

doi: 10.12097/gbc.2024.02.013

国外白氢勘查进展及对中国的启示

吴珍珠¹, 张万益^{1*}, 王丰翔², 黄宽², 史淳元²

WU Zhenzhu¹, ZHANG Wanyi^{1*}, WANG Fengxiang², HUANG Kuan², SHI Chunyuan²

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031

1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要: 氢能被认为是清洁能源的天花板, 在能源领域将发挥越来越重要的作用。现阶段, 氢能仅被视为一种二次能源, 不具备大规模、稳定开发的特点, 而且绝大多数氢能制备来自化石能源, 排放大量温室气体, 与清洁能源的目的相背离。由于过度依赖化石能源带来的环境问题日益突出, 对地质氢 (白氢) 的研究得到了越来越多的重视。随着研究的深入, 目前世界范围内已有百余处高含量 (>10%) 白氢报道, 尤其是法国东北部洛林盆地白氢矿床的发现, 据估算, 该矿床氢气资源量在 $6 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^8$ t 之间。白氢被认为是应对气候危机的关键能源。基于前人的大量研究, 介绍了氢能来源分类, 对比分析了白氢与工艺制氢相比, 具有环保零碳、生产成本极低、可再生三大天然优势。依据国际上白氢的研究进展, 分析认为地球拥有一套完备的产氢机制。相关研究表明, 高含量白氢广泛分布在裂谷、板块俯冲带、前寒武纪结晶基底等区域, 白氢的资源前景和应用前景广阔, 美欧等国家正加紧布局白氢勘查。中国也具备白氢矿床发育的地质条件, 然而与欧美等国家相比, 中国白氢研究工作有待提升, 基于此, 对中国白氢地质工作提出 3 点建议: 启动松辽盆地和柴达木盆地白氢调查试点, 加强综合研究和理论技术研发, 建设高素质的白氢人才队伍。

关键词: 清洁能源; 氢能; 白氢; 松辽盆地; 柴达木盆地; 矿产勘查工程

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)08-1395-11

Wu Z Z, Zhang W Y, Wang F X, Huang K, Shi C Y. The development of overseas exploration of white hydrogen and implications for China. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1395-1405

Abstract: Hydrogen energy is considered to be the cleanest energy and will play an increasingly important role in the future energy field. At present, it is only regarded as a secondary energy and does not have the characteristics of large scale and stability. Besides, most hydrogen energies are produced from fossil energies, which emit a lot of greenhouse gases. Because the environment problems caused by excessive dependence on fossil energies, it has become much important to study geological hydrogen (known as "white or native hydrogen"). With the deepening of research, hundreds of white hydrogen discoveries with high content have been reported worldwide, especially, the discovery in the Lorrain Basin, France. It is estimated that the resource is about ranging 6 million to 250 million tons. White hydrogen has regarded as the key energy to combat the climate crisis. Based on the previous studies, the hydrogen color spectrum is introduced. Compared with hydrogen produced by other routes, white hydrogen has three natural advantages of zero carbon, very low production cost and renewable. According to the progress of international exploration for white hydrogen, it is concluded that the Earth has a complete hydrogen production mechanism. Relevant studies have shown that white hydrogen with high content is widely distributed in rifts, plate subduction zones, and Precambrian crystalline basement. Both the resource and application prospects of white hydrogen are broad and the United States and Europe and other countries are stepping up the layout of white

收稿日期: 2024-02-13; 修订日期: 2024-05-07

资助项目: 中国地质调查局项目《自然资源管理与现代地质工作战略研究》(编号: DD20230558)

作者简介: 吴珍珠(1992-), 女, 博士, 助理研究员, 从事前寒武纪地质、地幔橄榄岩和地质调查战略研究工作。E-mail: wzzdwyyx@163.com

* 通信作者: 张万益(1974-), 男, 博士, 教授级高工, 从事地球系统科学与地质调查规划研究、基础地质研究和地质找矿工作。E-mail: wanyizhang0810@qq.com

hydrogen exploration. According to the previous research, China also has the geological conditions for the white hydrogen. However, compared with other countries, the research work on white hydrogen needs to be improved. Based on this, three suggestions are put forward for white hydrogen work in China, which are launching white hydrogen investigation pilot projects in Songliao Basin and Qaidam Basin, strengthening comprehensive research and theoretical technology research and development of white hydrogen and also building a high-quality white hydrogen talent team.

Key words: clean energy; hydrogen energy; white hydrogen; Songliao Basin; Qaidam Basin; mineral exploration engineering

随着人类活动加剧,近年来,全球极端天气频发,迫切需要管理和减少环境中的温室气体排放。为了应对气候危机,世界各国正聚焦清洁能源的发展与规划(梁亚滨, 2022; 屠新泉等, 2024)。氢气因其来源广泛、清洁无污染、能量转化率高等优点被认为是石油、天然气等化石燃料的有效替代品,有望在能源转型中发挥核心作用(万燕鸣, 2020)。据统计,世界范围内已有 20 多个国家和地区发布了氢能发展战略或路线图,如美国、澳大利亚、德国、加拿大、韩国等国家(Milani et al., 2020; Ren et al., 2020; Moon et al., 2021; Stangarone, 2021; Trencher et al., 2021)。然而,目前 96% 的氢能需要通过化石能源制备,该过程会产生大量温室气体,违背了作为清洁能源的目的;利用电解和热解水制备氢气虽对环境较友好,但是存在技术不成熟、价格昂贵等缺点(万燕鸣, 2020)。

传统观点认为,自然界不存在天然氢大规模成藏或可被大量开采利用,天然氢一直未受到重视。随着研究的深入,学者们逐渐发现天然氢分布广泛,既可以从地表渗漏逃逸,也可以在地下积聚成藏(Maiga et al., 2023)。目前粗略估计,每年从地表逸出到大气中的白氢达 2×10^7 t(Osselin et al., 2022),据美国地质调查局地质学家估算,全球可能有数百亿吨的白氢(Ellis, 2023)。目前全球每年生产约 1×10^8 t 氢气,而地球“氢工厂”模型计算出地球上可采白氢储量足以满足数百年的全球氢需求(Bulletin, 2021; Hand, 2023a)。国际能源署的净零排放目标,

