

# 新质生产力视域下我国新兴气体能源创新发展研究

仲冰<sup>1</sup>, 韩颜如<sup>1</sup>, 张国生<sup>2</sup>, 梁英波<sup>2</sup>, 张博<sup>3\*</sup>, 刘合<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 厦门大学管理学院, 福建厦门 361005; 4. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712)

**摘要:** 工业革命以来的历次生产力跃升都以能源转型为重要驱动力, 能源品种的更新迭代是带动产业转型升级、推动经济秩序重构的变革性力量, 催生先进生产力质态; 全球正在兴起以非常规天然气、生物天然气(或生物燃气)、氢气、氨气等为代表的新兴气体能源的发展浪潮, 为能源科技创新、经济社会可持续发展持续注入新动能。鉴于已有研究和实践缺乏对于新兴气体能源的综合把握与系统审视, 本文在新质生产力视域下概览新兴气体能源发展的宏观背景, 剖析我国发展新兴气体能源的现实意义、产业基础、政策支撑, 研判新兴气体能源的发展愿景、方向与模式, 进而提出新兴气体能源发展建议。研究认为, 发展新兴气体能源是能源领域新质生产力形成的重要方向之一, 其规模化应用将改变未来能源格局, 革新传统天然气工业与燃气行业, 塑造新的气体能源工业形态; 应结合我国能源转型进程, 精准把握新兴气体能源发展的价值、战略、技术、定位, 将新兴气体能源列为新型能源体系建设的关键组成部分、实现能源强国的重大战略选择。进一步在顶层设计、制度保障、科技支撑、生态构建等方面探讨发展要点, 以期促成我国新兴气体能源产业朝着安全、绿色、多元、融合方向演进。

**关键词:** 新兴气体能源; 氢能; 氨能; 多气互补; 多能融合; 能源转型

**中图分类号:** F426 **文献标识码:** A

## Innovative Development of Emerging Gas Energy in China from the Perspective of New-Quality Productive Forces

Zhong Bing<sup>1</sup>, Han Yanru<sup>1</sup>, Zhang Guosheng<sup>2</sup>, Liang Yingbo<sup>2</sup>, Zhang Bo<sup>3\*</sup>, Liu He<sup>4</sup>

(1. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 3. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 4. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Energy transition has been a vital driving force for every major leap in productivity ever since the Industrial Revolution. The renewal and iteration of energy varieties is a transformative force that drives industrial transformation and upgrading, promotes the reconstruction of economic order, and gives birth to advanced productive forces. The global development wave of emerging gas energy, represented by unconventional natural gas, biogas, hydrogen, and ammonia, has been rising, injecting new momentums into

**收稿日期:** 2024-02-07; **修回日期:** 2024-03-13

**通讯作者:** \*张博, 厦门大学管理学院教授, 研究方向为能源经济与战略管理; E-mail: zhangbo@xmu.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“面向2040的我国能源系统转型重大风险防控战略研究”(2023-ZCQ-11), “中国中长期甲烷控排战略研究”(2023-XZ-44); 国家自然科学基金项目(72088101, 72374175)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

the energy technology innovation and sustainable economic and social development. However, the existing research and practice lack a systematic review of the emerging gas energy development. This study summarizes the macro development background of emerging gas energy sources from the perspective of new-quality productive forces and analyzes the practical significance, industrial foundation, and policy support for developing the emerging gas energy in China. It also clarifies the development vision, direction, and mode of the emerging gas energy sources, and proposes corresponding suggestions. Developing the emerging gas energy is crucial for forming new-quality productive forces in the energy field. The large-scale utilization of emerging gas energy sources will change the energy landscape, innovate the traditional natural gas industry, and shape a new form of gas energy industry. Combined with the process of China's energy transition, this study suggests that the development value, strategy, technology, and market positioning of the emerging gas energy sources should be accurately clarified. The emerging gas energy should be listed as a core component of the new energy system to strengthen China's energy sector. This study further explores the key points of development from the aspects of top-level design, institutional guarantee, scientific and technological support, and ecological construction, thus to promote the safe, green, diversified, and integrated evolution of China's emerging gas energy industry.

**Keywords:** emerging gas energy; hydrogen energy; ammonia energy; multi-gas complementation; multi-energy fusion; energy transition

### 一、前言

作为人类生产生活最基础性的要素之一，能源被誉为工业的“粮食”、国民经济的“命脉”。自工业革命以来，每一次生产力的大幅跃迁都以能源转型为重要驱动力、能源品种的更新迭代为主要表征，能源革命带动产业转型升级并推动经济秩序重构。当前，新兴气体能源以清洁、低碳、高效、灵活的特性，成为推动我国能源转型进程、促进新质生产力形成的变革性力量。新质生产力也是绿色生产力，能源的绿色低碳和高质量发展是形成绿色生产力的关键。因此，新兴气体能源产业的培育与发展，为催生先进生产力质态、驱动新质生产力形成注入了强劲动能。

传统意义上的气体能源主要指常规天然气。常规天然气是全球电力和热力供应的主要燃料来源，也是现代工业的重要原料，又因其兼具调节灵活、响应迅速等特征<sup>[1,2]</sup>，在电力系统调峰、工业领域减排等方面发挥着关键作用<sup>[3]</sup>，成为现代能源体系的重要组成部分<sup>[4]</sup>。面对能源安全问题、温室气体减排压力，常规天然气被视为通往碳中和的“桥梁”能源类型<sup>[5,6]</sup>。已有研究评估了我国2060年前天然气需求的不同情景，即使在深度脱碳情景下，未来10 a的天然气需求量仍将显著增长<sup>[7-9]</sup>。这一趋势反映出常规天然气在未来能源格局中具有关键地位。

