

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.03.01

引用格式: 王海华,薛迎喜,张炜,等. 全球天然氢勘查开发最新发展态势分析[J]. 中国地质调查,2024,11(3): 1-8. (Wang H H, Xue Y X, Zhang W, et al. Analysis of the latest development trend of global natural hydrogen exploration and development[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 1-8.)

全球天然氢勘查开发最新发展态势分析

王海华^{1,2}, 薛迎喜^{1,2}, 张炜^{1,2*}, 房大任^{1,2}, 王海华^{1,2}₍₁₉₇₂₎, 王铭晗^{1,2}

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083; 2. 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要: 随着氢气地表异常显示的广泛发现以及对地下氢气成因机制和成藏机理认识的逐步深化,天然氢作为一种清洁能源,因其可能的巨大资源潜力和可再生性,有望成为全球实现能源转型和碳中和的关键能源。通过对全球天然氢勘查开发最新进展的跟踪研究认为:天然氢已成为全球地质与能源领域关注热点,多成因机制下资源调查发现呈点多面广特征,欧美强国持续投入带动全球发展,氢氦地质资源具有“兼探共采”潜力,等等。鉴于我国在天然氢资源发现方面取得的初步进展,以及对成藏条件及有利区带的初步评估,建议我国应尽快开展全国性天然氢资源调查评价工作。

关键词: 地质氢; 白氢; 金氢; 清洁能源; 深部脱气; 蛇纹石化; 水辐解

中图分类号: TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)03-0001-08

0 引言

随着全球从化石燃料向更加可持续的低碳能源转型,氢能正成为未来能源结构中的重要组成部分^[1]。氢气作为能量密度极高的物质,燃烧后仅产生无任何环境影响的水蒸汽,既是化学工业的重要原料,也可以为运输行业提供能源来源^[2-3]。尽管目前大部分氢气通过煤炭、石油、天然气等化石燃料制取^[4],但利用太阳能、风能等清洁可再生能源作为电力来源进行电解水制氢的低碳氢生产方式正受到越来越广泛的关注,有望在未来能源系统中发挥重要作用^[5-6]。天然氢这一潜在新兴一次能源的发现及引发的天然氢研究和勘查开发热潮,可能会进一步巩固氢能未来在低碳经济中的重要作用^[3, 7-8]。关于天然氢的第一次科学讨论可以追溯至1888年,当时元素周期表之父德米特里·门捷列夫报告称在乌克兰的一座煤矿的裂隙中发现了氢气渗漏现象^[9]。

1987年在非洲马里的 Bourakebougou 钻探寻找水源时的意外爆炸,使加拿大 Petroma 公司(后更名为 Hydroma)通过2011年后的大量钻探工作发现了纯度高达98%的氢气,并于2012年实现了商业开采和小规模发电,但由于安全和政治问题导致其产量有限^[10-11]。据不完全统计,全球有20余家科研机构和40余家企业参与其中,使得近年来天然氢勘查开发格局发生了巨大变化,天然氢这一新兴能源行业正在进入快速成长阶段,在生氢机制和成藏机理研究、勘查发现、试验性开发等方面呈“井喷式”发展^[12]。

本文在系统跟踪全球天然氢勘查开发最新进展的基础上,从天然氢已成为全球地质与能源领域关注热点、多成因机制下资源调查发现呈点多面广特征、欧美主要国家持续投入带动全球发展、氢氦地质资源具有“兼探共采”潜力等方面对全球天然氢的勘查开发和发展趋势进行了较为全面的分析总结,并结合我国天然氢资源调查和研究情况从保障国家能源安全、加强能源资源储备能力、实现双

收稿日期: 2024-05-23; 修订日期: 2024-06-01。

基金项目: 中国地质调查局“地球科学文献知识服务与决策支撑(编号: DD20230139)”“自然资源情报跟踪与研究(编号: DD20230601)”

“清洁能源情报跟踪与研究(编号: DD20230602)”项目联合资助。

第一作者简介: 王海华(1974—),女,正高级工程师,主要从事地质科技战略情报研究工作。Email: whaihua@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 张炜(1981—),男,正高级工程师,主要从事地质科技战略情报研究工作。Email: zhgwei@mail.cgs.gov.cn。

碳目标的角度为我国开展全国性天然氢资源调查评价工作提出了建议。

1 天然氢已成为全球地质与能源领域关注热点

如前文所述,尽管 2012 年就在马里实现了对天然氢资源的开发利用,但以“natural hydrogen”为主题词对 Web of Science 数据库的检索发现,该领域总体发文量不高,从 2020 年才开始呈较明显的上升趋势。其中,高被引论文主要为 Zgonnik(现为美国 Natural Hydrogen Energy 公司首席执行官)2020 年在国际地学权威期刊《Earth - Science Reviews》上发表的综述文章“The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review”^[9],被引用量超过 130 次,该文章结合 500 多篇科学出版物的数据和观点对天然氢分类和成因、全球氢气总量估算、氢气与自然现象等主要方面进行了全面论述。

