

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.314

引用格式: 张炜,王海华,房大任.天然氢产业发展分析与展望[J].中国地质调查,2025,12(2):20-29.(Zhang W,Wang H H,Fang D R. Analysis and prospect of natural hydrogen industry development[J]. Geological Survey of China,2025,12(2):20-29.)

天然氢产业发展分析与展望

张炜^{1,2},王海华^{1,2},房大任^{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:作为一种清洁能源,天然氢有着巨大的资源潜力和可再生性,有望成为实现全球能源转型和碳中和的关键能源。基于文献和资讯的调研结果,分析天然氢产业参与机构和发展现状,结合美国页岩革命取得的成功经验,重点围绕以资源勘查开发为主要目标且可能对天然氢产业发展起到关键作用的中小型企业,详细总结3家国内外具有代表性的中小型企业天然氢资源勘查开发过程中取得的重要进展。研究认为:在我国加快推动天然氢资源研究与勘查开发的背景下,以自然资源部及其所属中国地质调查局、国家发展和改革委员会及其所属国家能源局等为代表的相关职能政府机构应加强天然氢产业进展分析、科学研究路线图编制、技术方法展望与预测、政策研究、产业化研究等方面的协调组织和引导,激励以科研机构、中小型企业、大型能源企业为主体的天然氢产业的发展。研究可为我国加快推进天然氢产业化部署提供借鉴。

关键词:天然氢;清洁能源;中小型企业;美国页岩革命;产业化

中图分类号:TV211.1;P618

文献标志码:A

文章编号:2095-8706(2025)02-0020-10

0 引言

天然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的可再生氢气资源^[1-2]。尽管对自然界中地下氢气赋存的发现可追溯至19世纪80年代,并且在洋中脊、板块汇聚边缘蛇绿岩带、以前寒武纪大陆基底为代表的构造稳定区、以岩浆及温泉活动区为代表的构造活动带等地质环境中均有天然氢发现^[3],但对天然氢的研究多处于理论阶段。

2020年以来,随着全球对零碳排放能源的需求日益增长,天然氢作为一种化石燃料的潜在替代性能源引起了前所未有的关注^[4-7]。据不完全统计,包括我国在内,美国、加拿大、巴西、法国、澳大利亚、马里等数十个国家已探索性地部署和实施了

天然氢的资源勘查开发^[1]。其中,法国、澳大利亚、美国等国家已开始从政府层面积极推动天然氢领域的科学研究、资源调查与评价,以及相关政策法规的修订与完善。例如:作为负责澳大利亚天然氢领域科学研究、项目资助和国际合作的主要政府机构,联邦科学与工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization,CSIRO)已设立十余个对天然氢进行长期监测、勘查开发、经济技术评价的相关项目;法国作为最早开始天然氢研究的国家之一,于2022年4月颁布的第2022-536号法令第27条将天然氢作为新的矿种纳入法国的矿业法,促使相关企业提交了6份勘探许可申请^[8];美国能源部正计划通过更新“温室气体、排放管控和运输中能源使用(Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies, GREET)模型”,将天然氢纳入美国财政部和税务局于2023年12月发布的《清洁氢气生产税收

收稿日期:2024-09-12;修订日期:2025-02-06。

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)”和“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: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。

通信作者简介:房大任(1989—),男,高级工程师,主要从事地球科学情报研究工作。Email:fdaren@mail.cgs.gov.cn。

抵免指南》^[9]的免税范围内。

鉴于天然氢这一新兴能源产业可能即将进入快速发展阶段,在利用文献调研和资讯检索方法对天然氢产业现有参与机构进行分析的基础上,重点围绕以资源勘查开发为主要目标且可能对天然氢产业发展起到关键作用的中小型企业,详细总结3家国内外具有代表性的中小型企业在天然氢资源勘查开发过程中取得的重要进展。此外,基于天然氢与油气在资源特征上的相似性,分析美国“页岩革命”可供参考的成功经验,并结合我国天然氢产业发展现状提出建议。研究可为我国加快推进天然氢产业化部署提供借鉴。

1 天然氢产业参与机构分析

1.1 基于文献的机构分析

本研究设置主题检索词为“natural hydrogen”、标题检索词为“natural hydrogen”、摘要检索词为“natural hydrogen”、关键词为“natural hydrogen”、数据库关键词为“natural hydrogen”,在 Web of Science 数据库中检索到 159 篇天然氢领域的相关文献,图 1 展示了发文量 5 篇及以上的机构,可分为政府研究机构、高校和企业 3 类。其中,企业包括 Geo4U 公司和道达尔公司,前者是一家石油、天然气和环境相关领域的地球科学综合服务企业,参与了马里 Bourakebougou 地区的天然氢资源勘查开发项目^[10-12]和巴西圣弗朗西斯科盆地的天然氢资源

