic case of the Bourakebougou H₂ field in Mali [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50 (PB): 640-647.
- [9] PRINZHOFE A, RIGOLLET C, LEFEUVRE N, et al. Maricó (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 62: 91-98.
- [10] RAMIREZ A C, PENACOS F C, RODRIGUEZ G, et al. Natural H₂ Emissions in Colombian Ophiolites, First Findings [J]. *Geosciences*, 2023, 13(12), 358.
- [11] ZGONNIK V, BEAUMONT V, DEVILLE E, et al. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, 2: 31.
- [12] LEFEUVRE N, TRUCHE L, DONZE F-V, et al. Natural

- hydrogen migration along thrust faults in foothill basins, The North Pyrenean Frontal Thrust case study [J]. *Applied Geochemistry*, 2022, 145: 105396.
- [13] ZGONNIK V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen, A comprehensive review [J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 203: 103140.
- [14] 王基华, 张培仁, 孙凤民, 地震前后地下氢气异常变化的又一实例[J]. *地震*, 1982, (4): 17-34.
WANG Jihua, ZHANG Peiren, SUN Fengmin. Another example of underground hydrogen anomaly before and after the earthquake [J]. *Earthquake*, 1982, (4): 17-34
- [15] 黄林. 断层气体中氢气和二氧化碳气体的成因及其与断层活动的关系[J]. *地质地球化学*, 1984, (7): 16.
HUANG Lin. The genesis of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and their relationship with fault activity [J]. *Earth and Environment*, 1984, (7): 16
- [16] 栗启初, E. Zeller, E. Angino. 沿断层逸出的氢气对地震的诱发作用[J]. *地震学报*, 1992, (2): 229-235+259.
SU Qichu, E Zeller, E Angino. Induced effect of hydrogen gas escaping from fault on earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, (2): 229-235+259.
- [17] 杨忠红, 马婧. 地质勘探过程中煤层气联测氢气方法[J]. *四川地质学报*, 2009, 29(2): 244-246.
YANG Zhonghong, MA Jing. Hydrogen measurement method of coalbed methane in the process of geological exploration [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(2): 244-246.
- [18] 孟庆强, 陶成, 朱东亚, 等. 微量氢气定量富集方法初探[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(3): 314-316.
MENG Qingqiang, TAO Cheng, ZHU Dongya, et al. Preliminary study on quantitative enrichment method of trace hydrogen [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(3): 314-316.
- [19] 刘国勇, 张刘平, 杨振平. 天然气中氢气的地化特征及油气成藏效应[J]. *天然气工业*, 2004, (11): 31-33+13.
LIU Guoyong, ZHANG Liuping, YANG Zhenping. Geochemical characteristics and hydrocarbon accumulation effect of hydrogen in natural gas [J]. *Natural gas industry*, 2004, (11): 31-33+13.
- [20] 邱军利, 雷天柱, 夏燕青. 氢气和气态烃在煤成气形成演化研究中的意义[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, (3): 26-29.
QIU Junli, LEI Tianzhu, XIA Yanqing. Significance of hydrogen and gaseous hydrocarbons in the study of coal-derived gas formation and evolution [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, (3): 26-29.
- [21] 周强, 江洪清, 梁汉东. 沁水盆地南部煤层气中氢气释放规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2006, (6): 871-873.
ZHOU Qiang, JIANG Hongqing, LIANG Handong. Study on the law of hydrogen release in coalbed methane in southern Qinshui Basin [J]. *Natural Gas Geosciences*, 2006, (6): 871-873.
- [22] 李玉宏, 魏仙样, 卢进才, 等. 内蒙古自治区商都盆地新生界氢气成因[J]. *天然气工业*, 2007, (9): 28-30+128-129.
LI Yuhong, WEI Xianxiang, LU Jincai, et al. Cenozoic hydrogen genesis in the Shangdu Basin, Inner Mongolia [J]. *Natural gas industry*, 2007, (9): 28-30+128-129.
- [23] 韩双彪, 唐致远, 杨春龙, 等. 天然气中氢气成因及能源意义[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(9): 1270-1284.