随着部分国家研究机构、企业等对天然氢勘查开发的关注,2022 年以来国际知名期刊《Science》《Nature》先后刊登天然氢类论文^[13-15]。其中,法国和阿尔巴尼亚科学家对位于阿尔巴尼亚 Tirana 东北约 40 km 处侏罗纪超镁铁质岩体内的 Bulqizë 铬铁矿强烈氢气渗漏现象开展了为期 6 a 的观测,发现该矿山每年至少排出 200 t 氢气^[15]。尽管无法证实氢气来自于岩石内圈闭的古流体还是超镁铁质岩的蛇纹石化,但能够初步证实存在一个深至侏罗纪蛇绿岩地块的断层气藏^[15]。2023 年,天然氢入选《Science》期刊年度十大科学突破之一。

2023 年 11 月底,在澳大利亚召开了第三届全球天然氢峰会,在新冠肺炎疫情后首次线下全面展示天然氢最新进展。来自 30 多个国家的 300 余名与会者就政策法律、科学研究、资源勘查、设备研发等方面展开研讨。如在法律法规层面:美国、澳大利亚、马里、摩洛哥、法国、西班牙、德国等国家已修改或正在修改相关法律法规^[16],加强对天然氢勘查开发的监管措施,欧盟正在积极将天然氢纳入其正在推动的脱碳能源组合。在勘探许可审批方面:继马里、澳大利亚和美国后,法国目前已提交 6 份天然氢勘探许可申请,且 1 份已获批,东欧部分国家也已开放申请。

2 多成因机制下资源调查发现天然氢资源分布呈点多面广特征

天然氢也被称为地质氢、白氢或金氢,主要指广泛分布在陆壳、洋壳、火山热液等地质环境中,由生物或非生物作用形成的地质成因可再生氢气资源^[17-18]。目前研究提出的机制包括但不限于深层岩浆与地幔脱气、岩石破裂产气、岩石与流体的氧化作用、水的辐解、有机生物与非生物分解等^[19-21],其中蛇纹石化、地球深部脱气和水的辐解被认为是生氢的主要机制,因此勘探有利区主要为裂谷发育区、蛇绿岩发育区以及断裂发育的前寒武系富铁地层^[22-24]。实际观察也确实证实了天然氢在不同地质环境中的赋存^[10, 16, 25-27],包括:洋中脊^[28-30];板块汇聚边缘蛇绿岩带,如美国、阿曼、新喀里多尼亚、土耳其、菲律宾和马来西亚^[31-38];以前寒武纪大陆基底为代表的构造稳定区,如美国、纳米比亚、马里、俄罗斯、芬兰、澳大利亚和巴西^[10, 39-45];以岩浆及温泉活动区为代表的构造活动带,如美国、意大利、冰岛和吉布提^[46-48]。目前天然氢的发现以地表“仙女圈”现象的显示、已有钻井测井资料的氢气异常显示、土壤气体测量为主要手段^[49-50],但进一步的资源潜力评估需要多种地球物理、地球化学勘探方法与钻探的综合应用^[16, 18]。

此外,尽管对天然氢的成因机制和成藏机理存在争论,但这并不影响对该类能源资源的勘查开发研究,正如油气开发远早于油气成藏系统研究一样^[14]。目前,针对天然氢成藏系统的研究多借鉴油气研究的经验(图 1)^[23],结合天然氢多成因机制、多成藏地质条件、多赋存形态、易与含氧元素矿物和微生物反应、易于挥发扩散、低溶解度等特点,从“生储盖圈运保”6 个方面开展分析^[51],通过构建成藏系统模型,促进更高效、更有效的远景区和有利目标区圈定以及资源量和储量评估^[18]。如 Boreham 等^[4]利用油气系统概念结合澳大利亚天然氢资源调查情况,建立了可用于指导不同常规和非常规油气地质环境条件下天然氢勘探的源运聚系统^[21]。