调查工作^[13-14],后者是全球大型油气企业,主要参与了法国比利牛斯山造山带和加拿大萨斯喀彻温省南部铀矿床的天然氢资源调查工作。对检索结果的分析表明,政府研究机构 and 高校在天然氢领域的工作重点包括地表近圆形洼地构造调查和土壤气体测量、成因机制和成藏机理研究,以及成藏系统的构建和勘查开发远景区的圈定^[11, 15-21]。文献调研还表明我国科研机构和高校对天然氢的研究起步较晚^[22-23],重要发现主要集中在近年。例如:松辽盆地大陆科学钻探工程在松科二井的钻探过程中检测到 大段连续的氢气异常^[24-25];北京大学金之钧院士团队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^[26]。

1.2 基于资讯的机构分析

根据对政府资助报告、上市机构报告、勘探开采许可申请、企业网站等资讯的搜集发现^[27-30],涉及天然氢资源勘探开发的企业有数十家,主要集中在天然氢资源调查程度较高的欧洲、澳大利亚、美国等地区和国家。例如:法国的 45-8 Energy 公司和 Terrensis 公司,西班牙的 Helios Aragon 公司,澳大利亚的 HyTerra 公司、Gold Hydrogen 公司、Mosman Oil and Gas 公司和 H2EX 公司,美国的 Natural Hydrogen Energy 公司和 Koloma 公司以及加拿大的 Hydroma 公司,这些企业以有利目标区圈定、“地物化遥钻”综合资源调查、资源量和储量评估为主要工作目标^[31-32]。

综上所述,尽管道达尔公司、哈里伯顿石油公司^[33]、ENGIE 集团^[34]、哥伦比亚国家石油公司^[35]等大型能源企业也开始关注天然氢这一新型地质能源,但与美国“页岩革命”发展初期类似,除了政府研究机构和高校的关注外,天然氢勘查主要以中小型企业作为技术研发与推广应用,以及区块申请和资源详查的“主力军”。表 1 列出了部分具有代表性的中小型企业及其在天然氢相关领域开展的主要工作,其中大部分为天然氢资源开发企业,小部分为相关技术服务企业,前者的特点是一般成立时间较短,且成立之初就将天然氢资源勘查开发作为主营业务。为了更好地展示中小型企业在天然氢资源调查与开发利用方面所发挥的引领作用,本研究以加拿大 Hydroma 公司、澳大利亚 Gold Hydrogen 公司和我国北京天成元能源有限公司为例,对 3 家公司取得的相关进展进行了总结。

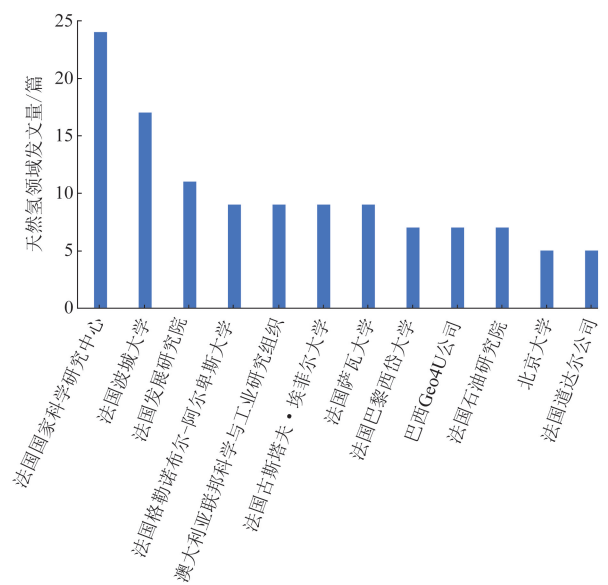


图1 发文量5篇及以上的机构

Fig.1 Institutions with five or more publications

表 1 部分具有代表性的中小型企业简介^[10-14, 28-29, 31-33]

