

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512020176

天然氢气的成因机制、赋存状态及成藏机制

杨广坤^{1,2}, 范立勇³, 康锐³, 惠洁³, 刘成林^{1,2,*}, 陈践发^{1,2}, 王海东^{1,2},
张雪^{1,2}, 杨子翔^{1,2}, 刘鹏^{1,2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

摘要: 在全球能源结构向低碳清洁化转型背景下, 地质氢气因高热值、零碳排放特性成为碳中和核心能源载体。天然氢气作为地质作用形成的地下可持续氢资源, 其富集机理与成藏模式研究对资源勘查与保障能源安全具有重要战略意义。本文通过文献调研与综合分析, 系统梳理氢气分类、天然氢成因及来源判识、相态及赋存状态、成藏地质条件与富集机理, 构建“生-运-聚”理论框架。天然氢以无机成因(深源脱气、水-岩反应等)为主、有机成因(有机质分解、微生物作用)为辅, 赋存形式包括浅部游离态、溶解态、吸附态及深部金属氢化物; 跨圈层构造与深大断裂是主要运移通道, 黏土矿物、煤岩及致密含水盖层为关键保存条件。针对现有判识方法的局限, 提出“同位素-地球化学-地质背景”三位一体成因判别体系。本文为天然氢资源勘探提供科学依据, 对推动能源转型与实现碳中和目标具有双重价值。

关键词: 天然氢气; 地质成因; 富集机理; 成藏模式; 生-运-聚

中图分类号: TE122.1+13 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2026)04-1096-16

Genetic Mechanisms, Occurrence States, and Reservoir Formation Mechanisms of Natural Hydrogen

YANG Guangkun^{1,2}, FAN Liyong³, KANG Rui³, HUI Jie³, LIU Chenglin^{1,2,*}, CHEN Jianfa^{1,2},
WANG Haidong^{1,2}, ZHANG Xue^{1,2}, YANG Zixiang^{1,2}, LIU Peng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China)

Abstract: As the global energy system transitions toward low-carbon and clean development, geological hydrogen has emerged as a promising energy carrier because of its high calorific value and zero carbon emissions. As a sustainable underground resource generated by geological processes, natural hydrogen has attracted increasing attention for its potential contribution to resource exploration, energy security, and carbon neutrality. Through a comprehensive review and analysis of the existing literature, this study systematically examines the

收稿日期: 2025-12-02; 修回日期: 2026-04-17; 编辑: 袁茂文。

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1403901)。

作者简介: 杨广坤, 男, 博士研究生, 2004年生, 地质资源与地质工程专业, 主要从事天然气地球化学研究。

Email: yang.guang.kun@qq.com。

*通信作者: 刘成林, 男, 教授, 博士生导师, 1970年生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事油气成藏和资源评价研究。

Email: liuel@cup.edu.cn。

引用格式: 杨广坤, 范立勇, 康锐, 等. 天然氢气的成因机制、赋存状态及成藏机制[J]. 现代地质, 2026, 40(4): 1096-1111. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512020176.

YANG Guangkun, FAN Liyong, KANG Rui, et al. Genetic Mechanisms, Occurrence States, and Reservoir Formation Mechanisms of Natural Hydrogen [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(4): 1096-1111. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512020176.

classification of hydrogen, the genesis and source identification of natural hydrogen, and its phase states and modes of occurrence. It further summarizes the geological conditions and enrichment mechanisms responsible for hydrogen reservoir formation and proposes a “generation-transportation-accumulation” theoretical framework. Natural hydrogen is predominantly generated through inorganic processes, including deep-source degassing and water-rock reactions, with additional contributions from organic processes, such as the decomposition of organic matter and microbial activity. It occurs as free gas, dissolved gas, and adsorbed hydrogen in the shallow subsurface, whereas metal hydrides represent its principal occurrence in the deep subsurface. Trans-sphere structures and major deep faults provide the primary migration pathways, while clay minerals, coal-bearing strata, and dense water-bearing caprocks constitute the key geological conditions for hydrogen preservation. To address the limitations of existing identification methods, this study proposes a “three-in-one systematic genesis discrimination system” that integrates isotopic, geochemical, and geological evidence. This work provides a scientific basis for the exploration of natural hydrogen resources and contributes to advancing the energy transition and achieving carbon neutrality.

Key words: natural hydrogen; geological origin; enrichment mechanism; accumulation model; generation-transportation-accumulation

0 引言

能源作为人类社会发展的核心驱动力，贯穿经济、社会、环境及国家安全的各个层面。世界能源结构已经历了两次重要的转变：第一次是从工业革命前的柴薪时代转向18世纪至20世纪初的煤炭时代，第二次是20世纪中期至21世纪初转向石油与天然气时代。世界能源结构的发展历程是一个从传统生物质能源向化石能源过渡，并且正在向多元化、低碳清洁化转型（第3次转型）的动态过程^[1-3]。

在全球能源结构转型的背景下，非常规新能源因其资源可持续性、环境友好性或经济性而具有不可替代的战略重要性，主要包括非常规化石能源、氢能、地热能 and 核能等。其中，地质氢气因其高热值、零碳排放的特性，被视为实现碳中和目标的核心能源载体之一，成为当今世界能源研究的热点^[4]。2021年，全球氢需求量为9430 × 10⁴ t。预计未来几十年全球氢需求将大幅增长，到2070年可能超过5 × 10⁸ t^[5]。国内方面，自2011年以来，国家陆续出台相关政策，全国30多个省、市制定了氢能相关发展支持政策，鼓励和引导发展氢能^[6]。2024年，我国制氢量超3650 × 10⁴ t，位居世界第一^[7]。因此，作为未来国家能源结构的重要支柱，氢能是推动绿色低碳转型的关键载体与战略新兴产业，将与其他能源协同互补成为主体能源，不可或缺。

由于分子量很小、扩散性强，且化学性质活泼、易于反应，地壳中的大部分H₂易通过化学反应被消耗，因此在自然条件下保存极为苛刻。但是，随着全球数百处H₂气苗的发现，以及后来非洲马里Bourakébougou地区内的Bougou-1井持续产出的H₂含量高达约98%的天然气，引发了全球对天然氢气研究的热潮^[8]。2023年，“寻找天然氢源的热潮”入选了Science“年度十大科学突破”，使天然氢气得到广泛关注^[9]。尽管如此，天然氢气的大规模勘探开发仍面临关键科学挑战：其成藏过程受控于何种地质条件？何种构造背景与岩性组合最利于氢气的生成、运移与聚集？因此，本文以天然氢气成藏系统为对象，通过文献调研和综合分析，创新性地实现了成藏要素的系统重构，明确了不同成藏模式的核心差异与勘探指向，旨在揭示控制天然氢气富集成藏的机理因素，完善“生-运-聚”成藏理论框架，为天然氢气资源勘查提供科学依据，对保障能源安全与能源转型具有双重战略意义。

1 氢的性质及主要分类

在化学领域中，“氢”这一概念具有多重指代含义：既可作为周期表中第1号元素（氢元素），也可表示构成物质的基本微粒（氢原子），更特指其最常见的稳定存在形式——由两个氢原子通过共价键结合的双原子分子（氢气）。而在天然气地球化学领域，“氢”通常指代氢气，作为一种可利用的气体资源。

1.1 氢的物理化学性质

氢在元素周期表中排在第一位，也是质量最小的元素。其相对原子质量为1.008，符号H，常见同位素包括氘（²H）和氚（³H）^[10]。氢元素的单质通常以双原子分子形式存在，分子结构稳定，分子式为H₂（氢气）。

氢气常温常压下为无色、无臭、无味的气体，相对分子质量约为2.016，密度极低（标准状况下约为0.0899 g/L）且难溶于水，熔点为-259.16℃，沸点为-252.87℃^[10]。

氢气化学性质活泼，具有可燃性、强还原性和弱氧化性。氢气燃点为574℃，燃烧时（空气中体积浓度4%~75%时遇明火爆炸）发出淡蓝色火焰并释放大量热量，产物仅为水，是一种清洁能源^[7]；与金属氧化物在高温下反应，显示强还原性；可与活泼金属（如Li、Na）反应生成离子型氢化物（如LiH、NaH），显示弱氧化性。此外，氢气能与卤素（如Cl₂、F₂）反应生成HX（如HCl、HF），与氮、碳等非金属反应生成氨（NH₃）及烃类化合物，与二氧化碳在高温高压下生成甲醇。此外，低温液态氢具有超导性质^[11]。其分子由两个氢原子通过强共价键结合，导致高渗透性，常温下可穿透橡胶，高温时甚至能扩散通过金属薄膜。

上述物理化学性质决定了天然氢气在地质环境中易扩散、难保存的特点，对成藏条件提出了严苛要求，这也是当前天然氢勘探的核心难点之一。针对这一核心难点，后续研究需结合氢的物理化学特性，利用分子动力学等实验模拟技术，进一步研究氢气的运移机制及运移优势路径，推动天然氢气的勘探开发。

1.2 氢的主要分类

作为宇宙中丰度最高且最早形成的元素之一，

氢广泛存在于宇宙之中。而在地球大气中，自然状态下的游离态氢气（简称“游离氢”）极其稀少，不足以被大量提取利用，需通过技术手段获取。根据地质作用与人工干预程度，可将可利用氢分为工业氢气和地质氢两大类，地质氢再细分为未经人工干预的天然氢和经部分人工干预形成的类型（表1），该分类更符合地质资源研究的逻辑框架^[12]。目前，按照获取方式（制取过程及碳排放）的不同可进一步细分，具体分类及解释见表1。