HAN Shuangbiao, TANG Zhiyuan, YANG Chunlong, et al. Genesis and energy significance of hydrogen in natural gas [J]. *Natural Gas Geosciences*, 2021, 32(9): 1270-1284.
- [24] HAN S B, TANG Z Y, WANG C S, et al. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: new insights into deep Earth exploration [J]. *Science bulletin*, 2022, 67(10): 1003-1006.
- [25] WANG L, CHENG J W, JIN Z J, et al. High-pressure hydrogen adsorption in clay minerals: Insights on natural hydrogen exploration [J]. *Fuel*, 2023, 344: 127919.
- [26] 韩双彪, 王缙, 黄劼, 等. 煤岩吸附氢气特征及其地质意义[J]. *煤炭学报*. 2024, 49(3): 1501-1517.
HAN Shuangbiao, WANG Jin, HUANG Jie, et al. Characteristics of hydrogen adsorption on coal and its geological significance [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2024, 49 (3): 1501-1517.
- [27] JIN Z J, ZHANG P P, LIU R C, et al. Discovery of anomalous hydrogen leakage sites in the Sanshui Basin, South China [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(9): 1217-1220.
- [28] HAO Y L, PANG Z H, TIAN J, et al. Origin and evolution of hydrogen-rich gas discharges from a hot spring in the eastern coastal area of China [J]. *Chemical Geology*, 2020, 538: 119477.
- [29] WANG L, JIN Z J, LIU R C, et al. The occurrence pattern of natural hydrogen in the Songliao Basin, P. R. China: Insights on natural hydrogen exploration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50(PB): 261-275.
- [30] WARD L K. Report on the prospects of obtaining supplies of petroleum by boring in the vicinity of Robe and elsewhere in the south-eastern portion of South Australia [J]. *A Review of Mining Operations in the State of South Australia during the half-year ended December 31st, 1976*, 25: 45-53.
- [31] SHCHERBAKOV A V, KOZLOVA N D. Occurrence of Hydrogen in Subsurface Fluids and the relationship of Anomalous Concentrations to Deep Faults in the USSR [J]. *Geotectonics*, 1986, 20(2): 120-128.
- [32] SMIGAN P, GREKSAK M, KOZANKOVA J, et al. Methanogenic bacteria as a key factor involved in changes of town gas stored in an underground reservoir [J]. *Fems Microbiology Letters*, 1990, 73(3): 221-224.
- [33] KORZHINSKY M A, BOTCHARNIKOV R E, TKACHENKO S I, et al. Decade-long study of degassing at Kudriavyy volcano,

- Iturup, Kurile Islands (1990–1999): Gas temperature and composition variations, and occurrence of 1999 phreatic eruption [J]. *Earth Planet and Space*, 2002, 54: 337–347.
- [34] AIUPPA A, INGUAGGIATOS, MCGONIGLE A J S, et al. H₂S fluxes from Mt. Etna, Stromboli, and Vulcano (Italy) and implications for the sulfur budget at volcanoes [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(7): 1861–1871.
- [35] SHINOHARA H, MATSUSHIMA N, KAZAHAYA K, et al. Magma-hydrothermal system interaction inferred from volcanic gas measurements obtained during 2003–2008 at Meakandake volcano, Hokkaido, Japan [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2011, 73: 409–421.
- [36] MOUSSALLAM Y, OPPENHEIMER C, AIUPPA A, et al. Hydrogen emissions from Erebus volcano, Antarctica [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2012, 74: 2109–2120.
- [37] LOLLAR B S, ONSTOTT T C, LACRAMPE-COULOUME G, et al. The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production [J]. *Nature*, 2014, 516: 379–382.
- [38] ROCHE V, GEYMOND U, BOKA-MENE M, et al. A new continental hydrogen play in Damara Belt (Namibia) [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 11655.
- [39] DEVILLE E, PRINZHOFER A. The origin of N₂-H₂-CH₄ rich natural gas seepages in ophiolitic context, A major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia [J]. *Chemical Geology*, 2016, 440, 139–147.