Tab.1 Profiles of some representative small and medium – sized enterprises

企业名称	成立时间	企业总部所在国	企业业务简介	在天然氢领域开展的主要工作
FDE	2009	法国	天然气、天然氢和地热能勘查开发	联合洛林大学和法国国家科学研究中心,在洛林地区一座废弃矿井的石炭系内,测量发现 1 093 m 深度处的氢气浓度为 15%,并估计 3 000 m 深度处的氢气浓度可达 98%
45 – 8 Energy	2017	法国	氢气和天然氢勘查开发	在法国涅夫勒省开展的“Fonts – Bouillants 氢气和二氧化碳资源勘探”项目发现了天然氢赋存
Terrensis	2022	法国	天然氢勘查开发	获得法国首个为期 5 a 的天然氢独家研究许可证,以调查比利牛斯—大西洋省 225 km ² 区域内的天然氢、氢气等资源的赋存情况
Getech	1986	英国	为矿产、能源、地热等行业提供资源勘查技术服务	提出了利用其特有的矿物系统分析方法圈定天然氢气藏的勘查工作流程
H2Au	2022	英国	天然氢勘查开发	2024 年,获批准非 3 个区块的天然氢勘探许可,总面积达 1.5 × 10 ⁴ km ² ,目前正在联合 45 – 8 Energy 公司在美国堪萨斯州和爱荷华州开展天然氢勘查工作
Xcalibur Smart Mapping	1962	西班牙	航空地球物理调查	为美国 Nemaha 项目和澳大利亚 Ramsay 项目的天然氢资源勘查提供了航空重力梯度和磁力测量服务
Helios Aragon	2018	西班牙	天然氢勘查开发	在西班牙北部的 Monzon 油田开展天然氢资源勘查,目前已完成地表地球化学调查,并计划钻探欧洲第一口天然氢专探井
HYNAT	2015	瑞士	天然氢勘查开发	2021 年,与摩洛哥碳氢化合物和矿产办公室签署天然氢资源勘查合同,目前已在该国南部探明发现具有开发潜力的天然氢资源
Mosman Oil and Gas	2011	澳大利亚	氢气、天然氢和油气勘查开发	评估了位于澳大利亚 Amadeus 盆地内的 EP 145 区块,认为其具有 7.48 × 10 ⁸ m ³ 的天然氢资源潜力
Gold Hydrogen	2021	澳大利亚	天然氢勘查开发	在澳大利亚南部约克半岛钻获高浓度氢气和氦气,并评估得到氢气和氦气远景资源量分别为 1.31 × 10 ⁶ t 和 11.6 × 10 ⁸ m ³
2H Resources	2021	澳大利亚	天然氢勘查开发	获批可用于天然氢勘查的区块面积约 3 × 10 ⁴ km ²
H2EX	2021	澳大利亚	天然氢勘查开发	获批可用于天然氢勘查的区块面积约 6 000 km ² ,另有总面积约 5.2 × 10 ⁴ km ² 的多个区块正在审批中
HyTerra	2022	澳大利亚	天然氢勘查开发	分别在美国堪萨斯州和内布拉斯加州开展了 Nemaha 项目和 Geneva 项目,开展天然氢和氦气资源勘查
Natural Hydrogen Energy	2012	美国	天然氢勘查开发	与 HyTerra 公司在美国内布拉斯加州联合开展了 Geneva 项目,于 2019 年完成美国首次天然氢钻探,并成功钻获高浓度氢气和氦气
Koloma	2021	美国	天然氢勘查开发	继 2023 年获得来自“突破能源”基金等资助的 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,用于天然氢勘查开发
Chapman Hydrogen and Petroleum Engineering	1985	加拿大	提供石油工程、地质和地球物理调查服务	参与了马里 Bourakebougou 地区的天然氢勘查开发项目
Hydroma	2006	加拿大	天然氢勘查开发、绿氢和氨的生产	2012 年,实现了马里 Bourakebougou 地区的天然氢资源商业开采和小规模发电,成为全球天然氢勘查开发的重要里程碑
Geo4U		巴西	提供石油、天然气和环境相关领域的地球科学综合服务	参与了马里 Bourakebougou 地区的天然氢勘查开发项目和巴西圣弗朗西斯科盆地的天然氢资源调查工作
北京天成元能源有限公司	2023	中国	天然氢、氢气和二氧化碳勘查开发	中标央企天然氢项目,在张北地区开展了天然氢资源调查工作

2 代表性企业天然氢资源勘探开发进展

2.1 加拿大 Hydroma 公司

1987 年,在距离非洲马里首都巴马科 60 km 的 Bourakebougou 村,钻探找水开挖的水井发生意外爆炸,此后确认该井内存在氢气,因此被封堵弃用。

该水井位于元古宙沉积地层内,其中发育有三叠纪辉绿岩岩床^[10]。

2006 年,总部位于加拿大的 Petroma 公司(2019 年更名为 Hydroma 公司)成立,该公司获得了 Bourakebougou 村所处 25 号和 17 号区块的勘查许可权,随后将两个区块合并,总面积约 4.3 × 10⁴ km²。Hydroma 公司在该区块的最初勘探目标是油气,但意外探明了地下氢气的存在。该公司联

合 Chapman Hydrogen and Petroleum Engineering、Geodynamics Research、UTS Geophysics 和 Geo4U 等企业,在开展地震、航空重磁等调查的基础上,于2011年后开展了大量钻探工作,发现了纯度高达98%的氢气^[12]。2012年,为了进一步测试该区块的天然氢开发利用前景,Hydroma公司获得了面积为1 264 km²的区块的开采许可权,并随后实现了天然氢的商业开采和小规模发电,从而实现了天然氢开发的里程碑,目前仍是全球唯一一个实现天然氢生产的项目^[10, 12, 36]。

Hydroma公司通过土壤气体测量和钻探等手段对25号区块的天然氢资源勘查表明^[10-12, 36-37]：
①天然氢气藏的分布并不仅限于 Bourakebougou 村附近,在其半径约8 km的区域范围内的十余口钻井中都获取了以氢气为主要成分的气体样品,地表地球化学研究表明,氢气的渗漏范围可达150 km；
②除 Bougou-1 井钻遇的氢气储层相对较浅(深度约100 m)外,该区域其余十几口钻井在更深部地层(深度可达1 800 m)钻遇了另外4个富氢储层,这些储层主要由岩溶化碳酸盐岩构成,其中赋存的氢气主要以气相存在；
③研究认为钻探发现的大量放射性氦和氡可能表明氢气形成于比当前储层更深的基底岩层内,唯一一口钻至基底的 Bougou-6 井证实了这一猜测,其在钻遇的条带状含铁建造的富铁条带状砂岩内发现了主要以溶解态存在的氢气；
④辉绿岩岩床和浅部含水层可能为该地区的氢气聚集成藏提供了屏障；
⑤部分钻井内的自流水现象以及一氧化碳的存在表明天然氢聚集成藏的地质时期可能晚于油气,且在进行天然氢生产后,储层压力出现了“不降反升”的现象,表明可能存在一个动态生氢系统为上部氢气储层提供补给。