2 天然氢成因及来源判别

2.1 天然氢成因

天然氢的成因复杂，在全球不同构造背景中均有发现。Zgonnik^[17]根据天然氢的来源分为两类：原始氢（储存在地核和地幔中）和次生氢（在地幔和地壳内部各种化学反应产生）。目前学界普遍按照有机成因与无机成因进行划分，其中有机成因主要包括有机质分解和微生物作用；无机成因主要包括深源脱气、水-岩反应、水的辐解作用和其他无机产氢反应。总体上，深源脱气、水-岩反应（尤其是蛇纹石化）及水的辐解被认为是全球天然氢的主要来源，而有机质热分解的贡献也不容忽视^[18]。

2.1.1 微生物作用

根据侧重点的不同，微生物产生氢气的途径有多种分类方式。张青岚等^[20]系统总结出生物光解、生物光发酵、生物暗发酵、生物厌氧一氧化碳（CO）产氢和生物固氮产氢等5种途径；秦臻等^[21]将微生物产氢分为2种：生物直接产氢和生物间接产氢。

帅燕华等^[22]在我国柴达木盆地三湖地区中发

表1 氢的分类及其相关解释

Table 1 Classification of hydrogen and related explanations

氢的分类		相关解释
工业 氢气	黑氢或灰氢	采用化石燃料制取的氢气,制氢过程中有大量碳排放
	蓝氢	采用化石燃料制取的氢气,制氢过程中采用了碳捕捉及封存技术(CCS)处理降低碳排放
	绿氢	采用可再生能源通过电解制取的氢气,制氢过程中完全没有碳排放
	粉(红)氢或	通常是核能(不可再生能源)电解水制取的氢气 ^[13-15]
	黄氢	(“粉氢”来源于原子粉红色,“黄氢”来源于铀的燃烧原料:重铀酸铵)
地质 氢	天然氢、白 氢或金氢	由地下地质作用自然生成、未经人工干预的可再生氢气,通过被动收集方式获取
	橙氢	通过人工向基性-超基性岩体中注入流体,促进水-岩反应生氢的过程,包含人工干预环节,是一种主动刺激反应的方式,归为地质氢范畴但不属于天然氢(橙色指的是氧化铁的颜色) ^[16]

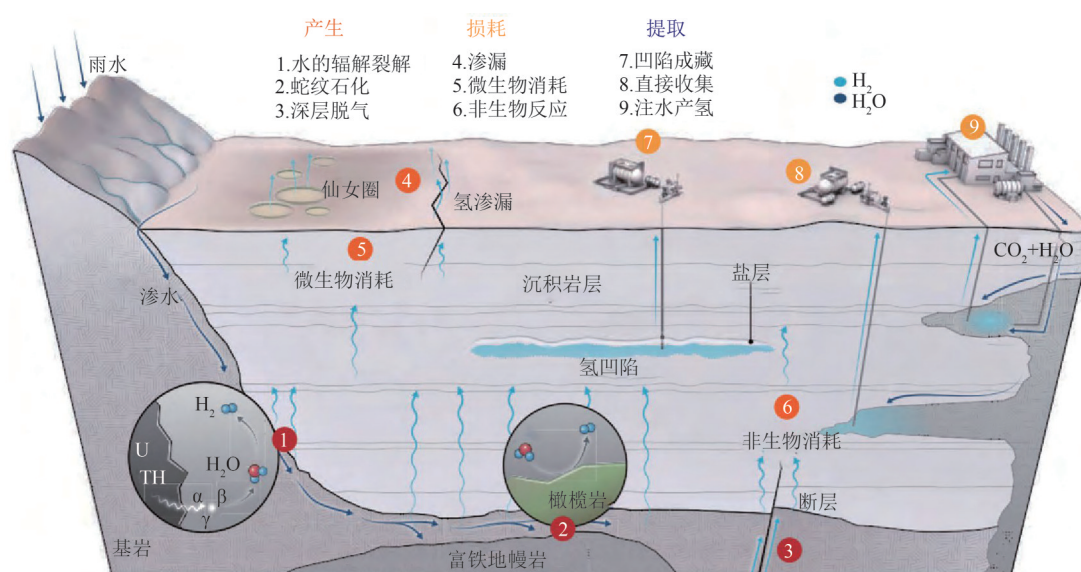


图1 天然氢生成模式 (据参考文献 [19])

Fig. 1 Natural hydrogen generation mode (according to Ref. [19])

现产氢微生物可以降解有机质形成高浓度氢气，该过程需厌氧环境与有机质供给的双重保障，是沉积盆地中有机成因天然氢的重要来源。另外，有研究发现，深海热液喷口存在微生物介导的氢循环^[23]；地球地下环境存在一种基于氢气和甲烷的微生物生态系统，对早期的生命形式存在深远影响^[24-26]，但此类环境中微生物产氢量较少，对规模化成藏贡献有限。

后续可结合微生物产氢的环境条件，针对沉积盆地浅部厌氧环境进行研究，探索微生物产氢与其他成因产氢的耦合关系，挖掘其局部富集的资源潜力。

2.1.2 有机质分解

有机质分解产生氢气主要分两种：有机质热分解和有机质辐解。

(1) 有机质热分解是最常见、最主要的产氢方式之一。随着有机质热演化进入高成熟或过成熟阶段，有机质开始大量裂解，发生芳构化或石墨化等过程，伴随C-H键断裂产生氢气^[27-28]。该过程多发生在深盆或高温变质带，常与天然气（尤其是干气）生成相伴，是沉积盆地氢气的重要来源之一。

(2) 放射性元素释放的射线也能直接作用于有机质，使其化学键断裂产生氢气。Wang等^[29]分析中国新疆的吐哈盆地侏罗系的钻井数据发现，烃源岩中放射性铀对有机质进行辐解，产生了大量氢气，此类辐解产氢需依托高放射性元素含量

的烃源岩背景，具有明显的区域局限性。

由于有机质分解产氢的区域局限性，后续可对全国高成熟烃源岩、富放射性烃源岩开展针对性的勘探，并结合盆地演化特征，预测有机质分解产氢的有利区带，为沉积盆地天然氢勘探提供靶区。

2.1.3 深源脱气

深源脱气主要分为2种方式：地核、地幔脱气和水与地幔还原剂反应脱气。前者主要指在地球形成初期形成于地核、地幔的氢气（原生氢气）^[17]，通过深大断裂或深部流体（岩浆和热液流体）向上活动脱气^[30]，然后赋存于前寒武纪基底岩石的包裹体内^[19]，这种方式具有长期积累、缓慢释放的特点，是古老克拉通地区潜在的氢源。而后者主要存在3种方式：第一种是俯冲板片向地球深部输送水和含水矿物（分解脱水）等物质，致使地幔中的还原性物质与水反应生氢；第二种是深部地幔向浅部上涌形成地幔柱，其携带的还原性物质（如铁镁质矿物）可能与岩石圈浅部流体中的水发生反应生氢^[31]；第三种是拉张背景下岩石圈伸展减薄，导致地幔物质上升并与浅层循环水反应生氢^[32]，该过程多发生在洋中脊或大陆裂谷带，是全球无机成因天然氢的主要来源之一。

深源脱气产氢往往与跨圈层构造活动密切相关，后续需结合全球板块构造演化，重点研究洋中脊、大陆裂谷、古老克拉通边缘等区域的深大断裂分布及发育特征，建立深源脱气产氢的地质识别标志。

2.1.4 水-岩反应

水-岩反应主要包含蛇纹石化和断层活化两种方式,是天然氢最主要的成因类型。

(1) 蛇纹石化是水-岩反应产氢中最主要、最常见且研究最多的,主要发生在富橄榄石的镁铁质-超镁铁质岩石与水反应的过程中,通过铁镁矿物的氧化还原反应释放氢气($30\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2}\text{SiO}_4 + 41\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 9\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2 \uparrow$),多分布在蛇绿岩带、板块俯冲带等区域^[9]。

(2) 断层活化(或岩石新鲜面反应)通常是指石英等含硅矿物因脆性的构造运动而与水反应产氢,其过程可以简化为两个方程式:① $\text{Si} \cdot + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}-\text{OH} + \text{H} \cdot$ ② $\text{H} \cdot + \text{H} \cdot \rightarrow \text{H}_2$ ^[33],该过程是断层带天然氢的重要补充来源。

蛇纹石化作为最主要的生氢方式,后续需深化镁铁质-超镁铁质岩石的勘查,结合水-岩反应的动力学条件,量化蛇纹石化的生氢效率,建立蛇纹石化产氢的资源潜力评价参数。

2.1.5 无机辐解作用

该无机辐解作用主要指水的辐射分解(简称“辐解”)。水辐射分解是指富含铀(U)、钍(Th)、钾(K)等放射性元素的地层,其衰变释放的 α 、 β 、 γ 射线能使水分子电离分解,产生 e_{aq}^- 、 $\text{HO} \cdot$ 、 $\text{H} \cdot$ 、 $\text{HO}_2 \cdot$ 、 H_3O^+ 、 OH^- 、 H_2O_2 和 H_2 等(图2)。通常这种电离辐射源于放射性原子核的衰变、加速带电粒子束(电子、质子等)和X射线辐射(光子能量大于50~100 eV)^[34]。由于该过

程中存在氧化性物质产生,会与生成的氢气发生反应消耗,因此Zgonnik等^[17]指出水的辐解并非大量天然氢资源的主要成因,仅在高放射性矿物富集且封闭还原的地质背景中(如铀矿床、富有机质页岩)可能形成局部富集。