到 2050 年全球将消耗 1.7×10^4 TWh 的氢基能源,相当于中国和美国 2020 年生产的电力总和(Osselin et al., 2022)。虽然全球正在实施数百个绿氢项目,但远远达不到国际能源署规定的氢能需求量,寻找白氢是满足未来对氢需求的重要途径(魏琪钊等, 2024)。目前,美国、法国、澳大利亚等国家高度重视白氢勘查开发等工作,相继从理论研究、法律、资金、技术等层面进行支持。本文通过广泛调研国内外相关资料,系统梳理了氢能来源分类、白氢的形成机制与分布,以及国外勘查进展,从地质学角度提出中国白氢勘查的建议和思考。

1 氢能来源分类

氢(H)虽然是宇宙中最丰富的元素,但它在地球上主要以化合物的形式存在,目前商业氢气都需要通过制氢技术获得。按照生产过程中碳排放由多到少的顺序,氢气被冠以不同的“颜色”,如棕氢、灰氢、蓝氢、绿氢、粉氢、白(金)氢等。已经实现工业化制备的主要有棕氢、灰氢、蓝氢和绿氢。除白氢外,其余“颜色”的氢制备几乎都需要消耗大量能源,对环境造成污染,如棕氢、灰氢和蓝氢,或者制备成本高昂,如绿氢、粉氢(表 1)。按照氢气的生产方式,以上几种“颜色”的氢又可分为三大类。

1.1 由化石能源加工制备氢

(1)棕氢。由煤炭气化产生。该过程产生大量碳排放,每生产 1 kg 氢气,约产生 20 kg 二氧化碳,是对环境损害最大的氢生产类型,由于天然气价格

表 1 不同颜色氢气生产效能对比

Table 1 Comparison of efficiency for hydrogen in different colors

制氢技术	氢类型	单位成本/(美元·kg ⁻¹)	二氧化碳排放量/(kg·kg ⁻¹)	资料来源
化石能源加工制备	棕氢	1.2~2	20	Arcos et al., 2023
	灰氢	0.67~1.31	8.5	Arcos et al., 2023
	蓝氢	0.99~2.05	1~2.4	Yu et al., 2021
电解和热解水制备	绿氢	2.28~7.39	0	Yu et al., 2021
	粉氢	2.18~5.65	0	
地球内部天然形成	白氢	1	0	Paddison, 2023

注:二氧化碳排放只考虑燃烧和化学转化

高及煤炭储量大, 中国利用煤炭气化生产了大量棕氢(Bartlett et al., 2020; Ji et al., 2021)。

(2) 灰氢。是天然气(含有甲烷等碳氢化合物)在催化剂(通常是镍)的作用下, 使用高温蒸汽(700~1000 °C, 14~20 atm)进行热化学反应, 该过程中产生氢气、一氧化碳和二氧化碳。随后发生水煤气变换反应, 其中一氧化碳和蒸汽反应生成二氧化碳和另外的氢气。因该流程的技术和成本都较低, 灰氢成为目前市面上氢的主要来源, 约占全球产量的 95%(Kuehn, 2023)。每生产 1 kg 灰氢, 平均排放 8.5 kg 左右的二氧化碳(Arcos et al., 2023)。

(3) 蓝氢。与灰氢具有相同的生产方式, 区别在于蓝氢会在制备过程中使用碳捕捉、利用、储存等技术, 将碳排放进行捕获和储存。然而, 在制备过程中产生的温室气体不只有二氧化碳, 还有未燃烧的甲烷, 并且碳捕捉技术无法防止大量逃逸性甲烷的释放, 因此蓝氢的温室气体排放总量依然很高(Bartlett et al., 2020; Howarth et al., 2021; Bauer et al., 2022)。

1.2 利用电解和热解水制备氢

(1) 绿氢。利用可再生能源发电进行电解水制氢, 从源头上实现了二氧化碳零排放(Brandon et al., 2021)。在众多氢的生产方式中, 虽然绿氢是目前最有前景的绿色燃料, 但是生产绿氢的成本几乎高于所有其他颜色类型的氢气(Dutta, 2018; Jovan et al., 2020)。尽管随着各国对绿氢基础设施的投资与开发, 绿氢的生产门槛会逐步降低, 但仍需要相当一段时间才能达到规模化生产(Scita et al., 2020; Kazi et al., 2021)。

(2) 粉氢。是将核反应堆与先进制氢工艺耦合生产得到的氢气。核能制氢可分为核电制氢、核热制氢和电热混合制氢 3 种(Mendrela et al., 2024)。虽然核能制氢具有广阔的发展前景, 但要实现商业化还面临诸多挑战, 例如: ①经济性尚待验证, 成本是核能制氢能否实现大规模商业利用的关键因素, 粉氢比绿氢(风电或光伏制氢)更昂贵; ②能高效率制氢的高温气冷堆技术还不成熟; ③安全性也是制约核能制氢的一大因素。

1.3 地球内部形成的天然氢

即白氢, 指天然产生的氢气, 也被称为“天然氢”、“金氢”或者“地质氢”(简称白氢)。关于白氢的形成机制, 尚未形成定论, 前人提出了蛇纹岩水岩反应、辐射水分解、岩浆脱气、地幔脱气、有机物分解

等成因(Zgonnik, 2020)。与其他“颜色”氢气相比, 白氢主要有环保零碳、生产成本极低(据非洲马里油井计算, 生产成本每千克 1 美元, 而绿氢的成本约为每千克 6 美元)(Paddison, 2023)、可再生三大天然优势。