近期进展跟踪表明,美国地质调查局正在开发天然氢资源潜力预测模型和成藏系统模型,并计划发布全球天然氢资源潜力分布图和美国天然氢勘

探开发有利区分布图^[52-54]。澳大利亚地球科学局对历史钻井样品的氢气同位素分析表明:横跨南澳大利亚州、塔斯马尼亚州、西澳大利亚州和北领地的前寒武纪基底岩石之上的氢气摩尔浓度大于10%,且主要为非生物成因;根据蛇纹石化和水的辐解作用估算认为,澳大利亚陆上1 km 深度内的年氢气资源潜力为 $(1.6 \sim 58) \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[4, 55]。法国国家科学研究中心等在阿尔巴尼亚和科索沃开展的地球化学调查,在迪纳拉山脉附近的多处泉水中检测到较高含量氢气,且主要与氮气和甲烷气共存,综合同位素分析结果和假设的地温梯度认为,该区域的氢气可能来自2 km 深度处蛇绿岩地块的蛇纹石化^[2]。北京大学等在三水盆地的土壤气体测量调查,发现了可能来自多个断层带的异常高浓度氢气显示,对深部氢气成因的分析认为,可能来自地幔的岩浆脱气或地壳的镁铁质-超镁铁质岩蛇纹石化^[56]。中国矿业大学(北京)等指出松辽盆地大陆科学钻探工程在松科二井的钻探过程中探测到明显的氢气异常,同位素分析表明氢气为壳源和幔源,表明了氢气成因的复杂性^[57]。

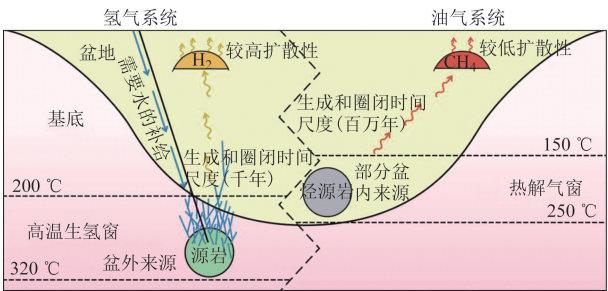


图1 天然氢成藏系统与油气成藏系统对比^[23]
Fig.1 Comparison between hydrogen accumulation system and oil and gas accumulation system

3 欧美部分国家持续投入带动全球天然氢开发研究

法国作为最早开始天然氢勘查开发研究的国家之一,在比利牛斯前陆、洛林地区、巴黎盆地等证实了天然氢的存在^[22, 58-59]。2022年4月在法律上正式承认天然氢为一种能源资源,并开放独家研究许可证或勘探许可证申请,如TBH2 Aquitaine公司2023年12月首个获得为期5 a的独家研究许可证,以调查比利牛斯山一大西洋省225 km²区域内的天然氢、氮气等相关资源的赋存情况。但需要注

意的是,法国天然氢勘探许可证的审批过程较为漫长,预计需要18个月的时间。法国总统马克龙在2023年12月纪念“法国2030”投资计划实施两周年的活动中提出该计划将提供大量资金支持天然氢研究。法国石油研究院2024年4月受法国能源与气候总局委托组织相关领域专家开展本国天然氢资源潜力评估,具体包括总结控制天然氢生成的物理化学机制、确定法国陆上和海上的勘查开发有利区、以及确定可能的生产方法等^[60]。该机构还牵头由国际能源署氢技术合作计划发起的“天然氢任务”,旨在提高人们对天然氢这一新能源资源的研究和行业发展现状的认识,涵盖科学、技术、经济、法律和环境等几乎所有领域,具体包括提供如何评估天然氢资源潜力的科学指南、帮助政府和资助机构制定研究计划、提供如何开发利用天然氢的技术指南、开发储量经济评价方法、提供有关审批天然氢开发利用的法律指南、提供有关天然氢开发利用风险的信息等。

相比于法国,美国最初对天然氢的关注和投入程度较低,但近年来得到明显改善,如该国参议院于2024年2月举行了针对天然氢的听证会^[61],邀请了美国能源部高级研究计划局主任、美国地质调查局天然氢项目负责人和Koloma公司首席执行官,呈现出“政府加强关注、联邦机构积极推动、企业寻求突破”的发展态势。其中,美国能源部2024年2月宣布为16个项目提供2 000万美元资助,用于开发以最低成本和环境影响通过人为刺激加速地下氢气生成的方法^[62];美国地质调查局则根据自身职能专注于天然氢气藏的勘探,除了前面提到的正在开发天然氢资源潜力预测模型和成藏系统模型,以及计划发布全球天然氢资源潜力分布图和美国天然氢勘探开发有利区分布图外,2024年2月还宣布与科罗拉多矿业学院设立由多家全球知名油气、固体矿产企业及天然氢初创企业参与资助的天然氢合作研究计划;美国财政部和税务局2023年12月根据《通胀削减法案》发布了清洁氢气生产税收抵免指南,提供了为期10 a的激励措施,最高抵免额度达3美元/kg氢气,但天然氢尚不在免税范围内,美国能源部计划2024年年底更新“温室气体、排放管控和运输中能源使用(GREET)”模型,以便天然氢生产企业今后申请免税;美国多家企业已初步形成天然氢勘探开发规模,如Natural Hydrogen Energy公司2019年在美国