针对水辐解产氢的局部富集特征,后续可开展铀矿床(氢气高值异常显示)、富放射性页岩等特殊地质体的精细勘探,研究封闭还原环境的形成与保存条件,探索此类局部富氢气藏的勘探开发技术。

2.1.6 其他无机产氢反应

自然界中还存在一些规模可能较小、但已被实验或局部观测证实的产氢反应,如岩浆中 H_2S 高温分解($\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2$)、磷化氢水解($\text{PH}_3 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + 4\text{H}_2 \uparrow$)、单质铁/黄铁矿氧化($\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2 \uparrow$)、菱铁矿与水反应等,也会产生氢气^[21]。此类反应在自然地质条件下仅能在极端环境(如高温岩浆房、富硫化物矿体)中少量发生,其产氢规模远低于蛇纹石化、深源脱气等主要途径,属于次要或潜在产氢途径,对规模化成藏的贡献有限,其能否构成具有资源意义的氢源尚需进一步评估。

2.2 天然氢来源判别

国内外学者基于区域氢气及伴生气体的丰度、同位素特征,建立了多种氢气成因判别方法。这些方法可以进一步划分为两类:单指标判别法和交会图判别法。结合天然氢成因分类,以下按

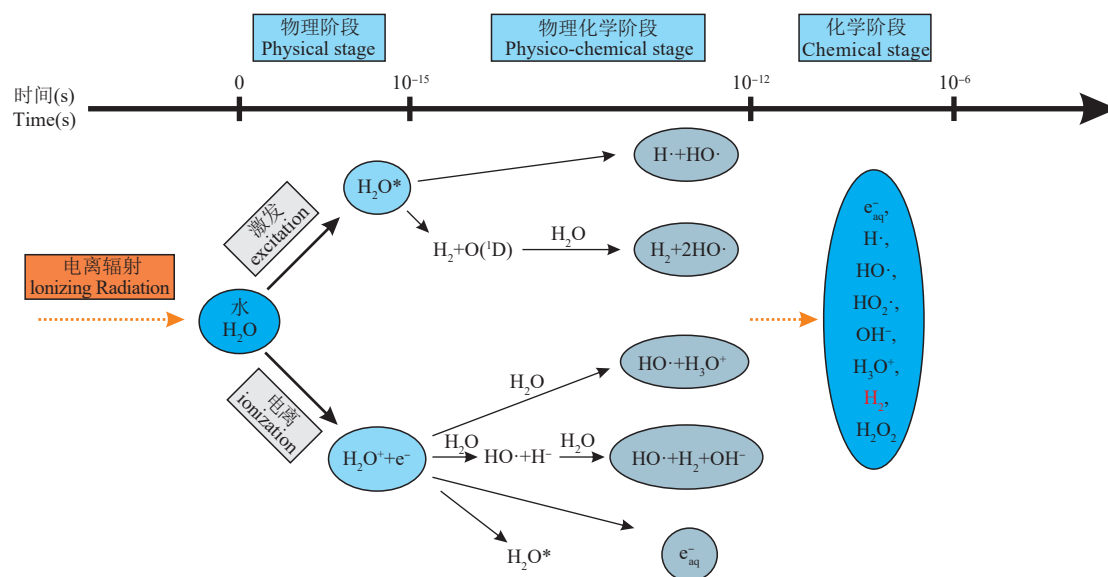


图2 水辐射分解的三个阶段中发生的主要反应(据参考文献[34]修改)

Fig. 2 The main reactions that occur during the three stages of water radiation decomposition (modified from Ref. [34])

“成因类型-判识指标-适用背景”逻辑，系统阐述各方法的优势、局限性及协同应用机制。

2.2.1 氢同位素： δD_{H_2} 值 (‰, VSMOW 标准)

Milkov^[35] 在统计研究全球不同地区天然氢的过程中，提出以 $\delta D_{H_2} = -650‰$ 为界划分壳源与幔源氢气。孟庆强等^[36] 进一步将其明确： $\delta D_{H_2} \leq -650‰$ 时指示壳源成因， $\delta D_{H_2} > -650‰$ 时指示幔源成因（图3a）。该指标的优势在于操作简便、数据易获取，局限性在于同位素分馏效应显著，同一成因类型在不同温压条件下可能出现同位素重叠，且无法区分壳源中的有机成因与无机成因（如有机质分解与地壳蛇纹石化）。

2.2.2 氦同位素： $^3He/^4He$ 值

刘全有等^[37] 在分析塔里木盆地天然气稀有气体同位素特征时，根据前人研究，利用该指标可鉴别天然气中是否存在深部幔源氦的混入。当 $^3He/^4He$ 值为 $n \times 10^{-8}$ 数量级（部分古生界、中生界天然气为 $n \times 10^{-7}$ 数量级）时，一般表现为壳源特征；当 $^3He/^4He$ 值为 $n \times 10^{-6}$ 数量级时，反映了天然气中有深部幔源氦的混入。在此基础上，韩双彪等^[33] 指出可以通过 $^3He/^4He$ 值来分析具有不同 R 值的天然气中氢气的成因（图3b）。该指标是区分深源与壳源成因的核心指标，但对壳源内部不同成因类型的判别能力有限，需与其他指标结合使用。

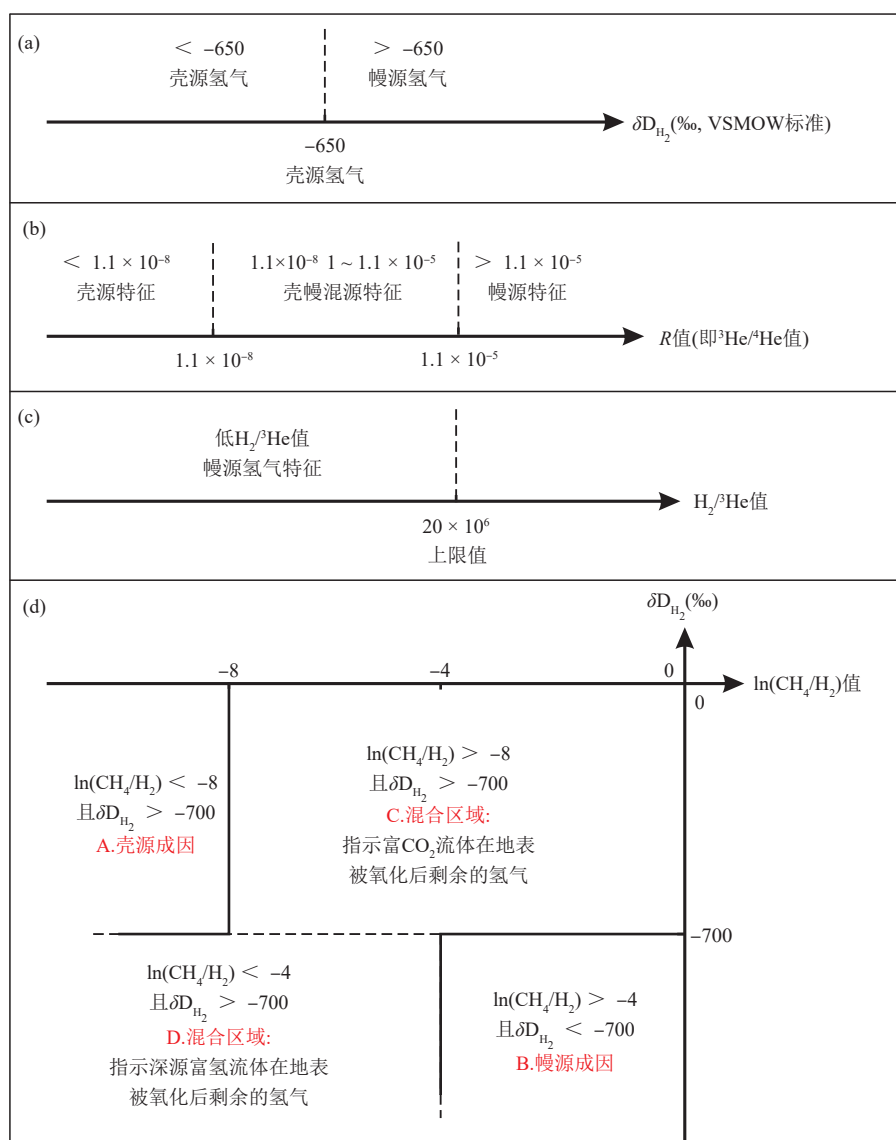


图3 天然氢来源判识组图 (据参考文献 [33, 35-36, 38-40] 修改)

Fig. 3 Natural hydrogen source identification chart (modified from Ref. [33, 35-36, 38-40])

(a) δD_{H_2} 值; (b) $^3He/^4He$ 值; (c) $H_2/^3He$ 值; (d) $\ln(CH_4/H_2)$ - δD_{H_2} 交会图判识法

2.2.3 $H_2/{}^3He$ 值

$H_2/{}^3He$ 值也可用于判识氢气来源。其中, 幔源成因氢气有低 $H_2/{}^3He$ 的特征^[38], 其上限值为 20×10^6 (图 3c)^[39]。该指标的核心优势在于能反映氢与幔源物质的关联程度, 但受流体混合作用影响较大, 在断裂活动强烈区域易出现假阳性结果。