2 白氢的形成机制与分布

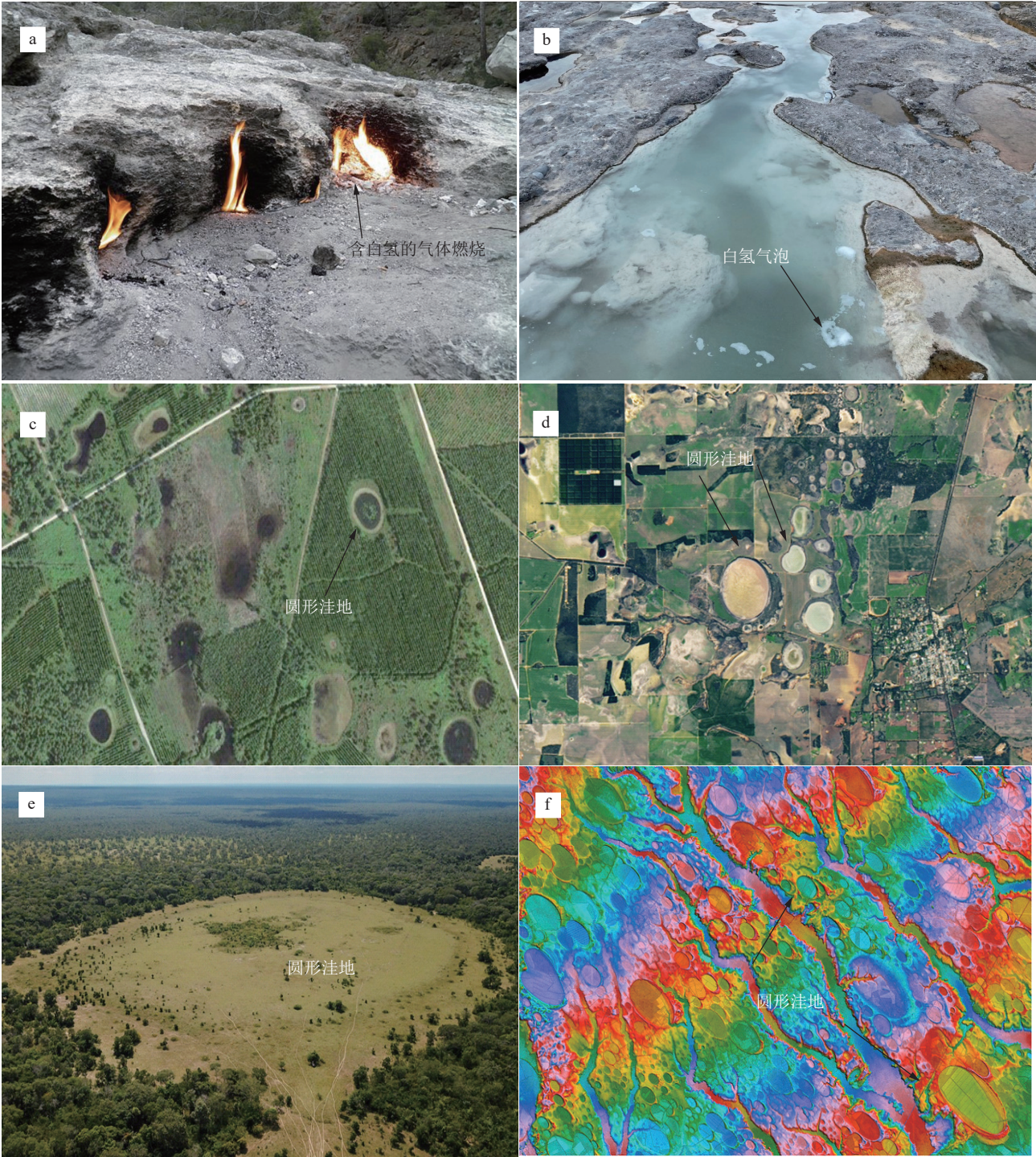
随着 21 世纪初俄罗斯发现了第一个白氢矿床, 以及加拿大海德罗马公司(Hydroma)第一次在西非马里利用白氢发电, 白氢越发受到各界的重视(田黔宁等, 2022)。全球已发现数百处白氢矿点、矿床, 包括澳大利亚、马里、俄罗斯、美国、东欧、阿曼、法国等国家和地区(Zgonnik, 2020)(图版 I; 表 2)。随着对白氢成藏机理研究的深入, 越来越多的地质学家逐渐意识到地球深部是一个巨大的、被严重低估的“氢工厂”(Hand, 2023a)(图 1)。

白氢来源于自然的地质和化学作用, 是一种天然的清洁能源。目前被普遍接受的产氢机制主要有 3 种: ①水的辐射分解。地壳深层含有大量 U、Th 等放射性元素, 这些元素放射性衰变时, 其能量将水分子分解形成氢气。②水岩反应(主要指蛇纹石化作用)。水与富铁岩石(例如橄榄岩)反应, 岩石中的亚铁被氧化后将水中的氢离子还原生成氢气(Hand, 2023a)。该种方式可能是主要的大规模成氢机制, 据估计仅在洋中脊上的蛇纹石化作用每年产生的氢气可达 100~200 t(Worman et al., 2016; Osselin et al., 2022)。在现今世界上规模最大、地表出露最好的阿曼塞迈尔蛇绿岩区更是肉眼可见白氢从泉水中冒出(图版 I)。③深源脱气。该理论认为, 白氢来自于地球深部并沿着板块边界和断层上升聚集成藏。高含量白氢广泛分布在裂谷、板块俯冲带、前寒武纪结晶基底等区域(Zgonnik, 2020)。其中, 大陆裂谷系地区是目前已知高含量氢气的主要分布区, 如北美裂谷系 Scott 井, 氢气含量高达 50%(Goebel et al., 1983), 后期在该区域又发现了含量高达 90% 的氢气(Guélard et al., 2017), 同样在位于大陆裂谷系上的冰岛亨吉德山地区的氢气钻孔中检测到 37% 的白氢(Marty et al., 1991)。

3 国外白氢勘查进展

全球气候变化要求能源转型, 氢能作为一种清洁、高效的能源, 日益受到各国的关注, 白氢的勘探和开发愈发受到各国重视。

图版 I Plate I



a. 土耳其卡迈拉山上含白氢的混合气体燃烧, 该混合气体氢气含量为 7.6% ~ 11.3% (Zgonnik, 2020; Nitz, 2023); b. 阿曼塞迈尔蛇绿岩区泉水中的白氢气泡 (图片来自 Energy.gov.); c. 白氢从地下逃逸至地表形成的圆形洼地卫星图 (法国) (Messad, 2023); d. 澳大利亚北珀斯盆地白氢泄露形成的圆形洼地卫星图 (Peacock, 2023); e. 巴西圣弗朗西斯盆地一个巨大的白氢逃逸形成的圆形洼地 (Hand, 2023a); f. 美国北卡罗来纳沿海的氢气渗透形成的圆形洼地激光雷达图 (Hand, 2023a)