内布拉斯加州钻探了全球第一口天然氢专探井并成功钻获较高含量氢气流, Koloma 公司在继 2023 年获得来自突破能源基金等的 9 630 万美元融资后于 2024 年 2 月又获得多家风投基金的 2.46 亿美元投资用于天然氢的勘查开发, Eden GeoPower 公司 2023 年 9 月与阿曼能源与矿产部签署了一份谅解备忘录, 以在阿曼 Samail 蛇绿岩内富含橄榄岩的区域利用其已申请专利的“电储层刺激”技术开展地质氢的人工刺激开发示范^[63]。

除法国、澳大利亚、美国、西班牙等较早就开始关注天然氢的国家持续发力外, 哥伦比亚、巴西、玻利维亚、摩洛哥、阿曼等国也开始关注和积极参与天然氢的勘查开发。哥伦比亚政府为促进该国的能源转型和能源结构多样化, 在批准通过的 2022—2026 年国家发展计划中对作为非常规可再生能源的天然氢的开发给予了税费优惠。上述法律框架还授权哥伦比亚矿业与能源部审批天然氢勘查开发申请, 同时授权该部门负责制定上述申请必须遵循的准则、要求以及技术、经济、财务和法律条件^[64]。哥伦比亚国立大学等也首次在哥伦比亚的蛇绿岩区域发现天然氢的地表显示, 首先利用遥感调查在库卡-帕迪亚山谷发现了植被异常并圈定了天然氢勘查远景区, 然后利用土壤气体测量确定了氢气的地表逸出, 最后分析认为氢气可能来源于西科迪勒拉山脉和北科迪勒拉山脉下伏深部蛇绿岩或侵入岩等富铁岩石与大气降水的反应^[65]。此外, 巴西国家石油公司 2023 年 10 月在巴伊亚州开始天然氢研究工作, 计划投入 390 万美元, 并将进一步扩大资源调查范围^[66]。

4 氢氦地质资源具有“兼探共采”潜力

氢气作为高科技产业无可替代的关键元素, 且资源分布相对集中, 已成为我国对外依存度极高并可能严重制约高科技产业发展创新的重要战略资源之一^[67-68]。相较天然氢, 对氦气成因机制和成藏机理的研究更为系统深入, 其来源主要包括火山喷发和岩石风化等作用释放的大气源氦、壳内岩石矿物所含放射性元素衰变产生的壳源氦, 以及通过脱气作用释放到壳内沉积储层中的赋存于地幔的地球深部原始氦^[69-70]。

现有研究表明: 在地质环境中, 氢气和氦气存在共存的可能^[71-74]。一是氦气不能单独运移, 需

要氢气、烃类气体、氮气和二氧化碳等作为载气; 二是两者可能具有相同来源, 如深部脱气、水的辐解/放射性元素衰变, 但也存在来源不同而在运移过程中发生混合的可能。因此, 有关国家正在部署或开展氢氦地质资源“兼探共采”的可行性研究与示范工作, 如美国地质调查局 Mendenhall 博士后奖学金计划 2023 年设置相关课题, 旨在加强对近地表环境中氢气与惰性气体(尤其是氦气)相关性的认识, 从而促进对美国氢氦地质资源的更有效勘探开发^[75]; Cheng 等^[76]2023 年在《Nature》期刊发表的论文指出, 针对美国 Williston 克拉通内盆地氦气-氮气共存的模型研究表明该区域也可能赋存有大量氢气, 因为产生氦气的放射性机制也可通过分解水生成氢气。

目前的氢氦共同发现多出偶然, 如法国 45-8 能源公司在其氢气和二氧化碳的资源勘探过程中发现了氢气赋存的可能^[77], 澳大利亚 Gold Hydrogen 公司在其氢气钻探验证过程中发现了高含量氦气显示。其中, Gold Hydrogen 公司利用 Ramsay 1 和 Ramsay 2 两口天然氢专探井在澳大利亚南部约克半岛钻获高浓度氢气和氦气异常, 并初步评估项目区域的氢气和氦气远景资源量分别为 1.31×10^6 t 和 11.6×10^8 m³^[78]。2024 年 4 月, Gold Hydrogen 公司完成对 Ramsay 2 井的进一步试井, 证实在该井 250 m 至 1 000 m 深度区间的 7 个层位存在天然氢产出, 在 531 m 深度处测得纯度高达 95.8% 的氢气含量^[79]。澳大利亚 HyTerra 公司在美国堪萨斯州的 Nemaha 项目也钻获高含量氢气和氦气, 评估氢气和氦气远景资源量分别为 28.4×10^8 m³ 和 0.13×10^8 m³^[80]。

5 结论与建议

天然氢作为地质作用的产物, 深入研究其来源、成因、分布对于认识地球内部、地壳、水圈及生物圈的结构、演化和动态变化非常关键, 是开展地球系统科学研究不可或缺的重要内容, 是保障国家能源安全和加强能源资源储备能力以及实现双碳目标极具潜力的重要基础。