2.2 澳大利亚 Gold Hydrogen 公司

相比于在马里意外发现的天然氢,目前的天然氢勘查以地表“仙女圈”现象的显示、已有钻井测井资料的氢气异常显示,以及土壤气体测量为主要手段,但进一步的资源潜力评估需要多种地球物理和地球化学勘查方法与钻探的综合应用^[1]。近年来,美国、澳大利亚相继钻探了天然氢专探井,其中 Gold Hydrogen 公司2023年10月完钻的 Ramsay 1 井是澳大利亚首口天然氢专探井,其目的是确认地层中的氢气赋存情况。该井总测深1 005 m,钻入前寒武纪基岩约100 m,在不同深度地层采集的气

体和流体样品中,获得的氢气和氦气浓度达到73.3%和3.6%。Gold Hydrogen 公司于2023年12月完钻的 Ramsay 2 井也在不同深度地层测量到86%和6.8%的氢气和氦气浓度^[38-39]。根据钻探结果,对项目区域氢气和氦气远景资源量的最优评估结果分别为 131×10^4 t (标况下体积量为 147×10^8 m³) 和 11.6×10^8 m³^[40]。2024年4月,Gold Hydrogen 公司完成了对 Ramsay 2 井的进一步试井,证实在该井250~1 000 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%的氢气浓度,并发现有利于未来产业化开发的高渗透性白云岩和灰岩地层^[41]。该公司计划对两口专探井的不同井段开展产气测试,通过监测产气量和分析产出流体组分进一步识别优先产气层位并评估产能,为计划开展的氢氦联产示范的优化设计提供数据资料支持^[42]。

Gold Hydrogen 公司成立于2021年,总部位于澳大利亚昆士兰州的布里斯班,是在澳大利亚证券交易所上市的一家在成立之初就定位于专门从事天然氢勘查开发的企业。截至2024年4月,该公司共拥有面积约 7.5×10^4 km² 的天然氢勘查许可区域,其中包括实施了两口天然氢专探井的 PEL 687 区块(面积约8 000 km²),另外7个区块的勘查申请正在由其全资子公司(White Hydrogen 和 Byrock Resources)进行审批。在 PEL 687 区块的天然氢资源勘查和钻探井位选址工作中,Gold Hydrogen 公司首先通过历史资料发现,1931年在约克半岛所钻的油气勘探井(Ramsay Oil Bore 1)中偶然钻获过高浓度(最高达84%)氢气异常。2023年3—4月,该公司联合 CSIRO 以及 Total Seismic、Xcalibur 等地球物理调查服务企业,在 PEL 687 区块开展了航空重磁调查和土壤气体调查^[43]。成因机制和成藏机理分析在该区块所处的 Cawler 克拉通发现了大量铁矿床和铀矿床,这些都可能为蛇纹石化和水辐射分解生氢创造有利条件,而进一步的分析显示新元古代和更古老地质时期形成的花岗岩套及变质沉积岩可能是该区域氢气生成的源岩^[44]。Gold Hydrogen 公司对已有地质和钻井资料的整理促进了该项目的实施进程,从开展航空重磁和土壤气体调查到开展钻探,再到完成第一阶段试井仅用了不到一年的时间,值得引起重视。

2.3 北京天成元能源有限公司

相比于全球天然氢产业现阶段的发展,我国以

天然氢勘查开发有利目标区圈定、“地物化遥钻”综合资源调查,以及资源量和储量评估为主要工作目标的中小型企业较少,2023 年成立的北京天成元能源有限公司是其中的典型代表。

北京天成元能源有限公司前身团队在相关企业的支持下,从 2021 年开始收集了国内外大量相关资料,开展了天然氢成藏机理与勘查的研究工作,并分析了我国 10 多个可能具备天然氢成藏条件的地区。通过对比研究,筛选确定了扬子克拉通西缘的楚雄盆地和华北克拉通北缘的商都—张北盆地作为探索试验区,创新研发了可高效率采集测量土壤中氢气的地球化学方法和装置,并已申报了国家专利^[45]。2024 年,该公司中标了由中央企业设立的国内首个天然氢勘查试验项目^[46]。

截至 2024 年 7 月,北京天成元能源有限公司已确定将楚雄盆地北部地区作为进一步重点工作区域,即大姚县—乌龙口一带,认为该区域具备天然氢成藏的有利地质条件,是最有可能发现天然氢气藏的地区之一,为国内天然氢调查选区提供了参考。同时,利用遥感数据在华北克拉通北缘商都—张北盆地圈定出了似“仙女圈”构造,并采用创新设计的气体收集密封装置采集了土壤气体,原位和实验室氢气测量表明该区域氢气浓度最高达到 $3\,750 \times 10^{-6}$ 。此外,该公司完成了国内首张土壤氢气浓度分布图,覆盖面积达 $1\,060\text{ km}^2$,结合采集样品的氢