有别于常规天然气，一些新的气体能源品种或类型受能源科技创新、能源产业体系变革的驱动而出现，具有低碳、零碳甚至脱碳特性，展现出巨大的经济、环境和气候价值，受到国内外的广泛关注。例如，国际天然气联盟已经将该组织范畴定义

中的Gas扩充为Gases<sup>[10]</sup>。为了构建更加多元的气体能源供应体系，有研究提出了积极推动非常规天然气（如页岩气、煤层气）和生物天然气的开发策略<sup>[11,12]</sup>，旨在丰富和改善能源结构，增强能源供给的安全性；论证了天然气与风能、太阳能、氢能、地热、生物质能等新能源融合发展的可行性与经济性，预测了沼气、氢能、氨能的发展规模，认为融合发展模式是实现“双碳”目标的有效途径，但面临技术、经济、社会等层面的制约与挑战<sup>[13,14]</sup>。此外，氢基能源、氢氨融合、氢氨醇一体化、气电或电氢融合、综合能源系统等新兴融合模式不断被提出，将促进多能源互补与集成优化<sup>[15-18]</sup>，推动各种气体能源在能源体系中发挥更大的作用。

也要注意，尽管新兴气体能源具有诸多优势和显著的发展潜力，但已有研究多从单一气体能源品种、某一类型能源的局部角度出发论述气体能源的发展，未能系统把握气体能源工业全貌，有关新兴气体能源发展的系统性认知不显深刻，可能引发“只见树木不见森林”的错觉。系统化、集成化的新兴气体能源发展模式 and 战略框架引导等依然缺失，使不同的气体能源处于分散且碎片化的定位与规划状态，不利于科学推进研发、应用、标准制定、管理制度等；也不便开展统一规划和高效协调，相关资源的整合难度较大，甚至出现顾此失彼、厚此薄彼、无序发展的状态，制约新兴气体能源产业的发展质量，构成气体能源与其他能源形式有机融合的障碍。因此，将新兴气体能源有效融入现有的能源体系，实现不同能源形式的互补和协同，是能源领域亟待解决的关键问题，具有鲜明的理论辨析与应用探讨价值。

发展新兴气体能源，既是能源领域构建新质生产力的重要组成部分，又是推动和支撑新质生产力形成的重要的能源资源基础。鉴于全球新兴气体能源蓬勃发展且有望成为引领能源产业变革的战略方向，本文界定相应概念内涵与独特价值，结合国内外能源发展形势、加速新质生产力形成的宏观背景，剖析发展新兴气体能源的现实意义、产业基础、政策支撑条件，提出我国相应发展方向与典型模式，以期为新兴气体能源高质量发展提供基础参考。

## 二、新兴气体能源发展的宏观背景

### (一) 新兴气体能源的概念内涵

新兴气体能源指传统气体能源之外的各种气体能源形式，多由前沿技术突破所催生，其产业发展尚处于萌芽期、培育期或成长期。新兴气体能源具有来源广泛、品种多样、类型多元的特点，兼具灵活转化能力，如转化为固态、液态、混合态等形式存在；可细分为碳基气体能源、非碳基气体能源两大类。

碳基气体能源主要包括非常规天然气、生物天然气（或生物燃气）、新型（碳基）合成气。对于非常规天然气，得益于开采技术的突破，已实现页岩气、致密气、深层煤层气、煤岩气等资源的规模化开发和利用。生物天然气、生物燃气合称生物气，主要由沼气净化提纯后得到，作为一种可再生燃气，因农业废弃物、动物粪便、有机废水等原料来源丰富而具有规模化开发利用的潜力。新型合成气主要指应用新型制备转化技术生产的碳基气体能源、合成后的气体能源产品，也包括以煤炭地下气化为来源的能源产品；碳基气体能源在开发利用过程中相对清洁，可对大气污染治理、温室气体减排产生积极贡献。

非碳基气体能源主要指氢气、氨气等以气体形式存在的能源。氢气多来自化石燃料重整制氢、工业副产氢、可再生能源电解水制氢、核能制氢、天然地质氢等。氨气是一种无碳化合物，通常由氮气和氢气在高压、高温以及催化剂存在条件下合成，易于液化，方便储存和运输，有望解决氢气储运难题，被视为推动氢能向泛氢能源发展的关键能源类型。非碳基气体能源都属于低碳、零碳甚至脱碳能源范畴，在能源效率、安全性、可持续性方面展现

出显著优势。

从全球能源工业发展实践来看，新兴气体能源能够充分利用现有的天然气基础设施，降低能源转型的成本和难度，或是未来天然气管网净零排放的最佳替代方案；将与常规天然气一道，成为推动全球能源体系朝着更加清洁、低碳、智能方向转型的关键能源类型。例如，新兴气体能源中的非常规天然气、生物气、合成气等，可与常规天然气混合使用，提高能源供应的多样性和安全性；氢气、氨气等非碳基气体能源可作为常规天然气的替代品，广泛应用于交通、电力、工业等领域，支持能源消费的低碳化和脱碳化。可见，与新质生产力相呼应，新兴气体能源既为能源体系的发展革新增加“新”的要素成分，又为能源体系的现代化提供众多“质”的内涵。

### (二) 全球能源发展形势

近年来，全球能源体系正处于深刻变革过程之中，能源结构演变由以化石能源为主逐步转向以可再生能源为主。为此，清洁能源、绿色能源、绿色燃料等成为全球主要经济体竞相投资的关键领域。