3.1 美国白氢勘查形成了政府主导、企业参加的积极局面
2013 年美国地质调查局和科罗拉多矿业学院创

建了专门研究白氢的联盟, 吸引了诸多主要能源公司及初创公司加入该联盟, 例如初创公司科洛马 (Koloma), 以及壳牌、英国石油、雪佛龙等主要能源

表 2 国外代表性及中国高含量白氢

Table 2 Representative white hydrogen locations of different countries

国家	地标/地点	氢气含量/%	发现时间(年)	资料来源
澳大利亚	Penneshaw	68.6	1933	Ward, 1933
	Coonanna	15.7~16.5	1934	Woolnough, 1934
	Mungyer	17.4	1934	Woolnough, 1934
	Robe	25.4	1934	Woolnough, 1934
	Minlaton	84	1934	Woolnough, 1934
	Ramsay 1 well	73.3	2023	Collins, 2023
美国	Washtenaw	26	1935	Newcombe, 1935
	Hofmann #3	高达96.3	1987	Moore et al., 1987
	Augustine	51.5	2003	Symonds et al., 2003
	Heins well	高达80	2011	Vacquand, 2011
	Barnes Spring	34~39.2	2013	Morrill et al., 2013
	Camp Spring	50.9	2013	Morrill et al., 2013
	Scott well	高达56	1983	Zgonnik, 2020
	Sue Duroche2 well	高达91.8	2017	Guélard et al., 2017
俄罗斯	Solikamsk	34.6	1958	Savchenko, 1958
	Pechora basin	76~81	1971	Zgonnik, 2020
	Krasnoyarskoe	37.8~98.7	1978	Zgonnik, 2020
	Severnaya	24.2~86.6	1981	Zgonnik, 2020
	Kola superdeep	93.8	1990	Zgonnik, 2020
	Lovozero	35.2	2004	Potter et al., 2004
	Uglovsky	21.2~27	2010	Zgonnik, 2020
法国	Wittelsheim	>50	1981	Zgonnik, 2020
	Les Tiogaux	14.1	1990	Zgonnik, 2020
	Lorrain Basin	>20	2023	Hand, 2023a
德国	Eristgal	22.1	1936	Zgonnik, 2020
	Burbach	24.6	1936	Zgonnik, 2020
	Stassfurt	82.3~93	1936	Zgonnik, 2020
	Muhlhausen	61.5	1984	Angino et al., 1984
加拿大	Rabbit Lake	高达21	1988	Dubessy et al.,1988
	Timmins	高达12.7	1988	Dubessy et al.,1988
	Cluff Lake	高达19	1988	Dubessy et al.,1988
	Strange Lake	高达35	1997	Salvi et al., 1997
	Sudbury	高达57.8	2014	Lollar, 2014
日本	Iwo Jima	18	1971	Zgonnik, 2020
	Mihara	72~90.2	1982	
	Showashinzan	25	1983	
	Arima	51.4	1983	
马里	Bourakebougou	98	2016	Briere et al., 2016
阿曼	Hawasina	85.9	2011	Vacquand, 2011
	Barrage	75.2	2011	
	Magniyat	87.3	2011	
	Bahla	97	2011	
	Nizwa	99	2011	
中国	松辽盆地SK2井	高达26.89	2022	Han et al., 2022
	渤海湾东营凹陷	高达22.8	2002	金之钧等, 2002
	楚雄盆地盐丰凹陷	18.33~43.79	2002	李秀梅, 2002
	柴达木盆地三湖地区SN2井	高达99	2010	Shuai et al., 2010
	川东黔中隆起	高达15.24	2012	余川, 2012
	黔北正页1井	24.70~36.98	2017	秦川等, 2017
	渤海湾即墨	13	2020	Hao et al., 2020

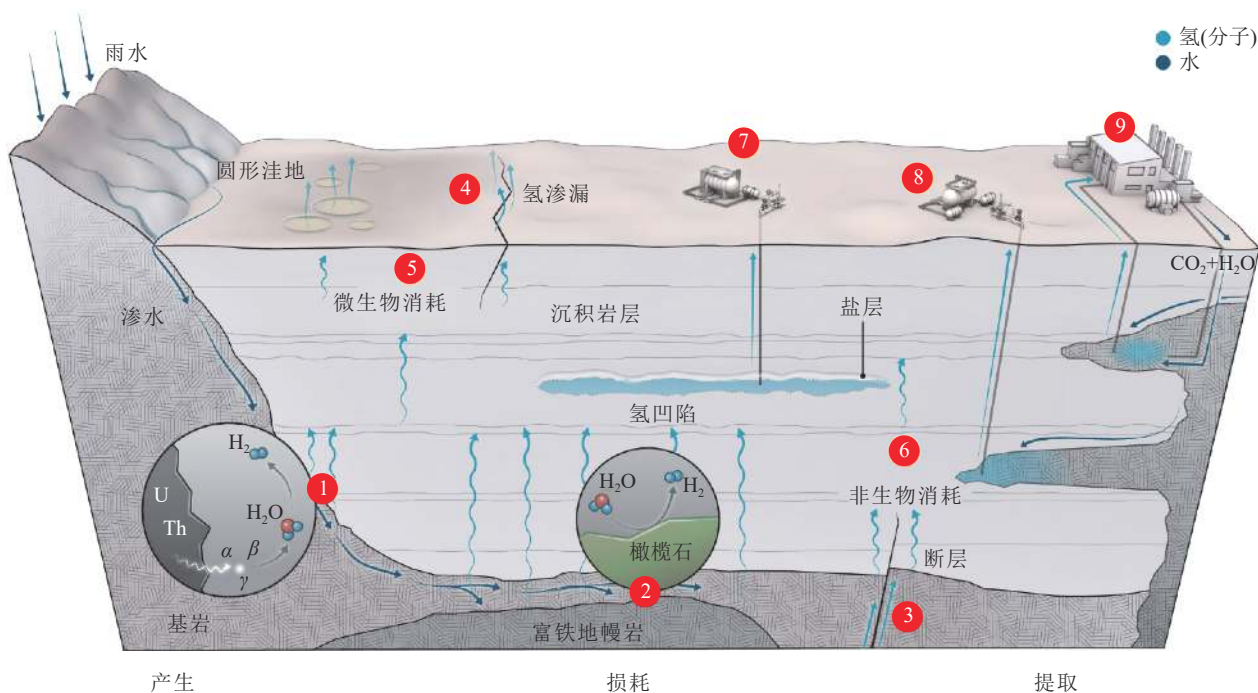


图1 地球的“氢工厂”模型图(据 Hand, 2023 修改)