目前, 全球天然氢资源勘探开发已进入快速发展阶段, 据不完全统计已有美国、加拿大、巴西、哥伦比亚、玻利维亚、法国、德国、西班牙、俄罗斯、中国、马来西亚、阿曼、澳大利亚、马里、摩洛哥等涵盖

各大洲的数十个国家参与其中。尽管我国针对天然氢的资源调查和科学研究刚刚起步,但除前文所述在我国三水盆地和松辽盆地发现氢气异常显示外,孟庆强等^[81]早在2014年就通过对济阳坳陷构造活动区内天然气中氢气含量及同位素组成的分析测试,探讨了该区域的地下氢气赋存和可能的成因。近年开展的分析研究工作结合国外天然氢资源勘查与地质理论研究取得的进展,提出了我国的天然氢资源调查方向,如孟庆强等^[82]认为控制我国含油气盆地分布的板块碰撞带和俯冲带及其周缘具备高含量氢气发育和保存的地质条件;窦立荣等^[24]认为我国已发现的高含量氢气点与富氢地质条件匹配度高,郯庐断裂带及周缘裂陷盆地区、阿尔金断裂带及两侧盆地区、三江构造带—龙门山断裂带及周缘盆地区是天然氢成藏有利区带。

综上所述,我国应加快部署开展全国性天然氢资源调查评价工作,充分发挥政府、能源和地质主管部门、能源矿产企业、高校、科研院所等的优势,形成合力,加大天然氢勘查开发理论研究、已有资料的汇总分析,重点区域的普查与详查、资源基地的建设与开发示范、新矿种的申报与审批、相关探矿权、采矿权、税收抵免和补贴政策的研究等。具体来说,应开展天然氢生成有利地质条件分布图编制工作,如蛇绿岩带、富铁、铀、钍和钾的岩浆岩和沉积岩带、有利水岩相互作用的含水层带、有利氢气运移的断裂带、已发现的天然氢地表显示(异常)等,选择有利区开展天然氢资源调查评价示范,构建遥感、地球化学、地震和重磁、钻探、室内分析测试等一体化勘查技术体系,在全球探索未来地质能源资源行列中占据制高点。

参考文献(References):

[1] Blay – Roger R, Bach W, Bobadilla L F, et al. Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113888.

[2] Lévy D, Boka – Mene M, Meshi A, et al. Looking for natural hydrogen in Albania and Kosova [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1167634.

[3] 苏宇通, 金之钧, 刘润超, 等. 非洲马里气田天然氢气勘探案例介绍及全球天然氢气勘探进展 [J/OL]. 石油与天然气地质, 2024. (2024 – 03 – 05). <https://link.cnki.net/urlid/11.4820.TE.20240301.1546.002>.

Su Y T, Jin Z J, Liu R C, et al. Natural hydrogen exploration: A case from Mali gas field in Africa and global progress [J/OL]. Oil & Gas Geology, 2024. (2024 – 03 – 05). <https://link.cnki.net/>

urlid/11.4820.TE.20240301.1546.002.

[4] 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.

[5] Moriarty P, Honnery D. Intermittent renewable energy: The only future source of hydrogen? [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32 (12): 1616 – 1624.

[6] Raineau L. Rethinking path dependence, technical innovation and social practices in a renewable energy future [J]. Energy Research & Social Science, 2022, 84: 102411.

[7] Lapi T, Chatzimpiros P, Raineau L, et al. System approach to natural versus manufactured hydrogen: An interdisciplinary perspective on a new primary energy source [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 (51): 21701 – 21712.

[8] Tian Q N, Yao S Q, Shao M J, et al. Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of “carbon neutrality” [J]. China Geology, 2022, 5 (4): 722 – 733.

[9] Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review [J]. Earth – Science Reviews, 2020, 203: 103140.

[10] Prinzhofer A, Cissé C S T, 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.

[11] 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.

[12] Ball P J, Czado K. Natural hydrogen: the race to discovery and concept demonstration [EB/OL]. (2024 – 02 – 28) [2024 – 05 – 18]. [https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural – hydrogen – the – race – to – discovery – and – concept – demonstration/](https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-race-to-discovery-and-concept-demonstration/).

[13] Osselin F, Soulaire C, Fauguerolles C, et al. Orange hydrogen is the new green [J]. Nature Geoscience, 2022, 15 (10): 765 – 769.

[14] Hand E. Hidden hydrogen [J]. Science, 2023, 379 (6633): 630 – 636.

[15] Truche L, Donzé F V, Gskolli E, et al. A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite [J]. Science, 2024, 383 (6683): 618 – 621.

[16] Rigollet C, Prinzhofer A. Natural hydrogen: A new source of carbon – free and renewable energy that can compete with hydrocarbons [J]. First Break, 2022, 40 (10): 78 – 84.