2.2.4 $\ln(CH_4/H_2) - \delta D_{H_2}$ 交会图判识法

基于前人成果, 孟庆强^[40] 构建了利用 H_2-CH_4 关系及氢同位素组成 (δD_{H_2}) 判别氢气成因的方法 (图 3d)。该方法通过双指标组合提升了判别精度, 能初步区分有机成因 (高 $\ln(CH_4/H_2)$ 值) 与无机成因 (低 $\ln(CH_4/H_2)$ 值), 但在多源混合氢的判别中仍存在局限。

2.2.5 $H_2/{}^3He-R/R_a$ 交会图判识法

孟庆强等^[41] 在前人研究基础上, 提出了一种基于天然气组分含量特征的天然氢气识别模板。它主要是利用氢气壳幔判识指标 (R/R_a) 并结合 $H_2/{}^3He$ 值来判识天然氢的来源。该方法整合了稀有气体与氢含量的双重信息, 对深源-壳源混合成因氢的判别具有一定优势, 但依赖高精度的气体组分测试数据, 应用成本较高。

总之, 现有天然氢成因判识方法在复杂地质背景下存在显著局限性:

(1) 多源混合与区间重叠: 自然界中天然氢常为多成因混合产物, 而各成因的典型同位素值域存在宽泛重叠。例如, 强烈蛇纹石化产生的氢

气 δD_{H_2} 可低至 -800‰ , 与部分有机成因氢范围重叠。单一指标难以解析混合比例。

(2) 次生改造影响: 氢气在运移、聚集过程中极易与地层水发生氢同位素交换, 导致其原始成因信号被改造甚至掩盖。运移分馏、微生物氧化等次生过程也会改变气体组分比例。

(3) 缺乏成因专属指标: 目前尚无仅由某一特定成因 (如蛇纹石化) 产生且不受其他过程影响的“指纹”指标。现有判识多基于统计和经验区间, 在新区应用时存在不确定性。

因此, 本文提出建立“同位素-地球化学-地质背景”三位一体的系统性成因判别体系, 即以同位素数据定成因属性、以地球化学指标 (如伴生气体组分、微量元素) 定反应过程、以地质背景定形成环境, 从而实现复杂条件下天然氢成因的精准判识。针对该体系, 后续需加强多指标 ($H-C-He-Ne-Ar$ 等多同位素体系)、多方法 (地球化学测试、数值模拟) 的联合反演技术研发, 同时结合不同地质背景, 建立专属的成因判别图版与行业标准, 解决不同地质条件下成因判识精度不足的问题, 提升该体系在实际勘探中的应用价值。

3 天然氢相态及赋存状态

3.1 天然氢相态

氢的相态随温度和压力条件变化而改变 (图 4)^[42]。在不同温度压力条件下, 氢可呈现气相、液相、固相及超临界态^[43]。等离子态仅存在

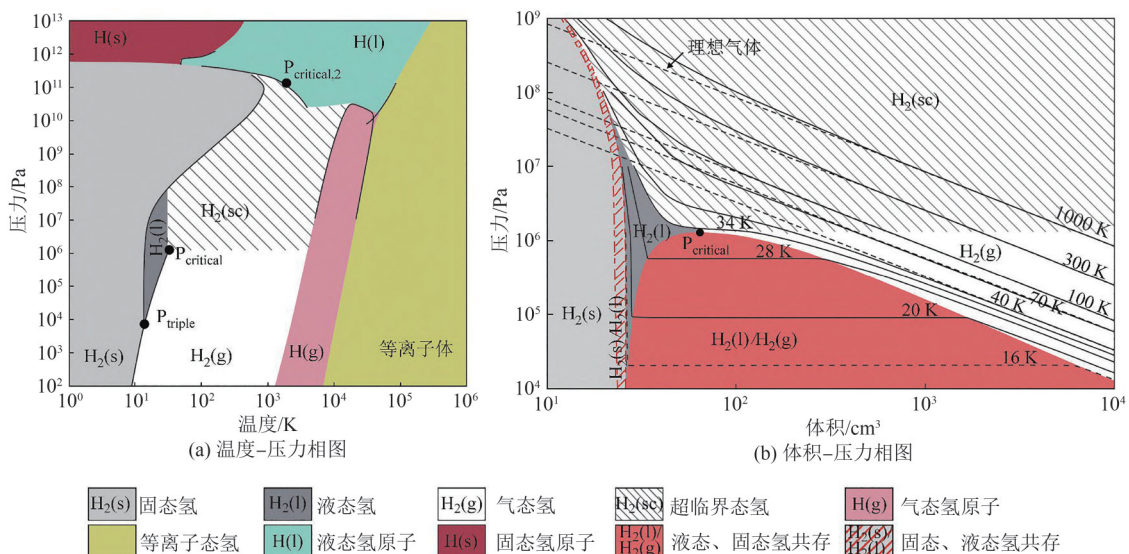


图 4 氢气相图 (据参考文献 [42-43])

Fig. 4 Hydrogen phase diagram (according to Ref. [42-43])

P_{triple} , 三相点; P_{critical} , 临界点; $P_{\text{critical},2}$, 临界点 2

于地核边缘、岩浆房核心区等极端高温高压环境，自然地质条件下难以稳定存在，且与天然氢成藏过程无直接关联，故本文不将其纳入相态分类。在标准压力下，固态氢的熔点为 14.2 K^[43]，液态氢的沸点为 20.38 K^[44]。此外，在三相点 ($P_{\text{triple}} = 13.96 \text{ K}$, 7.36 kPa) 氢呈气态、液态和固态三相共存^[44]；在临界点 ($P_{\text{critical}} = 33.15 \text{ K}$, 1.30 MPa)，氢的密度为 31.26 g/L，高于此点对应的温度压力时，氢气呈超临界流体状态^[45]。

3.2 天然氢赋存状态

天然氢的赋存状态主要有游离态、溶解态、吸附态和地球深部富氢环境中金属氢化物。在地球浅部，天然氢主要以游离态、溶解态和吸附态存在；在地球深部高温高压环境中，天然氢主要以金属氢化物形式存在^[17, 42, 46]。

3.2.1 游离氢

游离氢，即游离态氢气。李强等^[42]将游离氢细分为开放体系中的游离氢和封闭体系中的游离氢。其中，开放体系中的游离氢广泛分布于活动断裂带、火山地区、温泉及油气田等，常伴随地表渗漏，引发土壤变形与植被变化，形成“仙女圈”等地表标志^[47]。此外，在油气田、前寒武纪地层、盐矿床和温泉等区域同样存在游离态氢气。而封闭体系中的游离氢主要是指因地质活动而被封闭在包裹体中的游离氢。该游离氢在前寒武纪、岩浆岩、火山岩和各种矿体中更容易观测到，而在沉积岩和变质岩中观测较少^[17]。

3.2.2 溶解氢

溶解氢，即溶解态氢气。相较于能利用中子测井工具识别出的游离氢，溶解氢无法被中子测井工具检测出来。溶解氢主要赋存于地下含水层、油气田水、温泉及地热井中，其分布主要受深层断裂与裂谷带的控制^[42, 48-50]。此外，溶解氢赋存的地下水有利于深层天然氢的暂时储存，并在动态天然氢系统中持续向浅层释放游离氢^[42]。

谢丽颖等^[51]总结发现，氢气在渣油体系中的体积传质系数（表征体系实时溶解量和体系传质速率的重要参数）随温度和压力的增加而增加；石油体系中链烷烃的链长增加有利于氢气的溶解，环烷烃环数增加和芳烃芳香性的增加会显著限制氢气的溶解；烷基侧链的增加带来的烷基作用导致分子间距扩大（空间位阻效应，指分子中原子或基团因空间排布产生的阻碍作用，通过改变分

子构型和反应中心可及性显著影响化学反应速率和方向），从而增强石油体系的溶氢能力；烷基侧链中杂原子的掺杂会降低氢气的溶解；低温环境下，相较于轻质组分，油气内重质组分对氢气的溶解能力更强；高温环境下较重的渣油溶解氢气能力较低，此时芳烃和非烃化合物的影响起关键作用。

3.2.3 吸附氢

吸附氢，即吸附态氢气。目前，其研究方法主要是等温吸附实验和分子动力学模拟^[42]。吸附氢主要赋存于介孔与微孔内，其赋存状态受岩性、孔隙结构、温压条件等因素显著影响^[52-53]。当前研究主要关注黏土矿物、煤岩及灰岩等岩石类型。压力增大通常促进氢吸附，而温度升高则会抑制其吸附量。此外，与溶解氢类似，吸附氢赋存的黏土矿物和煤等可对深层天然氢向浅层迁移的过程发挥缓冲作用，并在构造运动引起温度和压力变化时释放出游离氢^[42]。

3.2.4 金属氢化物

金属氢化物是一种特殊形式的“氢赋存”—氢储存。杨文采^[54]研究发现，在地球形成过程中，其内部（主要是地核）仍保留了相当一部分氢，以金属氢化物形式存在。这些高温高压环境下的金属氢化物又具体分为两类：Fe、Co 和 Ni 等不稳定金属氢化物，以及 Ti、V、Cr 和 Mn 等稳定金属氢化物。其中，以 Fe-H 化合物为代表的金属氢化物，随压力温度降低会逐渐释放出氢分子^[42]。

4 天然氢资源形成地质条件及富集机理

4.1 天然氢资源形成地质条件

4.1.1 天然氢主要分布区

天然氢的分布受地质背景控制，前人已有较多研究^[55]。Liu 等^[56]在此基础上，将天然氢的分布区总结为两大类：构造稳定区和构造活动带。不同成因类型的天然氢在分布上具有明显规律性：