Fig. 1 Earth's hydrogen factories

①—水的辐解; ②—蛇纹石化; ③—深渊脱气; ④—渗漏; ⑤—微生物消耗; ⑥—非生物消耗; ⑦—凹陷成藏; ⑧—直接收集; ⑨—注水产氢

公司。科洛马公司将该联盟定位为白氢勘探领域的数据和技术领导者。此外,美国能源部也通过直接提供资金、推动国际合作等方式支持白氢行业的发展。2023年9月初,美国能源部下属高级能源研究计划署宣布,将提供2000万美元用于研究白氢开采技术(Hand, 2023b)。同年9月24日,美国能源部与阿曼能源和资源部召开了美国-阿曼白氢技术研讨会,以此促进两国在该主题上建立新的决策、商业和学术伙伴关系,并就阿曼勘探和生产白氢签署了谅解备忘录,破解白氢发展面临的各种难题。2024年2月28日,美国参议院能源和自然资源委员会围绕白氢举行了国会听证会,并一致赞成在美国开发白氢。

3.2 法国发现世界上最大的氢气矿床

2023年5月,在法国东北部洛林盆地矿区的地下发现了大型白氢矿床。据估算,氢气资源量为 $6 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^8$ t,是人类有史以来发现最大的白氢矿床之一。随着深度增加,浓度不断增加,深度1100 m处氢气浓度高达14%,深度达到1250 m,其浓度达到20%。该矿床的发现立即引起了能源领域的极大关注。2023年12月13日,法国总统表示,将提供大量的资金支持探索法国白氢的潜力(Collins, 2023)。目

前法国也已开放勘探许可申请,推进国内白氢勘探开发工作。

3.3 澳大利亚百年之后再启航,力争走在白氢勘查国际前沿

澳大利亚白氢发现史已有100多年,是世界上发现白氢历史最久的国家,近年来也在快速推进,在白氢的勘探开发利用方面取得了实质性进展。2023年10月31日,金氢公司在南澳大利亚实施第一口白氢钻井,井中发现了浓度高达73.3%的白氢,并且计划实施第二口井的钻探工作。此外,澳大利亚也通过修改政策法规允许勘探,2021年2月南澳大利亚将氢气纳入《2000年石油和地热能法案》的“受管制物质”范围,授权白氢勘探许可,至今已颁发了40多个勘探白氢矿床的许可证。在白氢的科学研究方面,西澳大利亚地质调查局在奥非色(Officer)盆地和阿马度斯(Amadeus)盆地开展了富氢和氦气资源潜力评价。科廷大学研发了直接氢/氦指示剂(DHHI),已在奥非色盆地得到应用。伊迪斯科文大学在西澳大利亚伊尔冈(Yilgarn)克拉通开展了白氢渗漏区分布特征的调查研究,澳大利亚于2021年和2022年分别举办了2期线上白氢全球峰会。2023年11月,在珀斯首次线下举办了天然氢气全球峰会,会议吸引

了全球 30 多个国家 300 余名专家学者参会,极大地促进了白氢这一新兴能源工作的不断推进。

此外,德国将目光瞄准西非,认为西非的白氢很有前景,早在 2019 年就投资了 3000 万欧元在西非开启调查(窦立荣等, 2024)。芬兰地质调查局于 2024 年设立了多学科氢小组,启动岩石储氢地质调查和白氢研究。西班牙、韩国等也都先后布局了白氢开发项目(表 3)。可以说,2023 年,白氢已从科学边缘走到世界清洁能源舞台的中央。

4 对中国白氢地质工作的建议

虽然对白氢的认识还处于初级阶段,但国外已经认识到白氢的重要性。相比之下,中国虽有白氢

的发现记录,但无论是政府层面还是科学家层面,均未引起重视。建议借鉴国际经验,中国应尽快开展白氢调查和相关研究工作,早日构建中国新型能源体系,缩短与国际差距。

(1)启动松辽盆地和柴达木盆地白氢调查试点
位于松辽盆地徐家围子凹陷的大陆科学钻松科 2 井,在登娄库组、营城组等地层中明显检测到了氢气异常,根据实验测试结果,6460~6490 m 深度样品中氢气含量高达 27%(Han et al., 2022)。位于长春附近的松科 3 井中,同样发现了氢气。现有资料显示,松辽盆地不同地区的钻井中都有氢气发现。齐齐哈尔南—长春一线(长约 350 km),氢气含量超过 10% 的钻井 10 余口,表明松辽盆地含氢气范围大,

表 3 国外代表性白氢项目

Table 3 Representative project for white hydrogen in overseas

项目发起国家	项目负责方	情况介绍	资料来源
美国	美国NH2E公司	2019年在堪萨斯州开钻了美国第一口天然氢,现阶段已计划开展新的钻探工作	Hand, 2023a
	能源部	2023年9月初宣布将拨款 2×10^7 美元用于白氢开采技术研究,月底与阿曼能源和资源部就阿曼勘探和生产白氢签署了谅解备忘录	Enery. gov., 2023
	澳大利亚HyTerra公司	2023年计划在美国内布拉斯加州日内瓦开发世界第一口商业化白氢井,现阶段钻探工作已启动	Evans, 2023
澳大利亚	澳大利亚Gold Hydrogen公司	2021年评估了南澳袋鼠岛和约克半岛白氢资源量达 130×10^4 t, 2023年在南澳首口探井又发现浓度高达73.3%的白氢	窦立荣等, 2024
法国	法国45-8能源公司	2021年确定了整个欧洲各种白氢高潜力区域, 2023年发布首次试采计划,目前已向多个欧洲国家提交白氢勘查许可证	45-8 Energy, 2023; 田黔宁等, 2022
	法国国家科学研究中心	2023年在法国洛林废弃矿山发现天然氢矿床,预计白氢储量 $6 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^8$ t	Paddison, 2023
	法国政府	2023年法国总统明确表示将提供大量的资金支持探索法国白氢的潜力	Collins, 2023
加拿大	自然资源部	2023年实施为期2年的本国氢资源量评估工作	Dove, 2023
	加拿大Chapman Hydrogen and Petroleum Engineering公司	2024年夏天将在Ontario进行白氢钻井工作	Bakx, 2024
德国	联邦教育与研究部	2019年投资 3×10^7 欧元在西非调查白氢资源潜力	窦立荣等, 2024
西班牙	美国Ascent Hydrogen Funds公司	2020 年, 与西班牙Helios Aragón公司签署勘探协议,研究西班牙阿拉贡地区的高含量白氢异常	Ascent Funds, 2020
	西班牙Helios Aragón公司	2023年4月在西班牙北部比利牛斯山脉山麓发现一个储量超过 1×10^6 t的氢气储层,计划在2024年钻探, 2028年商业化生产	Parkes, 2023
西洲马里	加拿大Hydroma公司	2011年在Bourakebougou建成全球首个商业化白氢发电站,目前已累计在该区完钻25口井,发现5个氢气储层	窦立荣等, 2024
韩国	韩国国家石油公司	2023年宣布已在韩国5个潜力地点发现了白氢	Collins, 2023