天然气作为一种含碳量更低的能源，相比石油、煤炭在能源转型中展现出了更强的发展弹性与过渡性优势。2023年，天然气在全球一次能源消费总量中的占比为23.4%，仅次于石油（29.4%）、煤炭（26.9%）<sup>[19]</sup>。全球可再生能源发展势头迅猛，可再生能源发电量在全球发电总量中的占比不断攀升，如2022年的可再生能源发电占全球发电总量的14.4%，较2012年上升9.7个百分点。可再生能源的规模化发展为氢能、氨能等新兴气体能源的跨越式发展和扩大化应用提供了坚实支撑，而新兴气体能源在更大范围的推广应用与示范，又能促进可再生能源消纳并提高其在能源消费结构中的份额，也使能源转型的技术路线、发展模式等趋于多元化和成熟化。

能源供应的安全性和自主性已成为全球关注的重点。相较传统的化石能源，可再生能源的资源禀赋属性明显减弱，而技术成本属性显著增强。基于能源安全的国家战略考虑，主要国家和地区积极调整能源供应策略，从传统能源的跨区域、远距离、大规模输送模式转向本地化、多元化、点源化供给模式。例如，欧洲作为全球主要的天然气消费和进



口地区，在面临天然气安全稳定供应、2050年实现净零排放目标的双重压力下，提出了发展多样化能源来源来保障能源安全的策略；积极提升可再生气体制备转化与储运技术，升级改造天然气基础设施，增强管网的兼容性，以加速推进生物天然气、可再生氢气等清洁能源对油气等化石能源的替代。

### （三）我国能源发展面临的挑战

我国是世界最大的能源生产国和消费国，正处于构建现代能源体系的关键阶段。当前，新旧风险交织、国际环境错综复杂及不确定性等，给我国能源产业发展带来了前所未有的挑战。从我国能源生产和消费的角度看，2023年的一次能源生产总量为 $4.83 \times 10^9$  tce，能源消费总量为 $5.72 \times 10^9$  tce，即能源自给率为84.4%<sup>[20]</sup>；其中，天然气产量为 $2.324 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>，在一次能源生产总量中的比重约为6%，天然气消费量为 $3.917 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>，在能源消费总量中的比重仅为8.7%<sup>[19]</sup>。当然，我国是北美地区以外首个实现页岩气规模化商业开发的国家，未来天然气仍有较大的发展空间。

2023年，我国非化石能源消费比重达17.2%<sup>[19]</sup>，相比2012年提高了6个百分点。尽管我国非化石能源消费比重在逐年提升，但与2060年非化石能源消费比重达到80%的发展目标相比仍存在较大差距；即使将天然气一并计入，2023年其在能源消费总量中的合计占比也不足30%。这表明，我国在未来数十年内需加快发展清洁能源、低碳能源，稳步降低油气的对外依存度，才能实现能源结构的根本性转变。

目前，我国在非常规天然气、氢能、储能、综合能源服务等领域取得了一定的进展，但仍存在不同能源形式耦合技术成熟度、融合发展模式经济性等方面的问题。后续，我国能源工业需着重推进技术研发和创新，积极培育能源新技术、新模式、新业态，稳步提高能源利用效率和替代能源的经济性，才能实现保障国家能源安全、应对气候变化、促进经济社会可持续发展等多重目标。

### （四）新兴气体能源发展动向

近年来，全球范围内兴起了新兴气体能源的发展浪潮，主要经济体纷纷将发展氢能、氨能等上升为国家战略；超前布局关联产业，追求以廉价、高效、绿色的方式生产和供应气体能源，发展低碳燃

气、生物燃气、低碳清洁氢、绿氢、绿氨等，支持能源绿色低碳转型。在能源转型背景下，新兴气体能源发展势头强劲，非常规天然气、生物天然气、氢气、氨气的开发利用规模均在快速提升。已有较多研究分析了国内外非常规天然气资源的勘探开发潜力，而生物天然气、氢能、氨能等新兴气体能源的发展动向更值得关注。

在生物天然气方面，相关技术和商业化运作模式基本成熟，如英国、美国、德国、荷兰等国家均建立了生物天然气或沼气证书交易体系，在生产、交易、使用方面形成了规范的市场环境；美国拥有全球最大的生物天然气交易市场，欧盟则是全球最大的生物天然气生产地。生物天然气在全球能源市场中的地位正在不断上升，特别是在欧盟，发展生物天然气被视为减少进口天然气、提高能源自给率的有效方式之一。欧盟“REPowerEU计划”提出，2030年的生物CH<sub>4</sub>产量达到 $3.5 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup><sup>[21]</sup>。丹麦作为全球最大的沼气和生物CH<sub>4</sub>生产国，提出了2030年实现100%绿色天然气生产的激进目标，即沼气的产量分别达到 $1.4 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/a、 $4 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a<sup>[22]</sup>。从全球原料供应和潜在需求角度看，生物天然气具有广阔的发展前景。国际能源署（IEA）认为，全球可用于生产沼气、生物CH<sub>4</sub>的原料量巨大，但现有技术水平不高，导致有机废弃物利用率偏低；如能充分利用这些原料，全球生物天然气的产量将能大幅提升，甚至有望满足全球20%的天然气需求<sup>[23]</sup>。

在氢能方面，全球正处于新的发展高潮。发达国家发布了氢能战略，明确了氢能将在未来能源格局中的关键地位。日本长期重视氢能发展，以规模化制备、储运和应用为核心举措来推动实现氢能社会愿景<sup>[24]</sup>。德国将绿氢作为发展氢能产业的战略选择，推动氢能与可再生能源协同发展，布局氢能制备、基础设施建设、应用场景开发等重点内容<sup>[25]</sup>。美国《国家清洁氢能战略和路线图》（2023年）提出，2030年、2040年、2050年的氢产量分别为 $1 \times 10^7$  t、 $2 \times 10^7$  t、 $5 \times 10^7$  t<sup>[26]</sup>。欧盟“清洁氢能联合行动计划”（2022年）规划，2030年的可再生制氢产量达到 $1 \times 10^7$  t<sup>[21]</sup>。在世界各国更加坚定追求净零排放目标的背景下，氢能作为一种清洁、高效的能源形式，面临着持续增长的应用需求，为氢能产业发展提供了坚实的牵引。IEA预计，在2050年实现净零排放的情景下，2030年全球氢气需求量将超过