[17] 田黔宁, 张炜, 王海华, 等. 能源转型背景下不可忽视的新能源: 天然氢 [J]. 中国地质调查, 2022, 9 (1): 1 – 15.

Tian Q N, Zhang W, Wang H H, et al. Non – negligible new energy in the energy transition context: Natural hydrogen [J]. Geological Survey of China, 2022, 9 (1): 1 – 15.

[18] Zhao H W, Jones E A, Singh R S, et al. The hydrogen system in the subsurface: Implications for natural hydrogen exploration [C]//The ADIPEC. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2023.

- [19] Natzke J, Noar J, Bruno – Bórcena J M. Azotobacter vinelandii nitrogenase activity, hydrogen production, and response to oxygen exposure [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84 (16) : e01208 – 18.
- [20] Gregory S P, Barnett M J, Field L P, et al. Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry [J]. Microorganisms, 2019, 7 (2) : 53.
- [21] 魏琪钊, 朱如凯, 杨智, 等. 天然氢气藏地质特征、形成分布与资源前景 [J/OL]. 天然气地球科学, 2023. (2023 – 10 – 10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20231008.1700.008.html>.
Wei Q Z, Zhu R K, Yang Z, et al. Geological characteristics, formation distribution and resource prospects of natural hydrogen reservoir [J/OL]. Natural Gas Geoscience, 2023. (2023 – 10 – 10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20231008.1700.008.html>.
- [22] Lefeuve N, Truche L, Donzé F V, et al. Native H₂ exploration in the western Pyrenean foothills [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2021, 22 (8) : e2021GC009917.
- [23] Jackson O, Lawrence S R, Hutchinson I P, et al. Natural hydrogen: sources, systems and exploration plays [J]. Geoenergy, 2024, 2 (1) : geoenergy2024 – 002.
- [24] 窦立荣, 刘化清, 李博, 等. 全球天然氢气勘探开发利用进展及中国的勘探前景 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36 (2) : 1 – 14.
Dou L R, Liu H Q, Li B, et al. Global natural hydrogen exploration and development situation and prospects in China [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36 (2) : 1 – 14.
- [25] 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.
- [26] Pasquet G, Idriss A M, Ronjon – Magand L, et al. Natural hydrogen potential and basaltic alteration in the Asal – Ghoubbet rift, Republic of Djibouti [J]. Earth Sciences Bulletin, 2023, 194 (1) : 9.
- [27] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 地球多层圈有机 – 无机相互作用的资源效应 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35 (5) : 741 – 762.
Liu Q Y, Zhu D Y, Meng Q Q, et al. Organic – inorganic interactions in the Earth's multi – spheres and resources effects [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35 (5) : 741 – 762.
- [28] Welhan J A, Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids [J]. Geophysical Research Letters, 1979, 6 (11) : 829 – 831.
- [29] Marcaillou C, Muñoz M, Vidal O, et al. Mineralogical evidence for H₂ degassing during serpentinization at 300 °C/300 bar [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 303 (3/4) : 281 – 290.
- [30] Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, et al. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR) [J]. Chemical Geology, 2002, 191 (4) : 345 – 359.
- [31] Neal C, Stanger G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 66 : 315 – 320.
- [32] 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, 71 (1/2/3) : 211 – 222.
- [33] Sano Y, Urabe A, Wakita H, et al. Origin of hydrogen – nitrogen gas seeps, Oman [J]. Applied Geochemistry, 1993, 8 (1) : 1 – 8.
- [34] Hosgörmez H. Origin of the natural gas seep of Çirali (Chimera), Turkey: Site of the first Olympic fire [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30 (1) : 131 – 141.
- [35] Hosgoromez H, Etiope G, Yalçın 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 (4) : 263 – 273.
- [36] Morrill P L, Kuenen J G, Johnson O J, et al. Geochemistry and geobiology of a present – day serpentinization site in California: The Cedars [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 109 : 222 – 240.
- [37] 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.
- [38] Ismail H H, Zhao H, Rajput S, et al. Serpentinization in Peninsular Malaysia: Implication for hydrogen generation [C]//The ADIPEC. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2023.
- [39] Newell K D, Doveton J H, Merriam D F, et al. H₂ – rich and hydrocarbon gas recovered in a deep Precambrian well in Northeastern Kansas [J]. Natural Resources Research, 2007, 16 (3) : 277 – 292.
- [40] 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 (7531) : 379 – 382.
- [41] 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 (3) : 369 – 383.
- [42] 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.
- [43] Donzé F V, Truche L, Namin P S, et al. Migration of natural hydrogen from deep – seated sources in the São Francisco basin, Brazil [J]. Geosciences, 2020, 10 (9) : 346.
- [44] 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.
- [45] Moretti I, Geymond U, Pasquet G, et al. Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 (84) : 35588 – 35607.
- [46] Leila M, Lévy D, Battani A, et al. Origin of continuous hydrogen flux in gas manifestations at the Larderello geothermal field, Central Italy [J]. Chemical Geology, 2021, 585 : 120564.