- [40] LEFEUVRE N, TRUCHE L, DONZE F-V, et al. Native H₂ exploration in the western Pyrenean foothills [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(8): e2021GC009917.
- [41] FRERY E, LANGHI L, MASIN M, et al. Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(61): 31158–31173.
- [42] AIMAR L, FRERY E, STRAND J, et al. Natural hydrogen seeps or salt lakes, how to make a difference? Grass Patch example, Western Australia [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 2296–6463.
- [43] MAIGA O, DEVILLE E, LAVAL J, et al. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 11876.
- [44] PRINZHOFER A, CACAS-STENTZ M-C. Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(57): 21610–21623.
- [45] GUELARD J, BEAUMONT V, ROUCHON V, et al. Natural H₂ in Kansas, deep or shallow origin? [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(5), 1841–1865.
- [46] KNEZ D, ZAMANI O A M. Up-to-Date Status of Geoscience in the Field of Natural Hydrogen with Consideration of Petroleum Issues [J]. *Energies*, 2023, 16(18): 6580.
- [47] JACKSON O, LAWRENCE S R, HUTACHINSON I P, et. al. Natural hydrogen, sources, systems and exploration plays [J]. *Geoenergy*, 2024, 2(1): geoenergy2024–002.
- [48] 孟庆强, 金之钧, 孙冬胜, 等. 高含量氢气赋存的地质背景及勘探前景 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(2): 208–216.
- MENG Qingqiang, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. Geological background and exploration prospects for the occurrence of high-content hydrogen [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(2): 208–216.
- [49] LEILA M, LOISEAU K, MORETTI I. Controls on generation and accumulation of blended gases (CH₄/H₂/He) in the Neoproterozoic Amadeus Basin, Australia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 140: 105643.
- [50] BAPTISTE J. Cartographie structurale et lithologique du substratum du Bassin parisien et sa place dans la chaîne varisque de l' Europe del' Ouest, approches combinées géophysiques, pétrophysiques, géochronologiques et modélisations 2D [D]. Université d'Orléans, 2016.
- [51] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 等. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3207–3222.
- YANG Jingsui, XIONG Fahui, GUO Guolin, et al. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3207–3222.
- [52] PRINZHOFER A, MORETTI I, FRANÇOLIN J, et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 5676–5685.
- [53] SUTTON K J, MCGEE A. Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calaveras faults in central California in 1980–1984 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 91 (B12): 12315–12326.
- [54] BOREHAM C J, SOHN J H, COX N, et al. Hydrogen and hydrocarbons associated with the Neoproterozoic Frog's Leg Gold Camp, Yilgarn Craton, western Australia [J]. *Chemical Geology*, 2021, 575: 120098.
- [55] GOLD HYDROGEN. Significant concentrations of hydrogen and helium detected in the Ramsay 1 Well [EB/OL]. <https://www.goldhydrogen.com.au/asx-releases/significant-concentrations-of-hydrogen-and-helium-detected-in-the-ramsay-1-well/>, 2023–10–31.
- [56] COVENEY J R R M, GOEBEL E D, ZELLER E, et al. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas [J]. *American Association of Petroleum Geologists*, 1987, 71(1): 39–48.
- [57] WARR O, GIUNTA T, BALLENTINE C. J, et al. Mechanisms

- and rates of ^4He , ^{40}Ar , and H_2 production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments[J]. *Chemical Geology*, 2019, 530: 119322.
- [58] TRUCHE L, JOUBERT G, DARGENT M, et al. Clay minerals trap hydrogen in the Earth's crust, Evidence from the Cigar Lake uranium deposit, Athabasca [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 493: 186–197.
- [59] ABRAJANO T. A, STURCHIO N. C, BOHLKE J. K, et al. Methane-Hydrogen Gas Seeps, Zambales Ophiolite, Philippines, Deep or Shallow Origin? [J]. *Chemical Geology*, 1988, 7(1–3): 211–222.