$1.5 \times 10^8$  t, 2050 年将增长到  $4.3 \times 10^8$  t<sup>[27]</sup>。随着技术进步和可再生能源的发展, 低碳氢供给将在氢能供应中占据主导地位, 可为全球能源体系的绿色低碳转型提供有力支撑。IEA 预计, 2030 年全球低碳氢供给将为  $6.9 \times 10^7$  t, 2050 年将增长至  $4.16 \times 10^8$  t 且基本可以满足氢能使用需求<sup>[27]</sup>。

在氢能方面, 全球现有产量约为  $2.53 \times 10^8$  t, 预计 2030 年绿氢市场规模将为 54.8 亿美元<sup>[28]</sup>。绿氢生产仍处于起步阶段, 尚未实现规模化。一些国家高度重视氢能将在未来能源体系中的地位和作用, 以能源政策支持的方式促进氢能产业发展。日本提出氨煤混烧向纯氨燃烧过渡, 支持电力行业深度脱碳; 2050 年氨需求量将为  $3 \times 10^7$  t, 火力发电厂全面使用含有 50% 氨的混合燃料<sup>[29]</sup>。韩国追求全球第一大氢气和氨气发电国的发展目标, 推广应用氢、氨高温燃烧, 氢、氨与天然气混合燃烧等发电形式。IEA 预计, 在 2050 年实现净零排放的情景下, 全球氨产量约为  $2.24 \times 10^8$  t, 近零排放的氨生产量占总产量的 73%; 电解水制氢合成氨路线产氨  $9.2 \times 10^7$  t/a, 占总产量的 41%<sup>[30]</sup>。

### 三、我国新兴气体能源发展的能力基础

#### (一) 发展新兴气体能源的现实意义

##### 1. 能源安全供给的有效补充

我国天然气对外依存度始终处于高位, 2023 年的天然气供给缺口为  $1.5 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>。研究表明<sup>[31-33]</sup>, 2030 年我国天然气消费量约为  $5.1 \times 10^{11}$ ~ $5.8 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>, 2040 年前后达到  $6 \times 10^{11}$ ~ $6.2 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> 的峰值, 2060 年将降至  $3.2 \times 10^{11}$ ~ $4.8 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>。结合天然气自给率长期不低于 50% 的行业共识, 未来我国天然气缺口峰值约为  $3 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>。当前, 受地缘政治局势紧张、极端事件频发、全球能源转型等因素的共同影响, 国际天然气供应链较为脆弱, 天然气市场价格波动明显。从保障能源安全供给的角度看, 规模化发展新兴气体能源产业并组合使用不同类型的气体能源, 可以有效弥补天然气供应缺口、丰富能源供应体系、提高能源供应多样性和安全性, 也能降低对外部能源的依赖, 增强在国际能源市场上的议价能力和抗风险能力。

##### 2. 资源循环利用的重要途径

发展新兴气体能源产业, 有利于促进资源循环

利用, 推动循环经济发展, 也能实现多种资源和生产要素的集约利用与优化配置, 提高能源资源的综合利用效率。煤层气、生物气的开发利用, 不仅可以显著减少资源浪费和环境污染, 还能有效降低 CH<sub>4</sub> 等温室气体的排放, 提高废弃资源循环利用水平。特别是生物天然气, 作为现代生物质能的一种高效利用形式, 其应用有助于规模化处理有机废弃物, 兼顾生态环境保护、生态农业发展。氢气也可以通过工业副产品制备、可再生能源电解等方式获得, 同样促进资源的循环利用。

#### 3. 能源低碳转型的战略选择

新兴气体能源具有灵活、高效的应用特性, 应用前景广阔。生物天然气、氢能、氨能等作为清洁、高效、应用场景多元的能量载体, 被视为实现减碳和脱碳的关键能源类型。绿氢和绿氨作为零碳燃料, 为推动钢铁、水泥、化工等难脱碳工业部门实现可靠、可负担、可持续的深度脱碳提供了新的路径。氢氨融合技术也将带动氢能和氨能产业协同发展, 推动新兴气体能源和可再生能源规模化发展进入新阶段。以保障日益增长的能源需求为前提, 在能源低碳转型进程中, 特别是碳排放限制、环境规制更为严格的背景下, 技术创新将驱动新兴气体能源的生产成本持续下降, 稳步提高新兴气体能源的市场竞争力; 也将促进新兴气体能源与常规天然气形成新型的竞争与合作关系, 从而影响既有的天然气定价机制。

#### 4. 能源工业体系的变革创新

发展新兴气体能源将对传统的能源工业体系产生直接冲击和深远影响。规模化发展新兴气体能源可显著改变以常规天然气为主体的气体能源工业, 重塑天然气工业和传统燃气行业的既有格局, 变革现有的能源工业体系构成, 推动气体能源行业的高端化、智能化、绿色化发展。随着新兴气体能源与可再生能源、智能电网等的融合发展, 未来的能源系统将更加可靠、智能、互联, 气体能源的生产、输送、储存、消费也将更加高效且灵活地进行配置和优化, 显著增强综合能源产业链、供应链的柔性及韧性。