(1) 深源脱气成因天然氢：主要分布在构造活动带，以洋中脊、大陆裂谷、板块俯冲带为代表，受跨圈层构造及深部流体（岩浆流体和热液流体）活动控制；

(2) 水-岩反应成因天然氢：集中分布在蛇绿岩带、前寒武纪富铁地层、断层活动带，与镁铁

质-超镁铁质岩石的分布及构造活化程度密切相关;

(3) 有机质分解成因天然氢: 主要发育在沉积盆地内部深层(高成熟-过成熟烃源岩分布区)、煤系地层及放射性元素富集区;

(4) 微生物成因天然氢: 多分布在沉积盆地浅部厌氧环境、深海沉积物及热液喷口周边。

窦立荣等^[57]指出高丰度天然氢(体积分数>10%)主要富集于三类地质背景: 蛇绿岩带、裂谷系及前寒武纪富铁地层。其中, 蛇绿岩带作为古汇聚板块边缘的关键单元, 代表消减古洋壳的岩石圈残片, 其组成包括火成岩(如地幔橄榄岩、堆晶岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩等)和沉积岩(主要为深海远洋沉积)两大部分^[58]。

4.1.2 氢源岩石类型与矿物组合

天然氢的形成与氢源岩石的矿物组成直接相关, 不同成因对应特定的氢源岩石类型:

(1) 深源脱气成因: 无直接对应的氢源岩石, 其氢源来自地核-地幔原生氢, 需通过深大断裂等通道向上运移;

(2) 水-岩反应成因: 核心氢源岩石为镁铁质-超镁铁质岩石(富橄榄石、斜方辉石)、前寒武纪富铁氧化物或硫化物岩石、含石英的脆性岩石(断层带);

(3) 有机质分解成因: 氢源岩石为高有机质丰度的烃源岩(如页岩、油页岩)、煤岩及富含放射性元素(U、Th、K)的碎屑岩;

(4) 微生物成因: 无特定氢源岩石, 依赖富含有机质的沉积物及厌氧环境;

(5) 辐解成因: 氢源岩石为富含放射性元素的花岗岩、碎屑岩及碳酸盐岩, 需与地层水共存。

天然氢资源的形成与各种产氢反应(即天然氢的成因)息息相关。其中, 含橄榄石、铁辉石等含铁矿物的镁铁质和超镁铁质岩石, 与水发生以蛇纹石化为主的产氢反应被认为可能是最主要的氢气形成机制^[9]; 含大量U、Th、K等放射性元素的地壳岩石对水辐解, 以及煤等有机质的分解也是可能的生氢机制。此外, 含石英等含硅矿物的岩石与水的反应也能产氢, 主要发生在断层活动带^[21, 33]。

4.1.3 流体条件

天然氢的形成与流体(主要是水)的参与密切相关, 流体来源包括浅层流体和深部流体。浅

层流体包括大气降水、地表水循环形成的地层水, 主要通过断裂系统下渗循环, 是地壳浅部水-岩反应、微生物产氢、有机质分解产氢的主要原料来源; 而深部流体主要包括岩浆流体和热液流体, 主要为深源脱气成因天然氢提供运移载体, 其热效应和携带的化学物质也能驱动和促进浅部的水-岩反应。

研究表明, 浅层流体广泛参与了与天然氢形成有关的水-岩反应和微生物活动^[59], 其广泛分布为地壳浅部大规模生氢提供了必要条件。同时, 以岩浆和热液流体为代表的深部流体向上活动, 不仅是深部原生氢的载体, 也为浅部带来了深部还原性物质, 驱动各圈层相互作用, 是天然氢资源形成的重要地质条件。

4.2 天然氢富集机理

4.2.1 优质有效的氢源条件(“源”)

优质有效的氢源主要包括水、富铁岩石、地球深部流体(岩浆流体和热液流体, 主要是其向上活动带来的原始氢和还原性物质)以及富含放射性元素的岩石。

优质有效的氢源是天然氢富集成藏的基础, 需满足“生成量>逸散量+消耗量”的平衡关系。核心氢源包括:

(1) 物质基础: 富铁镁矿物(橄榄石、辉石)、有机质、放射性元素(U、Th、K)及还原性流体;

(2) 动力条件: 构造活化(断层活动、板块运动)、高温高压环境、流体循环;

(3) 分布区: 蛇绿岩带、前寒武纪富铁地层、沉积盆地深层、裂谷带及火山岩区是优质氢源的主要分布区。

前人研究总结发现, 高含量的天然氢气显示主要发现在蛇绿岩带、海底热液喷口、过碱性花岗岩、地下富氢气盐穴或含水层、铀矿床以及前寒武系富铁地层等不同地质背景中^[17, 24, 60]。

4.2.2 跨圈层构造及深大断裂发育(“运”)

“跨圈层构造”即穿越不同圈层构造, 是指跨越地球不同圈层的构造作用及其波及的区域, 其间伴随着构造动力、物质、能量的传输与相互作用及资源环境效应^[61]。而地球中“跨圈层构造”主要包括板块构造的俯冲带、大洋中脊的扩张、地幔柱及大火成岩省和超壳深大断裂带等, 是联系地球内部与浅表的重要纽带(图5a)。

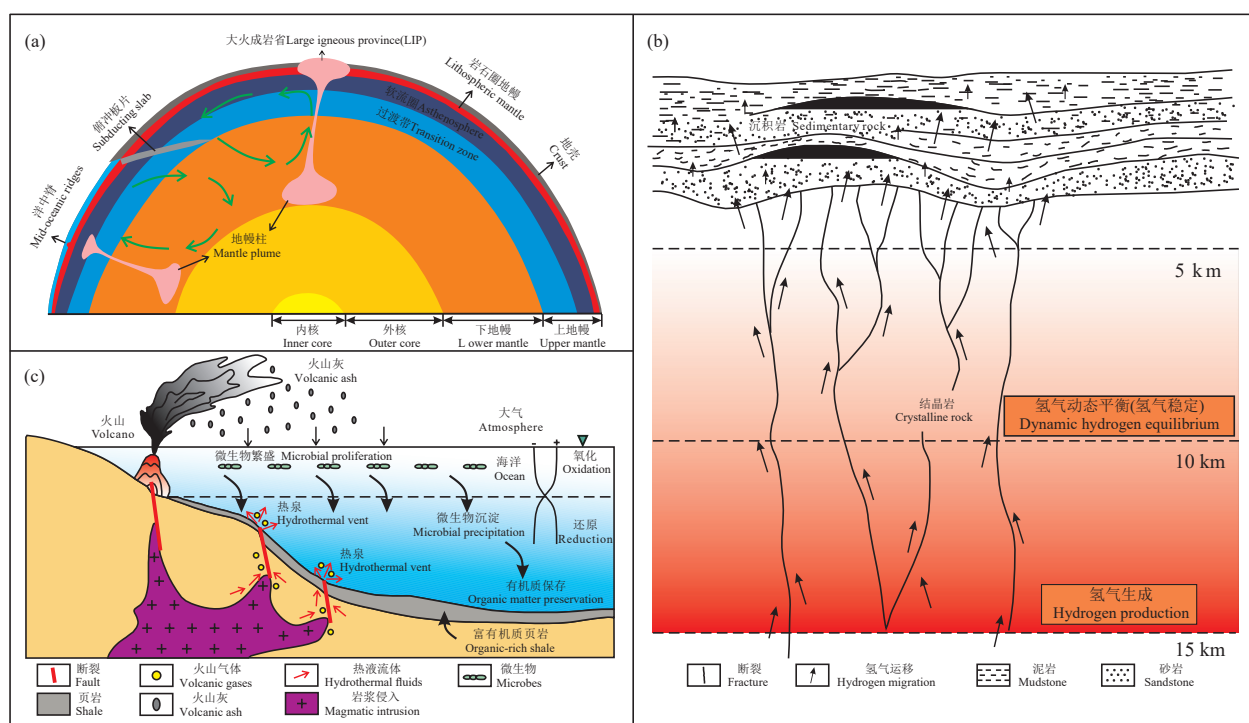


图5 天然氢优势运移条件 (据参考文献 [36, 61-65] 修改)

Fig. 5 Natural hydrogen preferential migration conditions (modified from Ref. [36, 61-65])

(a)地球跨圈层构造示意图;(b)深大断裂示意图;(c)深部流体活动模式图

其中,深大断裂为深部天然氢的向上运移提供了主要高效通道(图5b)。同时,俯冲带等跨圈层构造的发育,也有利于次级断裂和岩石裂缝系统的发育,促使地球深部巨量的氢源向浅层运移。

此外,与油气优势运移通道不同,跨圈层构造不仅可作为产物天然氢的运移通道,也可作为生氢反应原料的运移通道。一方面,跨圈层构造及其形成的局部断裂裂缝系统加速了各圈层间的水循环,为水-岩反应、水的辐解等生氢过程提供了水源;另一方面,跨圈层构造常伴随深部流体(地壳和地幔来源的岩浆及热液流体)活动(图5c),大规模的岩浆及热液作用不仅将深部氢带入浅层,其提供的能量也促使水-岩反应的发生^[64]。

4.2.3 良好的保存条件(“聚”)

与油气、氢气类似,天然氢的保存依旧离不开物性、压力和浓度三重封闭机理。由于天然氢的分子量小且易扩散、化学还原性强,其保存对储盖层的封闭性和还原性要求极高。因此,天然氢富集区通常需要具备好的还原性储盖配置。“还原性储盖配置”指储层与盖层共同构成的还原性地层环境,其还原性主要由矿物组成(富铁镁矿物、硫化物)、流体性质(还原型流体,如含 H_2S 、 CH_4 流体,缺乏游离氧等)及地球化学条件(低氧逸度)决定。