具有重大的白氢勘查潜力。在柴达木盆地三湖地区 2 号井的岩屑罐顶气中检测到了氢气,其体积分数高达 99%(Shuai et al., 2010)。基于此,可以将上述 2 个地区作为中国首批勘探白氢的试点地区。通过卫星影像识别白氢逸出地表形成的圆形凹陷,针对圆形凹陷开展土壤地球化学分析,圈定找氢靶区。在找氢靶区基础上,开展二维或三维地震测量,配合重力等技术识别地下储层和通道并进行钻探验证。

(2) 加强综合成因机制和勘查技术研究

系统收集梳理相关资料,包括沉积盆地、深部流体活动区、大陆裂谷系、蛇绿岩等资料,研究编制全国白氢资源潜力分布图,为寻找新靶区提供信息资料储备。开展成因机制研究,包括水岩作用、辐射分解作用等原理研究,揭示成氢生氢机制,为准确定位靶区提供理论准备。同时要研发产氢速率提升辅助技术,如研发向目标岩体人工注水加快蛇纹石生成氢气的速率等技术,提高产氢气的效率。由于氢气的爆炸范围很广,空气中氢气浓度达 4%~75.6% 时都会引起爆炸,氢气泄漏监测技术与装备是开采白氢必须具备的条件,也应加强氢气的研发监测技术。

(3) 建设多学科人才培养体系,打造专业的白氢人才队伍

国际上现有的白氢勘查技术人员基本上来自于油气和地热勘探人员。数据显示,白氢经常与氦气、油气共生,在找气的技术方法上有相似之处。建议中国在现有氦气队伍基础上扩大规模,集航空遥感、地球物理、地球化学等专业为一体,打造一支实力强大的科研与调查相结合的氢氦队伍。前期可加强与美国、法国、澳大利亚等国家的合作,学习国外实践经验与先进理论知识,加速人才队伍成长。

5 结 论

(1) 在氢能领域,已经实现工业化制备的主要有棕氢、灰氢、蓝氢和绿氢,生产这些氢气需要消耗大量能源,产生碳排放或者制备成本高昂。白氢是地球内部形成的天然氢气,目前,普遍认为主要有水岩反应、放射性辐射分解水和深源脱气 3 种成因机制。与工业制氢相比,白氢具有零碳、生产成本极低和可再生三大优势。

(2) 地球“氢工厂”模型认为,地球上可采白氢储

量能满足全球数百年氢需求,水与富铁岩石反应可能是主要的大规模产氢机制。高含量白氢广泛分布在裂谷、板块俯冲带、前寒武纪结晶基底等区域。全球已发现数百处白氢矿点、矿床。近年来美国、澳大利亚、法国等愈发重视白氢勘查和研究,致力于白氢的勘探和开发工作。与欧美等国家相比,中国白氢调查和研究工作有待提升。

(3) 中国已在松辽盆地和柴达木盆地等多处监测到了高含量白氢点,可将上述 2 个地区作为白氢调查试点。同时要加强综合研究和理论技术研发,编制全国白氢资源潜力分布图,为寻找新靶区提供信息资料储备和开展成因机制研究,为准确定位靶区提供理论准备,以及研发产氢速率提升辅助技术等。此外,要建设高素质白氢队伍,为中国白氢的开发和利用做好准备。

References

- Angino E E, Coveney R M J, Goebel E D, et al. 1984. Hydrogen and nitrogen—Origin, distribution, and abundance, a followup[J]. *Oil & Gas Journal*, 82(49): 142–146.
- Arcos J M M, Santos D M F. 2023. The hydrogen color spectrum: Techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production[J]. *Gases*, 3(1): 25–46.
- Ascent Funds. 2020. Ascent hydrogen fund and helios aragon sign agreement to develop gold hydrogen in the northern Province of Aragon, Spain [EB/OL]. (2020-12-15) [2024-02-18]. <https://ascent-funds.com/2020/12/15/ascent-hydrogen-fund-signs-new-deal-with-spains-helios-aragon-to-explore-and-produce-gold-hydrogen/>.
- Bakx K. A new gold rush? 2024. The search for the natural hydrogen motherlode is coming to Canada [EB/OL]. (2024-01-26) [2024-02-18]. <https://www.cbc.ca/news/canada/bakx-white-hydrogen-natural-mali-1.7094645>.
- Bartlett J, Krupnick A. 2020. Decarbonized hydrogen in the US power and industrial sectors: Identifying and incentivizing opportunities to lower emissions[R]. *Resources for the Future*, 20–25.
- Bauer C, Treyer K, Antonini C, et al. 2022. On the climate impacts of blue hydrogen production[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 6(1): 66–75.
- Brandon N, Armstrong F, Chan S H, et al. 2021. The role of hydrogen and ammonia in meeting the net zero challenge[J]. *Climate Change: Science and Solutions, Briefing*, 4: 1–13.
- Briere D, Jerzykiewicz T. 2016. On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali) [C]//International Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 3–6 April 2016. Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists: 342–342.
- Bulletin R. 2023. The hydrogen economy: Opportunities and risks in the energy transition [EB/OL]. (2023-04) [2024-02-18]. <https://commercial>.