- [47] Combaudon V, Moretti I, Kleine B I, et al. Hydrogen emissions from hydrothermal fields in Iceland and comparison with the Mid - Atlantic Ridge[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(18): 10217 - 10227.
- [48] Pasquet G, Hassan R H, Sissmann O, et al. An attempt to study natural H₂ resources across an oceanic ridge penetrating a continent; The Asal - Ghoubbet rift (Republic of Djibouti) [J]. *Geosciences*, 2022, 12(1): 16.
- [49] Langhi L, Strand J. Exploring natural hydrogen hotspots: A review and soil - gas survey design for identifying seepage[J]. *Geoenergy*, 2023, 1(1): geoenergy2023 - 014.
- [50] Davies K, Esteban L, Keshavarz A, et al. Advancing natural hydrogen exploration: Headspace gas analysis in water - logged environments[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(3): 2010 - 2017.
- [51] Stalker L, Talukder A, Strand J, et al. Gold (hydrogen) rush: risks and uncertainties in exploring for naturally occurring hydrogen[J]. *The APPEA Journal*, 2022, 62(1): 361 - 380.
- [52] U. S. Department of Energy. Understanding the potential for geologic hydrogen resources[EB/OL]. [2024 - 05 - 18]. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/arpa005_ellis_2023_o.pdf.
- [53] U. S. Geological Survey. The potential for geologic hydrogen for next - generation energy[EB/OL]. (2023 - 04 - 13) [2024 - 05 - 18]. <https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>.
- [54] U. S. Geological Survey. USGS, Colorado School of Mines establish joint industry program to explore potential of geologic hydrogen[EB/OL]. (2024 - 02 - 26) [2024 - 05 - 18]. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/usgs-colorado-school-mines-establish-joint-industry-program-explore>.
- [55] Frery E, Langhi L, Markov J. Natural hydrogen exploration in Australia - state of knowledge and presentation of a case study[J]. *The APPEA Journal*, 2022, 62(1): 223 - 234.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Halas P, Dupuy A, Franceschi M, et al. Hydrogen gas in circular depressions in South Gironde, France: Flux, stock, or artefact? [J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 127: 104928.
- [59] Lefeuve N, Truche L, Donzé 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.
- [60] IFPEN. Focus on natural hydrogen; IFPEN involve in IEA and DGEI initiatives[EB/OL]. (2024 - 04 - 29) [2024 - 05 - 18]. <https://www.ifpenouvelles.com/article/focus-natural-hydrogen-ifpen-involve-iea-and-dgei-initiatives>.
- [61] U. S. Senate Energy and Natural Resources Committee. Manchin questions witnesses on the potential of geologic hydrogen, criticizes administration's approach to hydrogen tax credits[EB/OL]. (2024 - 02 - 28) [2024 - 05 - 18]. <https://www.energy.senate.gov/2024/2/manchin-questions-witnesses-on-the-potential-of-geologic-hydrogen-criticizes-administration-s-approach-to-hydrogen-tax-credits>.
- [62] Advanced Research Projects Agency - Energy U. S. Department of Energy. U. S. Department of Energy announces \$ 20 million to 16 projects spearheading exploration of geologic hydrogen[EB/OL]. (2024 - 02 - 08) [2024 - 05 - 18]. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-20-million-16-projects-spearheading>.
- [63] Eden. Eden signs world's first agreement to study and demonstrate the potential of stimulated geologic hydrogen in Oman[EB/OL]. (2023 - 09 - 01) [2024 - 05 - 18]. <https://www.edengeopower.com/news-insights/eden-signs-worlds-first-agreement-to-study-and-demonstrate-the-potential-of-stimulated-geologic-hydrogen-in-oman>.
- [64] World Economic Forum. White hydrogen can be a game - changer in Colombia's green transition. Here's why[EB/OL]. (2024 - 01 - 16) [2024 - 05 - 18]. <https://www.weforum.org/agenda/2024/01/white-hydrogen-and-its-role-within-the-energy-transition/>.
- [65] Ramirez A C, Penagos F G, Rodriguez G, et al. Natural H₂ emissions in Colombian ophiolites: First findings [J]. *Geosciences*, 2023, 13(12): 358.
- [66] Anderson P, Staff R. Petrobras boosts investment in natural hydrogen research[EB/OL]. (2024 - 05 - 07) [2024 - 05 - 18]. <https://www.rigzone.com/news/petrobras-boosts-investment-in-natural-hydrogen-research-07-may-2024-176650-article/>.
- [67] 张宇轩, 吕鹏瑞, 牛亚卓, 等. 全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 11 - 32.
- Zhang Y X, Lv P R, Niu Y Z, et al. Preliminary study on the geological characteristics, resource potential and production capacity pattern of global helium resources [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 11 - 32.
- [68] 刘成林, 张亚雄, 王馨佩, 等. 中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比及启示[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(2): 1 - 10.
- Liu C L, Zhang Y X, Wang X P, et al. Comparison and enlightenment of helium geological conditions and resource potential between China and the United States[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(2): 1 - 10.
- [69] 李玉宏, 张国伟, 周俊林, 等. 氦气资源调查理论与技术研究现状及建议[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 1 - 10.
- Li Y H, Zhang G W, Zhou J L, et al. Research status and suggestions on helium resource investigation theory and technology[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 1 - 10.
- [70] 秦胜飞, 陶刚, 罗鑫, 等. 氦气富集与天然气成藏差异、勘探误区[J]. *天然气工业*, 2023, 43(12): 138 - 151.