#### (二) 发展新兴气体能源的产业基础

我国建成了较为完备的能源工业体系, 为新兴气体能源的规模化发展提供了适宜的资源条件和产业环境。可以认为, 我国发展新兴气体能源已经具

备一定的产业基础条件。

### 1. 资源开发潜力巨大

就资源禀赋而言,我国非常规天然气资源,特别是页岩气资源的开发潜力巨大。2022年,天然气新增探明地质储量为 $1.09\times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,其中页岩气、煤层气/煤岩气分别为 $2.13\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>、 $1.31\times 10^{10}$  m<sup>3</sup>,相应累计探明地质储量分别为 $2.89\times 10^{12}$  m<sup>3</sup>、 $8.15\times 10^{11}$  m<sup>3</sup><sup>[34]</sup>。2023年,深部煤层气勘探开发获得重要进展,未来有望成为非常规天然气的重要突破点、整体天然气增产的重要补充。根据测算,2035年的天然气产量为 $2.8\times 10^{11}\sim 3\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>;2040年的天然气产量将达到 $3.1\times 10^{11}\sim 3.3\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>的峰值,非常规天然气产量将突破 $1.5\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,成为天然气增量的重要来源;2060年,非常规天然气的产量占比将为50%<sup>[32-34]</sup>。此外,地下煤炭气化地质资源量为 $2.8\times 10^{14}\sim 3.3\times 10^{14}$  m<sup>3</sup>,约为常规天然气资源量的3倍,与非常规天然气资源量总和基本相当,开发潜力极大<sup>[34]</sup>。应用煤炭地下气化技术,生产CH<sub>4</sub>、氢气、煤气等可燃气,将有效缓解我国富煤少气的资源矛盾。

发展生物天然气同样具有明显的资源优势。我国生物质资源丰富,各类生物质资源总量庞大(约为 $3.7\times 10^9$  t<sup>[35]</sup>),综合生物质资源开发已有实践经验,为大规模开发利用生物气提供了良好条件。据中国沼气协会预测<sup>[36]</sup>,我国2030年、2060年的沼气生产潜力分别为 $1.69\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>、 $3.71\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,折合为生物天然气后的产气潜力分别为 $8\times 10^{10}$  m<sup>3</sup>、 $1.8\times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,可有效弥补天然气供应缺口。

在氢能开发潜力方面,我国是世界最大的制氢国,可再生能源装机量位居全球首位,在清洁低碳的氢能供给方面具有坚实基础。研究预测<sup>[32]</sup>,我国2030年、2045年、2060年氢气的供应量将分别为 $3.81\times 10^7$  t、 $5.807\times 10^7$  t、 $8.58\times 10^7$  t;其中绿氢将成为主导的氢源类型,供应量在2030年增至 $3\times 10^6$  t,2045年突破 $3\times 10^7$  t,2060年达到 $7.68\times 10^7$  t。中国氢能联盟认为<sup>[37]</sup>,我国氢气需求量在2030年为 $3.7\times 10^7$  t,在2050年接近 $6\times 10^7$  t,在2060年约为 $1.3\times 10^8$  t(在终端能源消费总量中的占比约为20%),将对氢气供应形成突出的牵引和导向作用。

### 2. 基础设施趋于完备

从产业设施基础的角度看,我国建成了覆盖主要城市和工业区、较为完善的天然气管道网络,大

型天然气储气库和液化天然气接收站等,为新兴气体能源的长距离输配、规模化应用提供了便利条件。国内外实践表明,利用天然气管道网络基础设施,以掺混生物天然气、氢气等方式,能够实现新兴的低碳、零碳气体能源对传统天然气的补充与替代,且相应过程具有高效率、低成本的优势。随着各地全面铺开加氢站建设,氢能储运加注设备及设施规模快速增长,我国氢能基础设施的网络化已初具雏形。

### 3. 工程科技创新活跃

从工程科技支撑的角度看,我国新兴气体能源技术装备正在取得重大突破。非常规油气领域的钻井技术、装备制造、工程材料等进展显著,为深层油气资源的勘探开发提供了技术装备保障。油气企业加快油气勘探开发与新能源融合发展,推动传统油气生产业务转型为综合能源开发利用业务。煤炭地下气化的能量密度、产气速度、生产效率等优于目前开发的非常规天然气,我国企业突破了地下千米煤层原位气化技术并能稳定产气。在氢能和氨能领域,相关制备、储运、加注、与燃料电池系统集成等方面的关键技术持续进步,装备逐步实现自主化,构建了较为完善的氢氨能产业链。然而,新兴气体能源工程技术仍面临成本、成熟度、安全性等挑战,如电解水制氢的成本偏高,生物天然气全产业链技术的国产化程度不高,新型合成气制备的气化效率有待提高,低成本的氨能供应链与高效率的氨能利用链没有建立,尚待科技创新的持续突破。

## (三) 发展新兴气体能源的政策支撑

自20世纪90年代起,我国政策层面持续关注气体能源的开发利用,推动构建了涵盖常规天然气、页岩气、煤层气、煤制气在内的多元化气体能源体系。在碳达峰、碳中和(“双碳”)目标提出后,氢能、生物天然气等也纳入了国家能源战略以及专门性规划。我国发布了1+N政策体系,从总体目标、主要任务、重大举措、重大工程、标准制定、科技支撑、政策支持等方面出发,为新兴气体能源的发展提供了全面指导和系列支撑。

### 1. 开发环节政策重点

针对气体能源开发,明确提出加大非常规天然气资源(如页岩气、煤层气)的规模化开发力度,



因地制宜发展生物天然气，在特定区域建设大型生物天然气工程设施；将构建清洁、低碳、低成本的多元制氢体系作为关键任务，重点发展可再生能源制氢，推进低碳技术攻关；明确了部分气体能源的近中期发展目标，如 2025 年天然气产量力争达到  $2.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ <sup>[38]</sup>（实际上 2023 年即已实现），煤矿瓦斯利用量达到  $6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[39]</sup>，可再生能源制氢量为  $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5 \text{ t/a}$ <sup>[40]</sup>。