同位素分析结果,推测氢气主要来自深部,而非浅地表生物成因。目前,该公司正在开展针对天然氢成藏构造地球物理勘查的创新应用试验,以进一步研究地球物理方法在寻找天然氢勘查开发有利目标区方面的作用。

3 对天然氢产业的展望及建议

3.1 产业发展展望

现有研究认为,天然氢具有与油气系统类似的“生储盖圈运保”特征,即深部因蛇纹石化及水的辐射分解等作用生成氢气的源岩、有利于含氢气体或流体运移的断层裂隙通道、圈闭构造,以及盖层下有利氢气聚集成藏的储集岩(图 2)^[2, 47-48]。因此,作为一种新型地质能源,天然氢产业的发展模式可参考美国页岩革命,即最初通过政府投资引导研究机构和企业的基础研究和技术创新,并在实现技术突破后通过优惠政策,促进中小型油气企业开展广泛的勘探开发实践^[49-50]。具体来说,自 20 世纪 70 年代开始,以美国能源部、美国矿业局等联邦机构为主导,美国政府围绕非常规油气研究持续投入,并相继配套颁布了有关财政补贴、税收减免、投资和融资激励,以及技术研发支持的法律政策(如 1980 年《原油暴利税法》、1990 年《税收分配的综合协调法案》、2005 年《国家节能政策法案》、2007 年

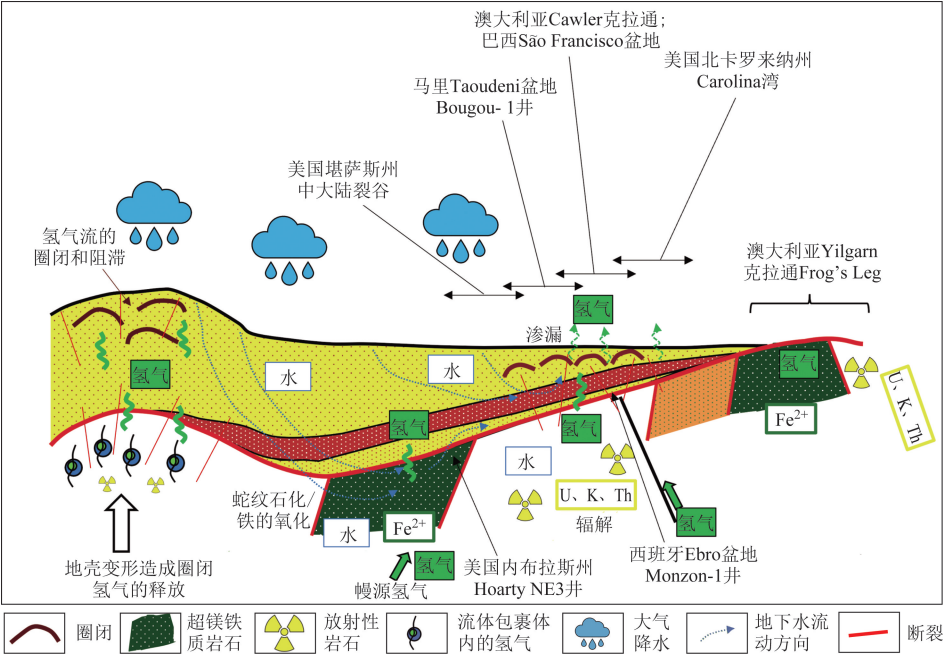


图 2 天然氢系统概念图^[33]

Fig. 2 Conceptual diagram of the natural hydrogen system^[33]

《能源独立和安全法案》、2009年《清洁能源与安全法案》),从而引领了美国天然气技术研究院(Gas Technology Institute, GTI Energy)等机构和 Mitchell Energy、Southwestern Energy、Chesapeake Energy 等中小型企业对水平井、分层压裂、分段压裂、工厂化体积压裂、微地震监测等关键技术的研发和推广应用^[51]。进入21世纪以来,经过规模化开发而产量加快增长的阶段后^[52-53],美国2022年的页岩油(致密油)和页岩气产量分别达到 3.7×10^8 t 和 $8\,066 \times 10^8$ m³,相比2021年分别增长了4.8%和5.6%,保障了该国的能源安全独立,重塑了世界油气供给格局^[49, 54]。

需要注意的是,与美国页岩油气产业“中小型企业致力于新区块的发现+大型企业致力于新区块的规模化开发+(中小型)专业技术企业提供标准化、精细化、定制化服务”的发展模式不同^[55],我国的页岩油气发展主要依赖于以中国石油、中国石化等为代表的大型国有企业^[56]。然而,由于天然氢的勘查有利区主要分布在裂谷发育区、蛇绿岩发育区和断裂发育的前寒武纪富铁地层,且其成因机制不同于油气,因此与现有油气产区的重叠可能较少^[1, 6, 57-59],这也为在天然氢产业发展初期,中小规模企业充分发挥在融资、专业化分工灵活合作等方面的优势创造了条件。