- Qin S F, Tao G, Luo X, et al. Difference between helium enrichment and natural gas accumulation and misunderstandings in helium exploration[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43 (12) : 138 – 151.
- [71] Arrouvel C, Prinzhofer A. Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (36) : 18780 – 18794.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] Prinzhofer A, Rigollet C, Lefevre N, et al. Maricú (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 62 : 91 – 98.
- [75] U. S. Geological Survey. Application of noble gas geochemistry to understanding geologic hydrogen and helium resources [EB/OL]. [2024 – 05 – 18]. <https://www.usgs.gov/centers/mendenhall-research-fellowship-program/22-7-application-noble-gas-geochemistry>.
- [76] Cheng A R, Lollar B S, Gluyas J G, et al. Primary N₂ – He gas field formation in intracratonic sedimentary basins [J]. *Nature*, 2023, 615 (7950) : 94 – 99.
- [77] Kremer T, Ars J, Laine C, et al. A new passive seismic monitoring strategy for the exploration of natural hydrogen and helium occurrences[C]//84th EAGE Annual Conference & Exhibition. Vienna, Austria, 2023.
- [78] Gold Hydrogen. Quarterly activities report for the period ended 31 March 2024[EB/OL]. (2024 – 04 – 24) [2024 – 05 – 18]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/2024.04.24-ASX-Announcement-Combined-Quarterly-Reports.pdf>.
- [79] Gold Hydrogen. Interim exploration well testing update[EB/OL]. (2024 – 05 – 27) [2024 – 05 – 29]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/2024.05.27-ASX-Announcement-Exploration-Well-Testing-Interim-Update.pdf>.
- [80] HyTerra. Our Nemaha project in Kansas, USA, is prospective for hydrogen and helium[EB/OL]. [2024 – 05 – 18]. <https://hyterra.com/projects/>.
- [81] 孟庆强, 金之钧, 刘文汇, 等. 天然气中伴生氢气的资源意义及其分布[J]. *石油实验地质*, 2014, 36 (6) : 712 – 717, 724.
- Meng Q Q, Jin Z J, Liu W H, et al. Distribution and genesis of hydrogen gas in natural gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36 (6) : 712 – 717, 724.
- [82] 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 Q Q, Jin Z J, Sun D S, et al. Geological background and exploration prospects for the occurrence of high – content hydrogen[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43 (2) : 208 – 216.

Analysis of the latest development trend of global natural hydrogen exploration and development

WANG Haihua^{1,2}, XUE Yingxi^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, FANG Daren^{1,2}, WANG Haihua^{1,2}₍₁₉₇₂₎, WANG Minghan^{1,2}
(1. *Geological Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *China Geological Library, Beijing 100083, China*)

Abstract: The hydrogen surface anomalies were widely discovered and the genesis mechanism and accumulation mechanism of underground hydrogen were deeply understood. As a clean energy, the natural hydrogen is expected to become a key energy source for global energy transition and carbon neutrality due to its huge resource potential and renewable nature. Through the tracking of the latest progress in global natural hydrogen exploration and development, it is concluded that natural hydrogen has become a hot topic in the global geology and energy fields, and the resource surveys and discoveries of natural hydrogen driven by multiple genesis mechanism have extensive and multi – point characteristics. The global development of natural hydrogen was driven by continuous investment of major countries as Europe and the United States. Besides, the hydrogen and helium have the potential of “co – exploration and co – exploitation”. In view of the preliminary progress in natural hydrogen resources discovery in China and the preliminary assessment of accumulation conditions and favorable zones, it is suggested that China should carry out the nationwide natural hydrogen resource survey and evaluation as soon as possible.

Keywords: geological hydrogen; white hydrogen; golden hydrogen; clean energy; degassing of deep – seated hydrogen; serpentinization; water radiolysis

(责任编辑: 常艳)