- [60] HOSGÖRMEZ H, ETIOPE G, YALÇIN M. N. New evidence for a mixed inorganic and organic origin of the Olympic Chimaera fire (Turkey), a large onshore seepage of abiogenic gas [J]. *Geofluids*, 2008, 8: 263–273.
- [61] GOLD HYDROGEN. Ramsay project [EB/OL]. <https://www.gold-hydrogen.com.au/ramsay-project/>, 2022–08–31.
- [62] 孟庆强. 地质体中天然氢气成因识别方法初探[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 552–558.
- MENG Qingqiang. Identification method for the origin of natural hydrogen gas in geological bodies [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(3): 552–558.
- [63] 帅燕华, 宋娜娜, 张水昌, 等. 松辽盆地北部生物降解成因气及其成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(5): 659–670.
- SHUAI Yanhua, SONG Nana, ZHANG Yongchang, et al. Gas of biodegradation origin and their pooling characteristics in northern Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(5): 659–670.
- [64] 孙龙德, 冯子辉, 江航, 等. 松辽盆地富氢天然气地质调查与研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(3): 7–16.
- SUN Longde, FENG Zihui, JIANG Hang, et al. Geological survey and study of hydrogen-rich natural gas in Songliao Basin [J]. *Petroleum geology & oilfield development in Daqing*, 2024, 43(3): 7–16.
- [65] BOREHAM C J, EDWARDS D S, CZADO K, et al. Hydrogen in Australian natural gas, occurrences, sources and resources [J]. *The APPEA Journal*, 2021, 61(1): 163–191.
- [66] MILKOV A V. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and Liu ideas for deliberate exploration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 230: 104063.
- [67] POETZ S, HORSFIELD B, WILKES H. Maturity-Driven Generation and Transformation of Acidic Compounds in the Organic-Rich Posidonia Shale as Revealed by Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(8): 4877–4888.
- [68] 孟庆强, 金之钧, 刘全有, 等. 天然氢气研究的现状、进展及展望[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1483–1501.
- MENG Qingqiang, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Current status, advances, and prospects of research on natural hydrogen [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1483–1501.
- [69] LIU Q Y, WU X Q, HUANG X W, et al. Integrated geochemical identification of natural hydrogen sources [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(19): 2993–2996.
- [70] 刘佳宜, 刘全有, 朱东亚, 等. 深部流体对有机质生烃演化过程的影响[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(4): 478–492.
- LIU Jiayi, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. The influence of deep-seated fluids on the hydrocarbon generation and evolution process of organic matter [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(4): 478–492.
- [71] DE L M, PILZ P, LEBSCHER A, et al. Measurements of H_2 solubility in saline solutions under reservoir conditions, preliminary results from project H_2 store [J]. *Energy Procedia*, 2015, 76: 487–494.
- [72] BO Z K, ZENG L P, CHEN Y Q, et al. Geochemical reactions-induced hydrogen loss during underground hydrogen storage in sandstone reservoirs [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(38): 19998–20009.
- [73] YEKTA A E, PICHAVANT M, AUDIGANE P. Evaluation of geochemical reactivity of hydrogen in sandstone, application to geological storage [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 95: 182–194.
- [74] ESFANDYARI H, SARMADIVALEH M, ESMAELLZADEH F, et al. Experimental evaluation of rock mineralogy on hydrogen wettability, Implications for hydrogen geo-storage [J]. *Journal of Energy storage*, 2022, 52(PA): 104866.
- [75] AL-YASERI A, WOLFF-BOENISCH D, FAUZLAH C A, et al. Hydrogen wettability of clays, Implications for underground hydrogen storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(69): 34356–34361.
- [76] HEMME C, VAN B W. Hydrogeochemical modeling to identify potential risks of underground hydrogen storage in depleted gas fields [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2282.
- [77] WELHAN J A, CRAIG H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids [J]. *Geophysical research letters*, 1979, 6: 829–831.
- [78] HOLLOWAY J R, O' DAY P A. Production of CO_2 and H_2 by Diking-Eruptive Events at Mid-Ocean Ridges: Implications for Abiotic Organic Synthesis and Global Geochemical Cycling [J]. *International Geology Review*, 2000, 42: 673–683.