3.2 建议

尽管中国石化、中国石油、北京大学、中国矿业大学、中国地质调查局等机构和企业已陆续开始关注国际天然氢资源研究和勘查开发进展,并且部分项目已开始实验研究和野外调查,但与法国、澳大利亚、美国等国家相比仍有一定差距^[1-2, 5-7, 22-24, 26, 58, 60-61]。因此,在我国加快推动天然氢能源研究与勘查开发的背景下^[62-63],以自然资源部及其所属中国地质调查局、国家发展和改革委员会及其所属国家能源局为代表的相关政府职能机构应加强以下几方面的协调组织和引导,激励以科研机构、中小型企业、大型能源企业为主体的天然氢产业的发展。

(1)在领域进展分析研究方面,综合科学文献资料,围绕天然氢的成因机制和成藏机理研究、资源普查与详查情况、成藏系统“生储盖圈运保”特征研究等形成具有时效性、权威性的进展综述。

(2)在科学研究路线图编制方面,在全面了解领域进展的基础上,明确现有知识和技术装备等方面的差距,提出如何加强对天然氢能源地质、地球

化学和地球物理等特征认识的可行性和可靠发展路径,以便有关政府机构或组织针对具体问题确定合理的资金和政策支持策略。

(3)在技术方法展望与预测研究方面,跟踪资源勘查开发企业、技术服务企业等在天然氢勘查开发过程中围绕资源勘查、成藏系统研究、资源量和储量评估、生产(氢气、地热能多资源共采)等环节的实践,形成天然氢勘查开发技术指南。

(4)在政策研究方面,鉴于天然氢产业快速发展面临的监管体系不明确、不完善问题,在分析现有矿业能源法律的基础上,结合天然氢的资源特点,以及已将天然氢纳入其相关法律框架的国家的具体实践,形成天然氢开发利用的法律指南。

(5)在产业化研究方面,由于天然氢资源的勘查开发具有显著的不确定性和风险性,需要在借鉴矿业和油气行业投资模式的基础上,明确天然氢勘查开发项目整个生命周期内各阶段所需的投资规模和面临的相关风险,为政府与企业的投资选择提出建议。

4 结论

(1)文献计量与资讯分析表明,天然氢产业的发展还处于起步阶段,但相关研究机构、高校、中小企业的广泛参与可能预示着该产业即将进入快速发展阶段,这也对国家或区域地质调查机构的公益性基础地质调查和资源调查服务提出了新的需求。

(2)目前,以美国、法国、澳大利亚为代表的有关国家正在持续加强对天然氢能源的研究与勘查实践,在资源发现及资源潜力评价等方面取得了较大突破。我国在天然氢领域尚缺乏总体顶层设计,包括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,以及对相关探矿权、采矿权、税收抵免和补贴政策的研究等,因此难以充分发挥政府、能源和地质主管部门、能源矿产企业、高校、科研院所等的整体优势。