### 2. 储运环节政策重点

针对气体能源储运，为提升能力和效率，要求加快天然气基础设施（如长输管道、区域管网、地下储气库、液化天然气接收站）、掺氢管道、纯氢管道等的建设，鼓励管网互联互通；支持生物天然气等清洁燃料接入油气管网，探索高效输氢方式，构建更为完善的气体能源储运体系。

### 3. 利用环节政策重点

在气体能源利用环节，扶持沼气、生物天然气等生物质能的规模化利用，将氢能的工业、交通运输、建筑的规模化应用作为重点任务，在合成氨、煤制气等行业中开展可再生能源制氢替代化石能源示范，加快构建多元化的氢能应用生态。倡导天然气与多种能源融合发展，加强氢能、生物天然气、氢能的关键技术研发、示范与应用，鼓励建设电、热（冷）、气一体化，多能互补、多能联供的区域综合能源系统，探索能源联合调度机制，切实推动气体能源资源的高效和多元化应用。

## 四、我国新兴气体能源的发展愿景、革新方向与典型模式

### （一）新兴气体能源发展愿景及产业革新方向

新兴气体能源是新一轮科技革命与产业变革背景下衍生出来的全球性新领域。未来的气体能源工业是多种气体有机组合的产业体系，将呈现新质生产力所蕴含的高科技、高效能、高质量特征，涵盖众多类型的低碳、零碳、脱碳气体；能够满足不同领域用户对清洁能源的多样化需求，显著拓展能源工业的发展空间并形成新的增长极，为壮大新兴产业、培育未来产业提供更多的可能性。

新兴气体能源工业将由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生，发展新兴气体能源工业有望摆脱传统的能源生产方式，

实现全要素生产率的大幅提升，支持形成能源领域新质生产力。为此，在战略层面应整体把握新兴气体能源的关键特征与发展特质，精准研判新兴气体能源发展的价值、战略、技术、市场定位，由此开展系统布局。论证提出了我国发展新兴气体能源产业的总体框架构想（见图 1），相应战略愿景为：强化政策支撑、科技支撑、人才支撑、生态支撑，构建以科技创新为驱动、深度协同及跨界融合为路径的新兴气体能源现代产业体系；以实现气体能源工业的安全发展、绿色发展、多元发展、融合发展为导向，驱动能源工业变革、能源系统转型、商业模式创新，培育出新的产业增长极与经济增长点。

一方面，新兴气体能源的发展，应由科技创新主导并将之作为核心驱动力。与依赖资源禀赋的传统化石能源不同，新兴气体能源的高效利用、规模化发展更加依赖技术进步。通过技术突破、工程示范及应用，显著提升气体能源的开发利用效率，拓展产业规模并降低成本，提高应用成熟度与覆盖面。另一方面，深度协同是新兴气体能源发展的核心内容，包括不同能源品种之间、不同能源载体之间、不同能源形态之间、不同能源工业以及终端消费用途之间、相关产业体系之间的全面协同。新兴气体能源与新能源产业以及交通、化工、冶金、建筑、信息技术等行业融合，推动能量流、物质流、信息流汇聚，推动新经济、新技术、新产业发展。

值得指出的是，新兴气体能源涉及的能源品种多样、类型复杂、产业链条长，通过跨领域融合创新，催生新业态和新模式，形成新的产业链和价值链，其中蕴含了巨大的市场机遇和商业潜力。全球性的新兴气体能源发展，也将改变传统的能源供应结构、能源贸易格局，一些具有丰富新兴能源资源的地区将显现比较优势，逐步发展成为新的能源出口国和供应中心，在国际市场的合作与竞争机制中获得增量影响力。这一背景有利于我国参与和推动全球能源治理，也为我国能源企业争取全球能源市场话语权、高水平“走出去”提供了难得的机遇。