- [79] MCCOLLOM T M, KLEIN F, ROBBINS M, et al. 2016. Temperature trends for reaction rates, hydrogen generation, and partitioning of iron during experimental serpentinization of olivine [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 181: 175–200.
- [80] PIET H, CHIZMESHYA A, CHEN B, et al. Superstoichiometric Alloying of H and Close-Packed Fe-Ni Metal Under High Pressures: Implications for Hydrogen Storage in Planetary Core [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 50(5): e2022GL01155.

- [81] VACQUAND C. Genèse et mobilité de l'hydrogène dans les roches sédimentaires, source d'énergie naturelle ou vecteur énergétique stockable? [D]. IFP Energies nouvelles and Institut de Physique du Globe de Paris, 2011.
- [82] SHCHERBAKOV A V, KOZLOVA N D. Occurrence of Hydrogen in Subsurface Fluids and the relationship of Anomalous Concentrations to Deep Faults in the USSR [J]. Geotectonics, 1986, 20: 120–128.
- [83] WOOLNOUGH W G. Natural Gas in Australia and New Guinea [J]. AAPG Bulletin, 1934, 18: 226–242.
- [84] POTTER J, RANKIN A H, TRELOAR P J. Abiogenic Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons in alkaline igneous rocks; fluid inclusion, textural and isotopic evidence from the Lovozero complex, N. W. Russia [J]. Lithos, 2004, 75(3): 311–330.
- [85] LODHIA B H, CLARK S R. Computation of vertical fluid mobility of CO₂, methane, hydrogen and hydrocarbons through sandstones and carbonates [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 10216.
- [86] VIVIAN J E, KING C J. The mechanism of liquid-phase resistance to gas absorption in a packed column [J]. Aiche Journal, 1964, 10(2): 221–227.
- [87] STRAUCH B, PILZ P, HIEROLD J, et al. Experimental simulations of hydrogen migration through potential storage rocks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(66): 25808–25820.
- [88] VINSOT A, APPELO C A J, LUNDY M, et al. In situ diffusion test of hydrogen gas in the opalinus clay [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2014, 400: 563–578.
- [89] LIU J Y, WANG S, JAVADPOUR F, et al. Hydrogen diffusion in clay slit: Implications for the geological storage [J]. Energy & Fuels, 2022, 36(14): 7651–7660.
- [90] BAGREEV A, MENENDEZ J A, DUKHNO I, et al. Bituminous coal-based activated carbons modified with nitrogen as adsorbents of hydrogen sulfide [J]. Carbon, 2004, 42(3): 469–476.
- [91] KESHAVERZ A, ABID H, ALI M, et al. Hydrogen diffusion in coal: Implications for hydrogen geo-storage [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 608(P2): 1457–1462.
- [92] AL-YASERI A, YEKEEN N, MAHMOUD M, et al. Thermodynamic characterization of H₂-brineshale wettability: Implications for hydrogen storage at subsurface [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(53): 22510–22521.
- [93] DE BLOK W J, FORTUIN J M H, et al. Bestimmung des Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff in Wasser und wasserigen Polymerlösungen nach der CBS-Methode. Measurement of the diffusion coefficient of hydrogen in water and aqueous polymer solutions according to the CBS-method [J]. Wärme- und Stoffübertragung, 1982, 17: 11–16.
- [94] FERRELL R T, HIMMELBLAU D M. Diffusion coefficients of hydrogen and helium in water [J]. Aiche Journal, 1967, 13(4): 702–708.
- [95] JACOBS E, AERTSENS M, MAES N, et al. Interplay of molecular size and pore network geometry on the diffusion of dissolved gases and HTO in Boom clay [J]. Applied Geochemistry, 2017, 76: 182–195.
- [96] OWCZAREK E, ZAKROCZYMSKI T. Hydrogen transport in a duplex stainless steel [J]. Acta Materialia, 2000, 48(12): 3059–3070.

(编辑 张玉银)