(3)我国应从政府层面加强对天然氢产业进展分析、科学研究路线图编制、技术方法展望与预测、政策研究、产业化研究等方面的协调组织和引导,激励以科研机构、中小型企业、大型能源企业为主体的天然氢产业的发展。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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]. 天然气地球科学,2024,35(6):1113-1122.
Wei Q Z,Zhu R K,Yang Z,et al. Geological characteristics, formation distribution and resource prospects of natural hydrogen reservoir[J]. Natural Gas Geoscience,2024,35(6):1113-1122.
- [3] Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review[J]. Earth - Science Reviews, 2020, 203: 103140.
- [4] 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.
- [5] 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 Q Y,Wu X Q,Meng Q Q,et al. Natural hydrogen: A potential carbon - free energy source[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(17):2344-2350.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] White & Case. French mining code reform: publication of new ordinances[EB/OL]. (2022-04-19) [2024-08-15]. <https://www.whitecase.com/insight-alert/french-mining-code-reform-publication-new-ordinances>.
- [9] U.S. Senate Committee on Energy and Natural Resources. Manchin questions witnesses on the potential of geologic hydrogen, criticizes administration's approach to hydrogen tax credits [EB/OL]. (2024-02-28) [2024-08-15]. <https://www.energy.senate.gov/2024/2/manchin-questions-witnesses-on-the-potential-of-geologic-hydrogen-criticizes-administration-s-approach-to-hydrogen-tax-credits>.
- [10] 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(1): 11876.
- [11] 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: 640-647.
- [12] 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.
- [13] Moretti I, Prinzhofer A, Françolin 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.
- [14] 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.
- [15] Arrouvel C, Prinzhofer A. Genesis of natural hydrogen: new insights from thermodynamic simulations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(36): 18780-18794.
- [16] Frery E, Langhi L, Maison 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.
- [17] 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.
- [18] Lefeuve N, Thomas E, Truche L, et al. Characterizing natural hydrogen occurrences in the Paris Basin from historical drilling records [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2024, 25 (5): e2024GC011501.
- [19] Mathur Y, Awosiji V, Mukerji T, et al. Soil geochemistry of hydrogen and other gases along the San Andreas fault [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 411-419.
- [20] 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.
- [21] Serratt H, Cupertino J A, Cruz M F, et al. Southern Brazil hydrogen systems review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 69: 347-357.
- [22] 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.
- [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 S B, Tang Z Y, Yang C L, et al. Genesis and energy significance of hydrogen in natural gas [J]. Natural Gas Geoscience, 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] Han S B, Xiang C H, Du X, et al. Geochemistry and origins of hydrogen – containing natural gases in deep Songliao Basin, China; Insights from continental scientific drilling [J]. Petroleum Science, 2024, 21(2): 741 – 751.
- [26] 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.
- [27] Advanced Research Projects Agency – Energy. U. S. Department of Energy announces \$ 20 million to 16 projects spearheading exploration of geologic hydrogen [EB/OL]. (2024 – 02 – 08) [2024 – 08 – 15]. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-20-million-16-projects-spearheading>.
- [28] Collins L. Australian company receives permit to drill for natural hydrogen in Kansas [EB/OL]. (2024 – 07 – 10) [2024 – 08 – 15]. <https://www.hydrogeninsight.com/production/australian-company-receives-permit-to-drill-for-natural-hydrogen-in-kansas/2-1-1675527>.
- [29] IEA. Global hydrogen Review 2023 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [30] 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 – 08 – 15]. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/usgs-colorado-school-mines-establish-joint-industry-program-explore>.
- [31] Ball P J, Czado K. Natural hydrogen: The race to discovery and concept demonstration [EB/OL]. (2024 – 02 – 28) [2024 – 08 – 15]. <https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-race-to-discovery-and-concept-demonstration/>.
- [32] Hay C. HyTerra boosts white hydrogen ambitions with major expansion at Nemaha project in Kansas [EB/OL]. (2024 – 05 – 23) [2024 – 08 – 15]. <https://smallcaps.com.au/hyterra-boosts-white-hydrogen-expansion-nemaha-project-kansas/>.
- [33] Halliburton. A strategic search for subsurface hydrogen and the nature of hydrogen [EB/OL]. (2024 – 03) [2024 – 08 – 15]. <https://www.halliburton.com/en/resources/a-strategic-search-for-subsurface-hydrogen-and-the-nature-of-hydrogen-systems>.
- [34] Lhote O, Mertens J, Rosanne M, et al. Is natural hydrogen of the “fairy circles” the new eldorado? [EB/OL]. (2021 – 09 – 20) [2024 – 08 – 15]. <https://innovation.engie.com/en/articles/detail/is-natural-hydrogen-the-new-eldorado/26061/1/3>.
- [35] World Economic Forum. White hydrogen can be a game-changer in Colombia’s green transition. Here’s why [EB/OL]. (2024 – 01 – 16) [2024 – 08 – 15]. <https://www.weforum.org/agenda/2024/01/white-hydrogen-and-its-role-within-the-energy-transition/>.
- [36] 苏宇通, 金之钧, 刘润超, 等. 非洲马里气田天然氢气井勘探案例介绍及全球天然氢气勘探进展 [J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1502 – 1510.
- Su Y T, Jin Z J, Liu R C, et al. Natural hydrogen exploration: A case study of hydrogen wells in the Mali gas field in Africa and global advances [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1502 – 1510.
- [37] Briere D, Jerzykiewicz T. On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali) [C]//International Conference and Exhibition. Barcelona: AAPG, 2016.
- [38] Gold Hydrogen. Very high concentrations of hydrogen found at Ramsay 2 [EB/OL]. (2023 – 12 – 19) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/asx-releases/very-high-concentrations-of-hydrogen-found-at-ramsay-2/>.
- [39] Gold Hydrogen. Half-Year financial report [EB/OL]. (2023 – 12 – 31) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/2024.03.13-Half-Year-Financial-Statements.pdf>.
- [40] Gold Hydrogen. Quarterly activities report for the period ended 31 March 2024 [EB/OL]. (2024 – 04 – 24) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/2024.04.24-ASX-Announcement-Combined-Quarterly-Reports.pdf>.
- [41] Gold Hydrogen. Interim Exploration well testing update [EB/OL]. (2024 – 05 – 27) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/2024.05.27-ASX-Announcement-Exploration-Well-Testing-Interim-Update.pdf>.
- [42] Gold Hydrogen. Exploration well testing interim update [EB/OL]. (2024 – 05 – 27) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/asx-releases/exploration-well-testing-interim-update-2/>.
- [43] Gold Hydrogen. Yorke Peninsula natural hydrogen exploration: low impact on – road geophysical activities; environmental impact report [EB/OL]. (2024 – 04) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/docs/GHY-On-road-Seismic-EIR-April24-Rev2.pdf>.
- [44] Gold Hydrogen. Yorke Peninsula natural hydrogen exploration: drilling and well testing; Environmental impact report [EB/OL]. (2023 – 08) [2024 – 08 – 15]. <https://www.goldhydrogen.com.au/wp/wp-content/uploads/GHY-Drilling-EIR-Rev2.pdf>.
- [45] 北京天成元能源有限公司. 一种寻找地下天然氢气的土壤气体地球化学方法: 中国, CN118425422A [P]. 2024 – 08 – 02.
- Beijing Tianchengyuan Energy Company Limited. Soil gas geochemical method for searching underground natural hydrogen: China, CN118425422A [P]. 2024 – 08 – 02.