- allianz.com/news-and-insights/reports/hydrogen-energy.html.
- Collins L. 2023a. 'Energy of the future' | French president promises 'massive funding' for natural hydrogen. [EB/OL]. (2023-12-13) [2024-02-18]. <https://www.hydrogeninsight.com/production/energy-of-the-future-french-president-promises-massive-funding-for-natural-hydrogen/2-1-1570543>.
- Collins L. 2023b. Natural hydrogen found? | State-owned oil company analysing five sites across South Korea [EB/OL]. (2023-03-31) [2024-02-18]. <https://www.hydrogeninsight.com/production/natural-hydrogen-found-state-owned-oil-company-analysing-five-sites-across-south-korea/2-1-1429573>.
- Dove N. 2023. How a white hydrogen discovery could help global emissions efforts [EB/OL]. (2023-10-31) [2024-02-18]. <https://global-news.ca/news/10061237/white-hydrogen-discovery-what-is-it/>.
- Dou L R, Liu H Q, Li B, et al. 2024. Global natural hydrogen exploration and developmentsituation and prospects in China[J]. Lithologic Reservoirs, 36(2): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Dubessy J, Pagel M, Beny J M, et al. 1988. Radiolysis evidenced by H_2 - O_2 and H_2 -bearing fluid inclusions in three uranium deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1155–1167.
- Dutta S. 2018. Hydrogen as sustainable and green energy resource [EB/OL]. (2018-07-17) [2024-02-18]. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0825041802091212.a01.pub3>.
- Ellis G S. 2023. Geologic hydrogen: An overlooked potential primary clean-energy resource[R]. Invited Presentation to the Geological Society of Washington DC.
- Enery. gov. 2023. Workshop with Oman's Ministry of Energy and Minerals Explores Potential for Producing Hydrogen from Oman's Unique Geology [EB/OL]. (2023-09-29) [2024-02-18]. <https://www.energy.gov/articles/departement-energy-convenes-first-ever-bilateral-engagement-geologic-hydrogen>.
- Evans M. 2023. HyTerra, a first mover in natural hydrogen production [EB/OL]. (2023-09-29) [2024-02-18]. <https://www.proactiveinvestors.co.uk/companies/news/1037927/hyterra-a-first-mover-in-natural-hydrogen-production-1037927.html>.
- Goebel E D, Coveney Jr R M, Angino E E, et al. 1983. Naturally occurring hydrogen gas from a borehole on the western flank of Nemaha anticline in Kansas[J]. AAPG Bulletin, 67(8): 1324–1324.
- Guélard J, Beaumont V, Rouchon V, et al. 2017. Natural H_2 in Kansas: Deep or shallow origin?[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(5): 1841–1865.
- Han S, Tang Z, Wang C, et al. 2022. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: New insights into deep Earth exploration[J]. *Science Bulletin*, 67(10): 1003–1006.
- Hand E. 2023a. Hidden hydrogen: Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free? [EB/OL]. (2023-02-16)[2024-02-18]. <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>.
- Hand E. 2023b. Geological hydrogen wins first major funding[J]. *Science* (New York, NY), 381(6662): 1036–1037.
- Hao Y, Pang Z, Tian J, et al. 2020. Origin and evolution of hydrogen-rich gas discharges from a hot spring in the eastern coastal area of China[J]. *Chemical Geology*, 538: 119477.
- Howarth R W, Jacobson M Z. 2021. How green is blue hydrogen?[J]. *Energy Science & Engineering*, 9(10): 1676–1687.
- Ji M, Wang J. 2021. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(78): 38612–38635.
- Jin Z J, Yang L, Zeng J H et al. 2002. Deep fluid activities and their effects on generation of hydrocarbon in Dongying depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 36(2): 1–14.
- Jovan D J, Dolanc G. 2020. Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions[J]. *Energies*, 13(24): 6599.
- Kazi M K, Eljack F, El-Halwagi M M, et al. 2021. Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in qatar[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 145: 107144.
- Kuehn M. 2023. Transitioning from a Grey to Clean Hydrogen Economy: Considerations for Scaling Production and Making Use of Existing Transport Infrastructure[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, D031S106R007.
- Li X M, Liu Y H, Wen J P. 2002. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Well Wulong 1, Chuxiong Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 22(5): 16–19 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y B. 2022. A comparative study on energy strategies of the US, Japan and Germany[J]. *Frontiers*, 13: 45–55.
- Lollar B S, Onstott T C, Lacrampe-Couloume G, et al. 2014. The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H_2 production[J]. *Nature*, 516(7531): 379–382.
- Marty B, Gunnlaugsson E, Jambon A, et al. 1991. Gas geochemistry of geothermal fluids, the Hengill area, southwest rift zone of Iceland[J]. *Chemical geology*, 91(3): 207–225.
- Maiga O, Deville E, Laval J, et al. 2023. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 11876.
- Mendrela P, Stanek W, Simla T. 2024. Sustainability assessment of hydrogen production based on nuclear energy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49: 729–744.
- Messad P. 2023. Excitement event about natural hydrogen as huge reserves found in France [EB/OL]. (2023-07-05)[2024-02-18]. <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/excitement-grows-about-natural-hydrogen-as-huge-reserves-found-in-france/>.
- Milani D, Kiani A, McNaughton R. 2020. Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46): 24125–24145.
- Moon B, Lee W, Lee Y. 2021. The present condition and outlook of