(1) 储层。

与传统油气储层不同,对氢气有效的“储集体”更强调对氢气的“滞留或吸附能力”,主要包含:①吸附性岩层:富黏土矿物(海泡石、绿泥石和蒙脱石等)^[66-67]或高变质、高有机质丰度且发育微孔的煤岩^[68];②含水层:可溶解储存氢气,并因其低渗透性构成水力封闭;③孔隙型岩层:常规砂岩、孔隙发育的碳酸盐岩和火山岩^[69]。

(2) 盖层。

虽然氢气的分子直径远小于传统盖层的孔喉直径,但泥页岩、盐岩、灰岩、蒸发岩和火成岩等低孔低渗的致密岩层依旧是氢气成藏的优选盖层。例如,在马里 Bourakebougou 地区中辉绿岩就对天然氢起到了较强的封闭作用。

(3) 其他因素。

烃类气、氮气和氦气等其他气体的竞争性吸附和动态聚集对天然氢保存具有双重效应:一方面,竞争性吸附会占据岩层吸附位点,不利于高含量氢气藏的形成;另一方面,在特定条件下(如混合气柱形成压力封闭),竞争性吸附可抑制氢气扩散,增强保存效果^[42, 60](图6),因此,需综合考虑地质背景与气体组合特征,客观评价竞争性吸附对天然氢保存的影响。

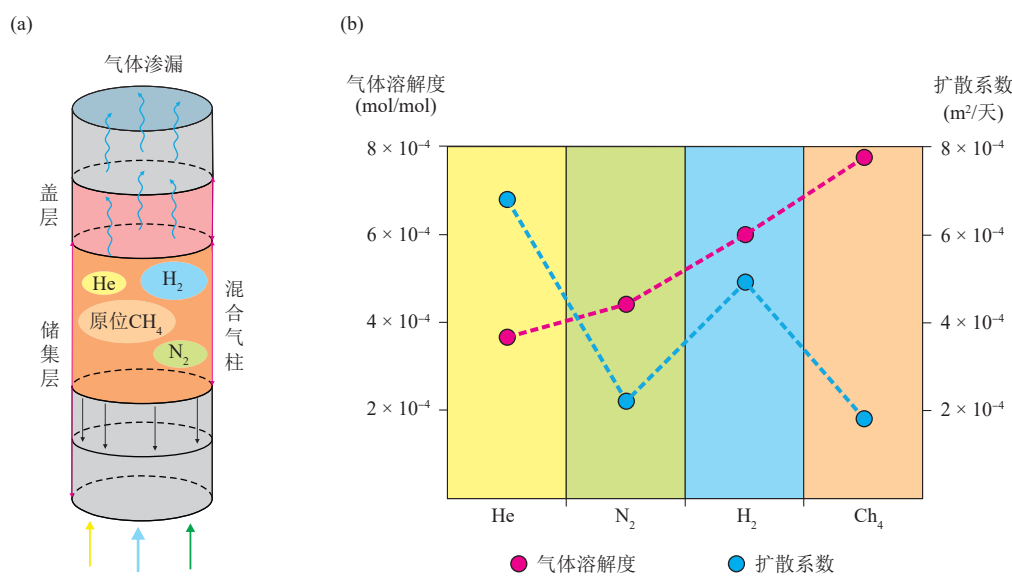


图6 天然氢气的动态聚集模型及其物理性质 (据参考文献 [60, 70])

Fig. 6 The dynamic aggregation model of natural hydrogen gas and its physical properties (according to Ref. [60, 70])

(a)天然氢气以“混合气体”的形式动态聚集;(b)地温梯度为20 °C/km,深度为1000 m的氢气、氦气、氮气和甲烷的扩散系数以及气体溶解度

5 天然氢系统及相关成藏模式

5.1 天然氢系统

目前,我国对天然氢气藏的研究整体仍处于系统化和规模化的初期。我国在松辽盆地、四川盆地等地区对氢气及富氢天然气已有多年的研究积累,形成了一定的研究基础^[71-75]。天然氢系统与油气系统的关系可概括为“核心要素相通,关键特征有别”:二者均需满足“生、储、盖、圈、运、保”六大成藏要素,但在核心特征上存在显著差异(图7)^[18]:

(1) 源岩与成因:天然氢源岩类型更丰富(岩浆岩、沉积岩、变质岩均有涉及),成因以无

机成因为主,有机成因为辅;油气以沉积岩中有机质生成为主;

(2) 成藏时间尺度:天然氢成藏时间尺度较短(千年至万年),具有可再生性;油气成藏时间尺度较长(百万年),属于不可再生资源;

(3) 运移与保存:天然氢扩散性更强,对运移通道的连通性和盖层封闭性要求更高,且需还原性环境;油气保存对还原性环境要求相对较低;

(4) 流体依赖性:天然氢成藏对水的依赖性更强(水既是原料也是载体);油气成藏中水的作用以运移载体为主。

在天然氢系统中,应重点关注“源、运、储”三方面:①源(生):天然氢富集成藏的“灵魂”,

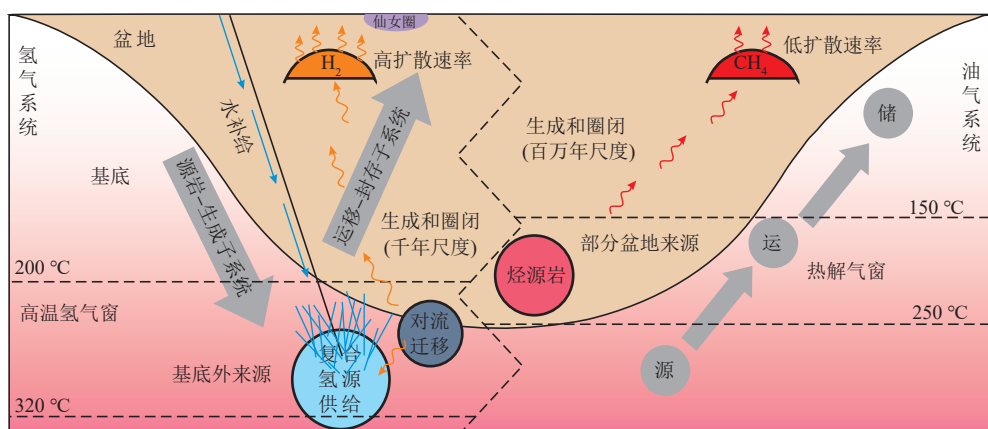


图7 氢气系统与油气系统对比 (据参考文献 [18, 76] 修改)

Fig. 7 Comparison of hydrogen system and oil-gas system (modified from Ref. [18, 76])

需生成量远大于逸散及消耗损失量；②运：连接氢源及储盖层的“骨架”，为天然氢生成后运移与补充通道；③储（聚）：天然氢富集成藏的“躯体”，为天然氢赋存提供良好的还原封闭条件。

5.2 天然氢相关成藏模式

与油气成藏机制类似，天然氢的有效成藏也需满足“生、储、盖、圈、运、保”六大要素。其中，优质氢源是氢气富集的基础，有利的运移通道与盖层封闭性共同构成天然氢成藏的关键要素，多种有利地质条件的交汇部位则是寻找富氢藏的重点靶区^[57, 60]。基于天然氢系统框架，整合国内外学者提出的成藏模型：板块碰撞模型（图8a, b-②）^[76-77]、Christopher天然氢成藏模型（图8a）^[78]、盆地内部模型（图8b-①）^[80]、宾立荣天然氢成藏模型（图8b）^[57]和海底天然氢成藏模型（图8c）^[32, 81]，按照“地质背景-成藏要素-核心特征-勘探意义”的逻辑，将天然氢成藏模式归纳为5类：板块碰撞带、沉积盆地内部、大陆裂谷带、前寒武纪克拉通基底以及海底系统成藏模式（表2），明确其共性与差异：

五大成藏模式的共性在于均满足“生-运-聚”核心逻辑：（1）有效的氢源（无论何种类型）是基础；（2）断裂系统是垂向运移的核心；（3）特殊的“储-盖”体（吸附层、含水层、致密层）对弥补氢气易扩散缺陷至关重要。

而差异主要体现在氢源类型和地质背景：（1）主导氢源类型：活动构造带（板块碰撞带、大陆裂谷带和海底系统成藏模式）以无机成因（蛇纹石化、深源脱气）为主；稳定区（沉积盆地内部和前寒武纪克拉通基底成藏模式）则有机与无机成因混合贡献更显著。（2）系统开放度：海底系统、裂谷系统更开放，氢气持续生成运移；克拉通、盆地内部系统相对封闭，更强调长期保存。

上述模型虽侧重不同，但均印证了“源-运-聚”动态系统的普适性。因此，勘探选区应遵循“源-运-聚”匹配原则。在活动构造带，应围绕蛇纹岩带、深大断裂带，寻找有利的构造-岩性组合；在稳定区沉积盆地，应聚焦高成熟烃源岩区、富放射性层段，并评价盖层的封闭有效性。无论何种背景，断裂系统和特殊岩性（黏土岩、煤系、