- [46] 中国招标投标公共服务平台. 天然氢气藏勘查中重力和大地电磁方法创新应用研究项目中标结果公告 [EB/OL]. (2024-05-11) [2024-08-15]. <https://bulletin.cebpubservice.com/resultBulletin/2024-05-11/12760504.html#>. China Tendering and Bidding Public Service Platform. Announcement of the winning bid for the innovative application research project of gravity and magnetotelluric methods in natural hydrogen reservoir exploration [EB/OL]. (2024-05-11) [2024-08-15]. <https://bulletin.cebpubservice.com/resultBulletin/2024-05-11/12760504.html#>.
- [47] Baciuc C, Etiope G. A direct observation of a hydrogen-rich pressurized reservoir within an ophiolite (Tișoavița, Romania) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 73: 402-406.
- [48] 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]. BSGF-Earth Sciences Bulletin, 2023, 194: 9.
- [49] 李小刚, 张博宁, 陈更生, 等. 基于生命周期理论的美国页岩气产业发展启示 [J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 81-89.
Li X G, Zhang B N, Chen G S, et al. Enlightenment from the USA's shale gas industry development based on the life cycle theory [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 81-89.
- [50] 张君峰, 周志, 宋腾, 等. 中美页岩气勘探开发历程、地质特征和开发利用条件对比及启示 [J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1687-1701.
Zhang J F, Zhou Z, Song T, et al. Comparison of exploration and development history, geological characteristics and exploitation conditions of shale gas in China and the United States and its enlightenment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1687-1701.
- [51] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 非常规油气地质学理论技术及实践 [J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2376-2397.
Zou C N, Yang Z, Zhang G S, et al. Theory, technology and practice of unconventional petroleum geology [J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2376-2397.
- [52] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议 [J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675-1686.
Zou C N, Zhu R K, Dong D Z, et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1675-1686.
- [53] 邹才能, 林敏捷, 马锋, 等. 碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 418-435.
Zou C N, Lin M J, Ma F, et al. Development, challenges and strategies of natural gas industry under carbon neutral target in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 418-435.
- [54] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(6): 695-706.
Jia C Z, Jiang L, Zhao W. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(6): 695-706.
- [55] 董康银, 孙仁金, 李慧, 等. 社会资本参与页岩气开发现状及对策 [J]. 天然气与石油, 2015, 33(6): 100-104, 14.
Dong K Y, Sun R J, Li H, et al. Present situation and countermeasures of social capital investment in shale gas development in China [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(6): 100-104, 14.
- [56] 宋昊, 胡明毅, 王再兴, 等. 国外页岩气开发实践及对我国产业化发展的建议 [J]. 现代化工, 2022, 42(9): 18-22.
Song H, Hu M Y, Wang Z X, et al. Global shale gas development practice and suggestions for China in promoting shale gas industrialization [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(9): 18-22.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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 L D, Feng Z H, Jiang H, 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 国家自然科学基金委员会. 关于发布地球宜居性的深部驱动机制重大研究计划 2024 年度项目指南的通告 [EB/OL]. (2024-04-12) [2024-08-15]. <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1342/info92381.htm>. National Natural Science Foundation of China. Notice on the release of the 2024 project guidelines for the major research program on deep driving mechanisms of Earth habitability [EB/OL]. (2024-04-12) [2024-08-15]. <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1342/info92381.htm>.
- [63] 孟凡洋. 业内专家把脉全国天然氢资源调查评价工作 [EB/OL]. (2024-05-27) [2024-08-15]. https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/202405/t0240527_761965.html. Meng F Y. Industry experts take the pulse of national natural hydrogen resource survey and evaluation [EB/OL]. (2024-05-27) [2024-08-15]. https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/202405/t0240527_761965.html.

Analysis and prospect of natural hydrogen industry development

ZHANG Wei^{1,2}, WANG Haihua^{1,2}, FANG Daren^{1,2}

(1. *Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *National Geological Library of China, Beijing 100083, China*)

Abstract: 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. Based on the results of scientific and technological literatures and industry information surveys, the authors in this paper have analyzed and studied the participating institutions and their development status of the natural hydrogen industry. The small and medium – sized enterprises with resource exploration and their development as their main goal, and which may play a key role in the development of the natural hydrogen industry were focused as the study objects, and the important progress made by three representative small and medium – sized enterprises at home and abroad in the process of natural hydrogen resource exploration and development was summarized in detail, based on the successful experience of the US shale revolution. In the context of accelerating the research, exploration and development of natural hydrogen resources in China, relevant functional government agencies represented by the Ministry of Natural Resources and its affiliated China Geological Survey, the National Development and Reform Commission and its affiliated National Energy Administration should strengthen the progress analysis of the natural hydrogen industry, scientific research roadmap preparation, technical method prospect and forecast research, policy research, industrialization research, etc., to encourage the development of the natural hydrogen industry with scientific research institutions, small and medium – sized enterprises, and large mining and energy enterprises as the main body. This research could provide references for accelerating the deployment of the natural hydrogen industry in China.

Keywords: geological hydrogen; clean energy; small and medium – sized enterprises; US shale revolution; industrialization

(责任编辑: 魏昊明)