### （二）新兴气体能源产业发展的典型模式

#### 1. 一气多源

传统的能源供应较多依赖单一来源，而发展新兴气体能源的开发与制备转化技术，布局新兴气体能源产业链、供应链，将促成气体能源来源的多样

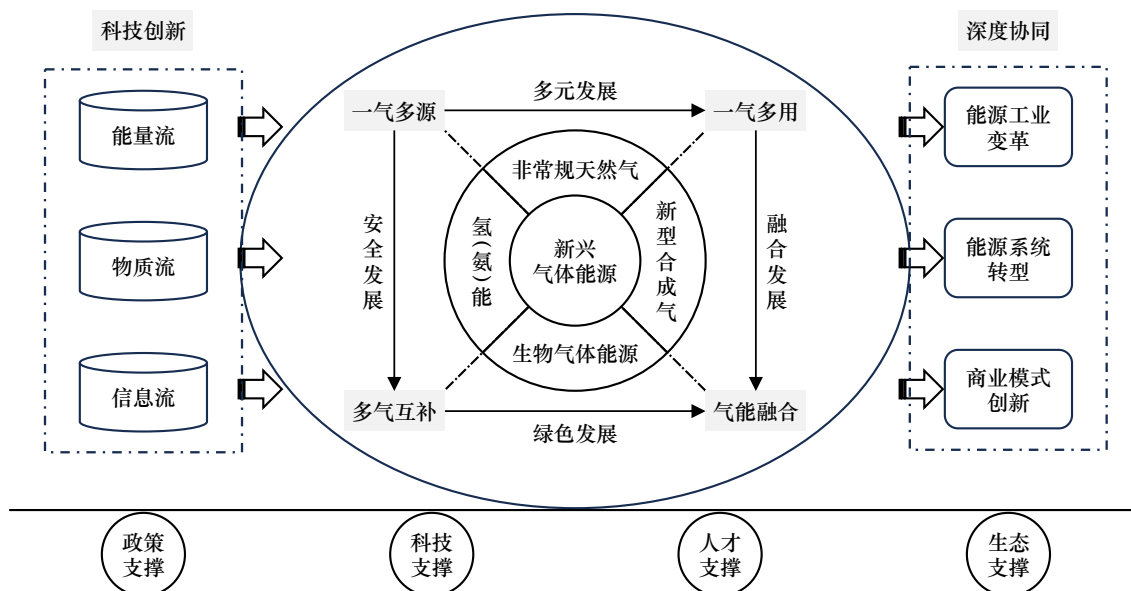


图1 新兴气体能源产业发展的总体框架

化。针对天然气生产供应，在保障常规天然气稳定供应的基础上，积极开发页岩气、煤层气/煤岩气等非常规天然气资源，因地制宜发展生物天然气、沼气、人工合成气，实施新型合成气技术研发与示范，推进地下页岩原位加热、地下煤炭气化等天然气颠覆性技术研发；实现常规天然气与非常规天然气、生物天然气、合成气的协调发展，形成多源化的天然气来源、多元化的新型燃气供应体系。以氢能为重点案例进行深入论述。氢气来源广泛，制氢过程的碳排放水平也不尽相同，但在综合考虑碳排放、工艺成熟度、综合成本等因素的基础上，宜整合各类型氢能制备技术路线：将可再生能源电解水制氢作为未来市场供氢的主体形式，化石能源重整制氢（如煤制氢、天然气制氢，并有条件配置碳捕集、利用与封存）作为氢能转型期内的一个重要过渡形式，工业副产制氢（如焦炉煤气副产氢、氯碱工业副产氢）作为氢源就近供应的重要补充形式，由此实现氢源的多元化以及应用价值最大化。

## 2. 一气多用

就气体能源的用途而言，新兴气体能源应用场景正在不断拓展，某一类型气体可兼作重要的化工原料、高效清洁燃料，同时在工业、电力、建筑、交通运输等领域获得广泛应用。在工业部门，钢铁、水泥、玻璃等产品生产过程中采用新兴气体能源作为原料或燃料，提供还原剂或高温过程所需的能量源；化工行业也利用新兴气体能源作为原料，

生产甲醇、乙炔、合成氨、化肥等产品，实现化学品生产的高端化和绿色化。在电力部门，新兴气体能源作为气电调峰机组用燃料，为新型电力系统提供充分的灵活性。在建筑部门，利用新兴气体能源替代传统化石能源进行建筑供暖，为居民提供更为环保和高效的生活用能解决方案。在交通部门，新兴气体能源相较于其他可再生能源具有更高的能量密度和燃烧效率，特别适用于重型公路运输、水路运输、远洋船舶运输，成为更为低碳和经济的燃料类型。

## 3. 多气互补

各类新兴气体能源特性各异，单一使用时往往难以充分发挥其潜在优势，因而多气互补成为优化选择。利用较为完善的天然气储运基础设施，储输非常规天然气、生物天然气、氢气等新兴气体能源，推动多气混输、多气共用，是实现各类气体能源优势互补、协同发展的重要方式。在天然气、氢能的产业链上，无论是上游制氢、中游储运氢，还是下游用氢，各环节都具有深度融合发展的条件和潜力。应用天然气掺氢技术，不仅能够解决氢气规模化储运难题并降低相关成本，而且可以延续天然气输储设备的商业价值。氢氢融合等新能源技术成为国际清洁能源领域中的前沿性、战略性发展方向，能够有效解决氢能储运难题，为制造业、交通、发电等部门深度脱碳提供解决方案，可促成新兴气体能源工业与其他产业的深度协同。



多气混输与共用也需克服一系列挑战,如基础设施及终端设备的兼容性问题、气体混合后性质变化带来的安全性及处置经济性问题<sup>[41]</sup>。需要针对储运基础设施及应用终端开展适度超前规划,加快相关基础设施建设、现有管网更新改造,提高新兴气体能源并网使用兼容性,推动生物天然气、氢气等能源气体规模化入网。积极构建大型气体能源基地,立足各地的区位优势和资源禀赋,优化现有管网设施体系并提高互联、互通、共享能力,形成新兴气体能源贸易及关联基础设施的“走廊、桥梁、纽带”,发展氢基、氨基等新兴气体能源的关联物流枢纽。将“西气东输”工程升级为更大范围的“西部气体能源东输”工程,实现更广泛的区域能源互联和共享。

#### 4. 气能融合

新兴气体能源可作为供能系统中的枢纽能源类型,与其他形式能源进行相互转化、联合供应与协同应用,实现多能融合,增强综合能源服务能力。建设多能互补的分布式能源系统,将氢气、天然气、生物天然气等气体能源纳入燃料范围,实现电、热(冷)、气的终端集成与联合供应,显著提高能源的综合利用效率。广泛连接可再生能源、化石能源,融合各类型能源的开发利用技术,实现供能系统与用能系统的多向联动。新兴气体能源与其他能源在技术、产品、市场上的融合互动,将催生综合能源系统、新型能源体系构建的新样式,实现智慧能源的跨界融合与多元应用,促成“能源互联网”新形态<sup>[42]</sup>,进而转化为新质生产力发展的新动能与新优势。

## 五、我国新兴气体能源的发展建议

### (一) 明确新兴气体能源发展的顶层设计与战略定位

站位于面向全球市场竞争、加速能源领域新质生产力形成的战略高度,将新兴气体能源确定为我国新型能源体系建设的关键组成部分、实现能源强国的重大战略选择,力争引领全球能源工业发展方向。及时制定国家层面的中长期新兴气体能源发展规划,明确并细化新兴气体能源在现代能源体系建设、“双碳”工作中的定位、目标、路径、任务,创新管理体制及机制,以系统性、全局性地布局新