- hydrogen industry in Alberta, Canada[J]. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 25(1): 1–6.
- Moore B J, Sigler S. 1987. Analyses of natural gases, 1917–85[R]. US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Morrill P L, Kuenen J G, Johnson O J, et al. 2013. Geochemistry and geobiology of a present-day serpentinization site in California: The Cedars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 109: 222–240.
- Newcombe R B. 1935. Natural gas fields of Michigan[J]. *AAPG Special Volumes*, 7: 787–812.
- Nitz B. 2023. The history and promise of geological hydrogen for fuel [EB/OL]. (2023-03-06)[2014-02-18]. <https://www.greenprophet.com/2023/03/geological-hydrogen-for-fuel/>.
- Osselin F, Soullain C, Fauguerolles C, et al. 2022. Orange hydrogen is the new green[J]. *Nature Geoscience*, 15(10): 765–769.
- Paddison L. 2023. They went hunting for fossil fuels. What they found could help save the world [EB/OL]. <https://edition.cnn.com/2023/10/29/climate/white-hydrogen-fossil-fuels-climate/index.html>.
- Parkes R. 2023. Massive underground reservoir of natural hydrogen in Spain 'could deliver the cheapest H₂ in the world' [EB/OL]. (2023-04-06) [2024-02-18]. <https://www.hydrogeninsight.com/innovation/massive-underground-reservoir-of-natural-hydrogen-in-spain-could-deliver-the-cheapest-h2-in-the-world/2-1-1431515>.
- Peacock B. 2023. NASA pictures hydrogen-emitting 'fairy circles' in WA [EB/OL]. (2023-09-12)[2024-02-18]. <https://www.pv-magazine-australia.com/2023/09/12/nasa-finds-hydrogen-emitting-fairy-circles-in-wa/>.
- Potter J, Rankin A H, Treloar P J. 2004. Abiogenic Fischer–Tropsch synthesis of hydrocarbons in alkaline igneous rocks; fluid inclusion, textural and isotopic evidence from the Lovozero complex, NW Russia[J]. *Lithos*, 75(3/4): 311–330.
- Qin C, Yu Q, Liu W et al. 2017. Reservoir Characteristics of Organic-rich Mudstone of Niutitang Formation in Northern Guizhou[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 39(4): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Ren X, Dong L, Xu D, et al. 2020. Challenges towards hydrogen economy in China[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59): 34326–34345.
- Salvi S, Williams–Jones A E. 1997. Fischer–Tropsch synthesis of hydrocarbons during sub-solidus alteration of the Strange Lake peralkaline granite, Quebec/Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1): 83–99.
- Savchenko V P. 1958. The formation of free hydrogen in the Earth's crust as determined by the reducing action of the products of radioactive transformations of isotopes[J]. *Geochemistry Int.*, 1: 16–25.
- Scita R, Raimondi P P, Noussan M. 2020. Green hydrogen: the holy grail of decarbonisation? An analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy[R]. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3709789>.
- Shuai Y H, Zhang S C, Su A G, et al. 2010. Geochemical evidence for strong ongoing methanogenesis in Sanhu region of Qaidam Basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 53(1): 84–90.
- Stangarone T. 2021. South Korean efforts to transition to a hydrogen economy[J]. *Clean technologies and environmental policy*, 23: 509–516.
- Symonds R B, Poreda R J, Evans W C, et al. 2003. Mantle and crustal sources of carbon, nitrogen, and noble gases in Cascade–Range and Aleutian–Arc volcanic gases[R]. US Geological Survey.
- Tian Q N, Zhang W, Wang H H, et al. 2022. Non-negligible new energy in the energy transition context: Natural hydrogen[J]. *Geological Survey of China*, 9(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Trencher G, Edianto A. 2021. Drivers and barriers to the adoption of fuel cell passenger vehicles and buses in Germany[J]. *Energies*, 14(4): 833.
- Tu X Q, Zeng R. 2024. New Trends, Impact and response strategies of clean energy subsidy policies in the United States: Analysis based on the US inflation reduction act[J]. *Zhejiang Academic Journal*, (1): 137–143 (in Chinese with English abstract).
- Vaquand C. 2011. Genèse et mobilité de l'hydrogène dans les roches sédimentaires: Source d'énergie naturelle ou vecteur énergétique stockable[D]. PhD Thesis Defended in IFP Energies nouvelles and Institut de Physique du Globe de Paris.
- Wan Y M. 2020. Global exploration, application and prospect of natural hydrogen[J]. *Energy of China*, 42(9): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Ward L K. 1933. Inflammable gases occluded in the pre-Palaeozoic rocks of South Australia[J]. *Transactions and Proceedings of the Royal Society of South Australia*, 57: 42–47.
- Wei Q Z, Zhu R K, Yang Z et al. 2024. Geological characteristics, formation distribution and resource prospects of natural hydrogen reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 35(6): 1113–1122 (in Chinese with English abstract).
- Woolnough W G. 1934. Natural gas in Australia and new guinea[J]. *AAPG Bulletin*, 18(2): 226–242.
- Worman S L, Pratson L F, Karson J A, et al. 2016. Global rate and distribution of H₂ gas produced by serpentinization within oceanic lithosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(12): 6435–6443.
- Yu C. 2012. Analysis of reservoir-forming conditions of shale gas in Lower Silurian of southeast Sichuan area[D]. Master's thesis of Southwest Petroleum University.
- Yu M, Wang K, Vredenburg H. 2021. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41): 21261–21273.
- Zgonnik V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review[J]. *Earth–Science Reviews*, 203: 103140.
- 45–8 Energy. 2023. Hydrogen, the emergence of a clean energy [EB/OL]. (2023–09–12) [2024–02–18]. <https://458energy.com/hydrogen/>.

附中文参考文献

- 窦立荣, 刘化清, 李博, 等. 2024. 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*, 36(2): 1–14.
- 金之钧, 杨雷, 曾溅辉, 等. 2002. 东营凹陷深部流体活动及其生烃效应初探[J]. *石油勘探与开发*, 29(2): 42–44.

李秀梅, 刘映辉, 温景萍. 2002. 楚雄盆地乌龙 1 井天然气的地球化学特征和地质意义[J]. [天然气工业](#), 22(5): 16-19.

梁亚滨. 2022. 美、日、德能源战略比较与借鉴意义[J]. [学术前沿](#), (13): 45-55.

秦川, 余谦, 刘伟, 等. 2017. 黔北地区牛蹄塘组富有机质泥岩储层特征[J]. [西南石油大学学报\(自然科学版\)](#), 39(4): 13-24.

田黔宁, 张炜, 王海华, 等. 2022. 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](#), 9(1): 1-15.

屠新泉, 曾瑞. 2024. 美国清洁能源补贴政策新动向、影响及应对策略——基于美国《通胀削减法案》的分析[J]. [浙江学刊](#), (1): 137-143.

万燕鸣. 2020. 全球天然氢的勘探、应用与发展[J]. [中国能源](#), 42(9): 33-37.

魏琪钊, 朱如凯, 杨智, 等. 2024. 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](#), 35(6): 1113-1122.

余川. 2012. 川东南地区下志留统页岩气成藏条件及资源潜力分析[D]. 西南石油大学硕士学位论文.

《地质通报》第 43 卷第 9 期要目预告

自然资源动态监测网络构建——以江苏省为例	李胤等
松嫩平原齐齐哈尔地区拜泉县地表基质特征及其古环境恢复	邵兴坤等
黑龙江省齐齐哈尔五县碳存储量空间变化规律及固碳潜力研究	詹泽东等
2000—2030 年云贵高原碳储量和生境质量时空格局演变	郭佳晖等
基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情境下东北耕地潜在适宜区的变化	陈武迪等
基于自然资源统一管理的地表基质模型、分类及调查研究	裴小龙等
山丘区地表基质空间异质性特征及其对植被生态影响	祝晓松等
新疆伊宁地块坎苏一带 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄新资料及其地层归属	曾令高等
北康盆地基底构造特征及其对南海南部构造演化的启示	徐俊杰等
同构造岩浆流动与相对稳定环境下岩体侵位的差异性及其对华北北缘晚古生代晚期—早中生代构造演化的约束	蒋小洁等
分布式三维广域电磁法在山东齐河-禹城李屯厚覆盖区富铁矿勘查中的应用	朱裕振等
粤北大宝山铜多金属矿区赋矿地层时代及对矿床成因指示	蔺东永等
新疆东准噶尔石炭纪坝西铜矿斑岩成因及对矿产勘查的指示	孟秋熠等
川西藏东交通廊道区域工程地质条件评价	杨志华等
鲁西南黄河下游地下水氟富集规律及其影响因素	孟甲等