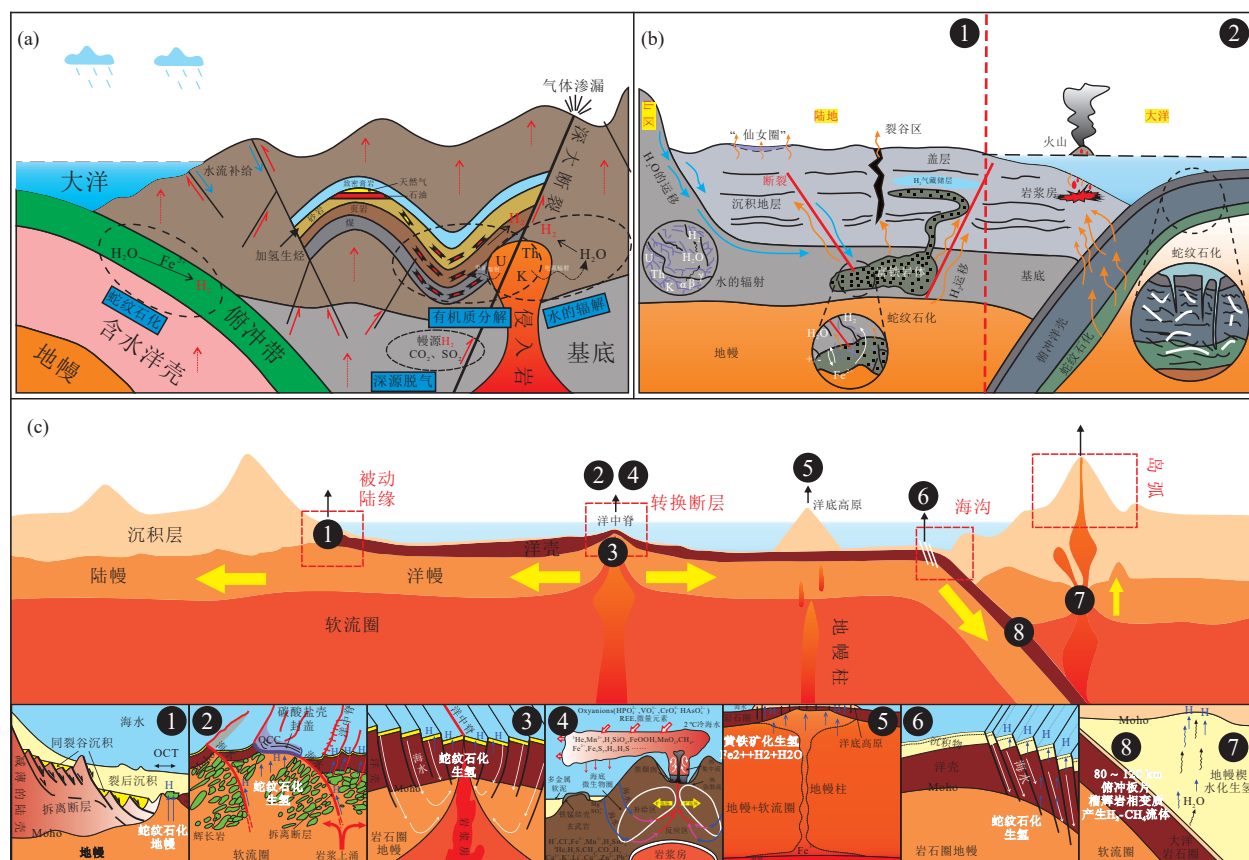


图8 不同地质背景下天然氢成藏模式（据参考文献[32, 60, 77, 82]修改）

Fig. 8 Model diagram of natural hydrogen accumulation patterns under different geological backgrounds (modified from Ref. [32, 60, 77, 82])

表 2 全球主要天然氢成藏模式分类

Table 2 Major natural hydrogen reservoir formation patterns worldwide

成藏模式	地质背景	典型地区 /盆地	成藏要素				聚集场所	核心特征	勘探意义
			氢源	运移通道	储层	盖层			
板块碰撞带模式 图 8a,b-②	板块碰撞带及俯冲带周边	古特提斯造山带、环太平洋俯冲带	水-岩反应和深源脱气	深大断裂及板块内部断裂	蛇绿岩带内碳酸盐岩、火山岩	致密泥页岩、辉绿岩	构造/岩性圈闭	多源混合成藏,成藏规模较大,受板块运动周期性控制	全球高丰度天然氢的重要勘探靶区,如地中海周边、喜马拉雅造山带前缘
沉积盆地内部模式 图 8b-①	含油气沉积盆地内部、成熟烃源岩分布区	松辽盆地、四川盆地	有机质热分解、烃源岩辐解及深部水-岩反应	断层、裂缝及渗透性砂体	致密砂岩、碳酸盐岩、煤岩	区域性泥页岩	与常规油气藏类似的构造、岩性圈闭,常与干气藏、氢气藏伴生	以有机-无机混合成因为主,成藏规模中等,受烃源岩成熟度及断裂活动控制	契合我国盆地深层勘探战略,具有就近利用的区位优势
大陆裂谷带模式 图 8b	大陆裂谷及伸展盆地	东非大裂谷、汾渭裂谷	深源脱气、岩浆活动相关水-岩反应	裂谷边界大断裂、火山通道	火山岩、碎屑岩	火山岩盖层、蒸发岩	断裂旁的孔隙性储层、不整合面下的风化壳、局部构造高点	成藏速率快,可再生性强,伴随地热资源共生	成藏条件简单易识别,是天然氢勘探的优先突破区
前寒武纪克拉通基底模式 图 8b-①	前寒武纪大陆基底	北美克拉通、华北克拉通	前寒武纪地层水-岩反应、深源脱气	基底断裂、花岗岩体裂隙	基底砂岩、变质岩	上覆沉积盖层、致密花岗岩	基底顶面风化壳、上覆沉积盖层中的地层	氢气滞留时间长,保存条件好,资源潜力稳定	适合长期开发利用,是稳定型天然氢资源的重要勘探区
海底系统模式 图 8c	洋中脊、被动陆缘洋陆转换带、海底火山带		水-岩反应	伸展构造、断层、洋中脊扩张中心	碳酸盐壳、钙质软泥、方解石脉	含水饱和和黏土矿物岩层	海底沉积物(富含黏土矿物或有机质)、天然气水合物稳定带、局部碳酸盐结壳之下	成藏规模大,分布广泛,与海底热液、多金属硫化物共生	全球天然氢资源潜力最大的区域,但勘探技术要求高

膏盐层)都是需要重点关注的对象。其中,大陆裂谷带成藏模式和沉积盆地内部成藏模式更符合我国地质条件,具有优先勘探开发的现实意义。

6 结论与展望

(1)天然氢的成因具有多元性,以无机成因(深源脱气、水-岩反应)为主,有机成因(有机质分解、微生物作用)为辅,不同成因类型在地质背景、氢源岩石及形成条件上存在显著差异,且多源混合成藏是普遍现象。同时,因其在实际地质体中常为多源混合产物,给准确判识带来挑战。现有地球化学判识方法(如 δD_{H_2} 、 $^3He/^4He$)在简单端元下有效,但在复杂混合和次生改造背景下局限性显著。

(2)天然氢的赋存状态受温压条件与地质背景控制,浅部以游离态、溶解态、吸附态为主,深部以金属氢化物形式存在。其富集成藏并非依赖传统油气储层的孔隙储集和盖层的毛细管封闭,而更依赖于“吸附性岩层”(黏土岩、煤岩)、“溶解性介质”(含水层)对氢气的滞留作用,以及低渗透盖层对扩散速率的极大延缓,并在还原性地化环境中得以保存。

(3)天然氢成藏遵循“生-运-聚”核心逻辑。优质有效的氢源是基础,断裂系统(尤其是跨圈层深大断裂)是高效的垂向运移通道,特殊的“储-盖”配置与还原环境是聚集保存的关键,这三大关键要素的耦合关系决定了成藏规模与富集程度。此外,勘探选区也应遵循“源-运-聚”匹配原则,在活动构造带聚焦蛇纹石化与深源脱气,在稳定区盆

地关注有机-无机耦合生氢与有效保存。

(4) 天然氢系统与油气系统在成藏要素上相通,但在成因、成藏时间尺度、保存条件等方面存在本质差异,需建立针对性的研究方法 with 勘探技术体系。此外,天然氢系统具有显著的动态性和潜在可再生性,区别于油气的“静态圈闭”成藏。

(5) 基于主导地质背景和成藏要素,可整合归纳出板块碰撞带、沉积盆地内部、大陆裂谷带、前寒武纪克拉通基底以及海底系统等五种成藏模式,覆盖了全球主要天然氢分布区。其中,大陆裂谷带和沉积盆地内部成藏模式对我国天然氢勘探具有重要指导意义。

目前,天然氢资源的勘探开发正加速推进。未来需从多学科交叉视角出发,融合地质学、地球化学、地球物理学、微生物学、油气工程等知识,从地球系统科学角度审视氢元素在地球圈层中的循环与富集规律;同时构建符合我国地质特色的天然氢资源评价方法,开展含油气盆地、蛇绿岩带等重点区域的资源潜力评估,推动我国天然氢勘探开发实现突破,为能源转型与碳中和目标的实现提供重要支撑。

参考文献:

- [1] 世界能源发展简史[J]. 太阳能, 1991(1): 3.
- [2] 邹才能, 张福东, 郑德温, 等. 人工制氢及氢工业在我国“能源自主”中的战略地位[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 1-10.
- [3] FENG Y, YAN T, ZHANG C, et al. Assessing the internal nexus of energy transition at the global level: Insights from triple aspects of scale, structure, and efficiency[J]. Energy, 2025, 320: 135039.
- [4] ROQUE C A B, CAVALCANTI C H M, BRASILEIRO F P P, et al. Hydrogen-powered future: Catalyzing energy transition, industry decarbonization and sustainable economic development: A review[J]. Gondwana Research, 2025, 140: 159-180.
- [5] GOMONOV K, PERMANA C T, HANDOKO C T. The growing demand for hydrogen: current trends, sectoral analysis, and future projections[J]. Unconventional Resources, 2025, 6: 100176.
- [6] 刘贵洲, 窦立荣, 黄永章, 等. 氢能利用的瓶颈分析与前景展望[J]. 天然气与石油, 2021, 39(3): 1-9.
- [7] 国家能源局. 国家能源局举行新闻发布会 介绍《中国氢能发展报告(2025)》相关情况[EB/OL]. 国家能源局, 2025-04-28. <https://www.nea.gov.cn/20250428/95f44cc519d445ea811a5d381ab8a5f6/c.html>.
- [8] PRINZHOFFER A, TAHARA 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.
- [9] 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.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 氢系统安全的基本要求: GB/T 29729—2022 (代替 GB/T 29729—2013)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [11] 崔亚林. 液氢环境下超导电缆结构设计 with 性能分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [12] TIAN Q, YAO S, SHAO M, 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.
- [13] 李丽雯. 英国要用核电制氢引争议[N]. 中国能源报, 2021-08-09(006).
- [14] 源于核能的“第四类氢”: 欧美或将率先实现实用化[EB/OL]. (2022-03-07)[2026-01-21]. <https://x.aipatent.com/源于核能的“第四类氢”: 欧美或将率先实现实用化/eed81420-9de6-11ec-82e0-dd6acc75ce49>.
- [15] 薛世华. 氢能的色彩与减碳[J]. 中国石油和化工产业观察, 2023(2): 25-26.
- [16] HAND E. Hidden hydrogen: Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel?[J]. Science, 2023, 379: 630-636.
- [17] ZGONNIK V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 203: 103140.
- [18] 房大任, 裴秋明, 王海华, 等. 天然氢气成因与全球氢资源勘探进展[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(6): 989-1007, 1021.
- [19] 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.
- [20] 张青岚, 李雪洁, 曾祥峰, 等. 微生物氢气循环过程及其生态环境效应[J]. 生态学杂志, 2025, 44(11): 3801-3814.
- [21] 秦臻, 陶辉飞, 康锐, 等. 天然氢成因类型及中国富氢天然气藏氢气特征[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(11): 2107-2122.
- [22] 帅燕华, 张水昌, 苏爱国, 等. 柴达木盆地三湖地区产甲烷作用仍在强烈进行的地球化学证据[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(6): 734-740.
- [23] ADAM N, PERNER M. Microbially mediated hydrogen cycling in deep-sea hydrothermal vents[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 2873.
- [24] TRUCHE L, MCCOLLOM T M, MARTINEZ I. Hydrogen and abiotic hydrocarbons: molecules that change the world[J]. Elements, 2020, 16(1): 13-18.
- [25] MÉNEZ B. Abiotic hydrogen and methane: Fuels for life[J]. Elements, 2020, 16(1): 39-46.
- [26] XI S, SUN Q, HUANG R, et al. Different magmatic-hydrothermal fluids at the same magma source support distinct microbial communities: Evidence from in situ detection[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023, 128(5): e2023JC019703.

- [27] LIU X D, WANG Q, JIA W L, et al. Pyrolysis of an organic-rich shale containing type II kerogen before and after oil generation and expulsion: Implications for the generation of late hydrocarbon and hydrogen gases [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 173: 106105.
- [28] 安思润, 黄亮, 曲自硕, 等. 干酪根热演化过程中热解生氢分子机理[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36 (11): 2143–2153.
- [29] WANG W, LIU C, ZHANG D, et al. Radiogenesis of low maturity natural gas in the Turpan–Hami Basin, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 202094, 164473905.
- [30] 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.
- [31] 刘成林, 黄逸扬, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带圈层结构与潜在氢源[J]. *天然气地球科学*, 2025, 1–20[2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20251111.0912.002>.
- [32] 索艳慧, 姜兆霞, 李三忠, 等. 海底氢气成藏模式与全球分布[J]. *地学前缘*, 2024, 31(4): 175–182.
- [33] 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.
- [34] CAËR S L. Water radiolysis: influence of oxide surfaces on H₂ production under ionizing radiation [J]. *Water*, 2011, 3 (1): 235–253.
- [35] MILKOV A V. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration[J]. *Earth–Science Reviews*, 2022, 230: 104063.
- [36] 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.
- [37] 刘全有, 金之钧, 张殿伟, 等. 塔里木盆地天然气地球化学特征与成因类型研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 234–237.
- [38] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 236–255.
- [39] 金之钧, 胡文瑄, 张刘平, 等. 深部流体活动及油气成藏效应[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 133–142.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 李强, 孟庆强, 韩超, 等. 天然氢赋存状态及转化机制[J]. *中国地质调查*, 2024, 11(5): 9–20.
- [43] STOLTEN D, EMONTS B. Hydrogen science and engineering: Materials, processes, systems and technology [M]. Weinheim: Wiley, 2016.
- [44] LEACHMAN J W, JACOBSEN R T, PENONCELLO S G, et al. Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2009, 38(3): 721–748.
- [45] SILVERA I F, COLE J W. Metallic hydrogen: The most powerful rocket fuel yet to exist [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 215: 012194.
- [46] LU W, JIN Z J, CHEN X, et al. The origin and occurrence of natural hydrogen [J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2400.
- [47] 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.
- [48] 宇波, 李敬法, 田坤, 等. 天然氢勘探开发与集输研究现状及展望[J]. *油气储运*, 2025, 44(3): 241–260.
- [49] 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.
- [50] ЩЕРБАКОВ А. Проблема водородных подземных флюидов. Дегазация Земли и геотектоника [M]. Москва: Наука, 1985: 164–165.
- [51] 谢丽颖, 刘贺, 李晓雨, 等. 氢气在石油体系中的传质溶解[J]. *化工进展*, 2026, 45(02): 759–769.
- [52] LU W, JIN Z J, LIU Q Y, 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(B): 261–275.
- [53] 韩双彪, 王缙, 黄劼, 等. 松辽盆地大陆科学钻探井天然氢气吸附特征及赋存规律[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46 (2): 462–477.
- [54] 杨文采. 地球内部可能利用的天然氢气[J]. *科技导报*, 2024, 42(15): 7–14.
- [55] SMITH N J P, SHEPHERD T J, STYLES M T, et al. Hydrogen exploration: A review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe [C]//Geological Society London Petroleum Geology Conference Series, 2005, 6(2): 349–358.
- [56] LIU J, LIU Q, XU H, et al. Genesis and energy significance of natural hydrogen [J]. *Unconventional Resources*, 2023, 3: 176–182.
- [57] 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.
- [58] DILEK Y, FURNES H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123 (3–4): 387–411.
- [59] LEFEUVRE 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] 侯佳凯, 朱光有, 朱紫光, 等. 高含氢天然气藏中天然氢气的成因机制、分布特征及富集机理[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(11): 2123–2142.
- [61] 陶士振, 杨怡青, 张功成, 等. 跨圈层油气系统与石油地质学发展新方向[J]. *地学前缘*, 2025, 32(05): 205–219.
- [62] 卢焕章. 地球中的流体和穿越层圈构造[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(6): 1003–1012.
- [63] KAWKES H. Geothermal hydrogen [Z]. *Mining Engineering*, 1980, 671–675.
- [64] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机–无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 499–520.

- [65] LIU Q Y, ZHU D Y, JIN Z J, et al. Influence of volcanic activities on redox chemistry changes linked to the enhancement of the ancient Sinian source rocks in the Yangtze craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 327: 196 – 210.
- [66] 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.
- [67] WANG L, CHENG J, JIN Z J, et al. High-pressure hydrogen adsorption in clay minerals: Insights on natural hydrogen exploration[J]. *Fuel*, 2023, 353: 129219.
- [68] 韩双彪, 王缙, 黄劫, 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 王晓梅, 何坤, 杨春龙, 等. 四川盆地深层天然氢气形成机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2025, 55(2): 596 – 612.
- [72] 刘全有, 魏永波, 朱东亚, 等. 沉积盆地稀贵气体形成与富集机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2025, 55(10): 3401 – 3420.
- [73] 田家英, 秦臻, 刘雨桐, 等. 柴达木盆地阿尔金山前天然气藏中氢气地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(11): 2154 – 2164.
- [74] 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.
- [75] JIA J L, LU M J, YIN B C, et al. Discovery of large-scale natural hydrogen leakage in the Zhangbei Basin, North China[J]. *Science Bulletin*, 2025, 70(13): 2080 – 2083.
- [76] VACQUAND C, DEVILLE E, BEAUMONT V, et al. Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H_2 - CH_4 - N_2 gas mixtures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 223: 437 – 461.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] JACKSON O, LAWRENCE S R, HUTCHINSON I P, et al. Natural hydrogen: Sources, systems and exploration plays[J]. *Geoenergy*, 2024, 2(1): geoenergy2024 – 002.
- [80] ELLIS G, GELMAN S E. A preliminary model of global subsurface natural hydrogen resource potential[C]//*Geological Society of America Abstracts*, 2022, 54: 380270.
- [81] 李三忠, 索艳慧, 姜兆霞, 等. 氢构造与海底氢能系统[J]. *科学通报*, 2024, 69(32): 4696 – 4703.
- [82] 肖宇, 孟强, 赵恒, 等. 氢气与天然气的深部地质交互: 成因机制与有机-无机相互作用[J]. *天然气地球科学*, 2026, 37(1): 163 – 177.