兴气体能源发展。精准定位新兴气体能源在推进能源革命过程中的作用及价值,防止各类气体能源无序发展,同时推动与其他能源的融合发展。可以财政补贴、税收优惠、金融支持等激励形式,促进可再生气体能源发展,加快构建以天然气为基础、新兴气体能源互为支撑、多气协同互补的气体能源工业体系。

### (二) 建立健全与新兴气体能源发展相适应的体制和机制

规模化发展新兴气体能源需要与之相适应的管理制度、技术体系、标准规范,才能高质量培育新兴气体能源产业并保障其集群式发展。建议创新气体能源管理体制机制,鼓励各级政府发布相关政策并落实优惠措施,破解制约新兴气体能源开发利用的制度和技術瓶颈;综合运用信贷、债券、基金、保险等多种金融工具,支持新兴气体能源的开发利用,加快构建以新兴气体能源为主的绿色产业链和供应链。规划建设国家级新兴气体能源生产供应基地,运输通道(如氢/氢能航道、高速、管网),关联物流枢纽,论证实施“国家氢网”“新兴气体能源基础设施网”“大型新兴气体能源基地”“西部气体能源东输”“国家气体能源走廊”等重大工程。建设新兴气体能源相关的技术标准体系,确保行业安全、有序、可持续发展。加快发展全国统一的能源大市场并完善市场规则。建立气体能源产业绿色发展指导目录和项目库,在能源认证、市场准入、交易体系建设、安全监管保障等方面给予重点支持。

### (三) 加强新兴气体能源发展的科技与人才支撑

瞄准世界能源科技前沿,围绕新兴气体能源技术研发与应用,开展基础与应用研究布局,为新兴气体能源全产业链发展提供坚实的基础理论与技术方法支撑。围绕新兴气体能源工业的关键核心技术及装备,合理加大科技资源投入,实施关键材料、核心技术、先进工艺、高端设备的自主研发与联合攻关。针对新兴气体能源发展的共性与集成性问题,批次性且系列化布局重大科研项目、工程示范平台、产业技术创新机构。注重科研成果转化及运用,开展新兴气体能源工程示范项目建设、创新型企 业孵化,形成包括项目评估、技术支持、市场推广、监管服务在内,可复制、可推广的经验和模

式。创新能源人才培养模式，打破传统能源学科界限，鼓励校企深度合作，确保人才培养与新兴气体能源产业发展需求紧密对接。积极开展能源领域的国际学术交流与合作，引进和培养领军人才并重，高质量参与国际新兴气体能源的学术共同体建设。开展涉及新兴气体能源的推广宣传与科普工作，提高公众对发展新兴气体能源的认知和接受程度，形成广泛的社会共识。

#### (四) 构建“政产学研金服用”机制以协同推进生态圈建设

发展新兴气体能源将产生大量的新技术、新产业、新业态、新商业机会。建设协同创新机制，打破行业壁垒和体制障碍，促进创新资源共享和优化配置，以在新兴气体能源领域实现创新链、产业链、人才链、资金链的相互支撑与深度融合。各链条上的参与主体共建产业发展生态系统，有效汇聚、整合、配置外部资源，通过深化合作、系统创新，实现风险共担和价值共创的良性循环，有效放大产业竞争优势。建议新兴气体能源产业链、供应链上的企业，与政府、高校、科研机构、专业性服务机构、消费者共建生态圈，共创并拓展新需求，形成“政产学研金服用”协同机制，构建“一气多源”“一气多用”“多气互补”“气能融合”的新兴气体能源发展模式，建成新兴气体能源“综合体”。加快培育和组建具有国际竞争力的大型气体能源企业集团。加强行业性国际交流与合作，把握全球气体能源的产业、技术与市场动态。倡议建立全球新兴气体能源产业联盟，建设“一带一路”绿色能源贸易平台与若干地区性气体能源交易市场，促进绿能资源的全球性优化配置和高效利用，增强我国在国际能源治理和气候治理方面的话语权。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** February 7, 2024; **Revised date:** March 13, 2024

**Corresponding author:** Zhang Bo is a professor from the School of Management, Xiamen University. His major research fields include energy economics and strategic management. E-mail: zhangbo@xmu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering projects “Research on Major Risk Prevention and Control Strategies for China’s Energy System Transformation towards 2040” (2023-ZCQ-11), “Research on China’s Medium and Long-term Methane Control Strategy” (2023-XZ-44);

National Natural Science Found Project (72088101, 72374175)

#### 参考文献

- [1] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国气体清洁能源发展报告 2015 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015. Institute of Resource and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council. The 2015 report on the development of China’s clean energy gases [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [2] 郭焦锋. “十四五”天然气发展路径 [J]. 中国石油石化, 2019 (24): 34–37. Guo J F. Natural gas development path in the 14th Five-Year Plan [J]. China Petrochem, 2019 (24): 34–37.
- [3] 唐红君, 李洋, 李欣瑶, 等. 天然气在新型电力系统中的重要作用与发展对策 [J]. 石油科技论坛, 2023, 42(5): 7–12. Tang H J, Li Y, Li X Y, et al. Important role of natural gas in new power system and development strategy [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(5): 7–12.
- [4] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告(2023) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2023. Oil and Gas Division of National Energy Administration, Institute of Resource and Environmental Policy of Development Research Center of the State Council, Strategic Research Center of Oil and Gas Resources of Ministry of Natural Resources. China natural gas development report (2023) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.
- [5] 刘合, 梁坤, 张国生, 等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 33–42. Liu H, Liang K, Zhang G S, et al. China’s natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 33–42.
- [6] 王震, 孔盈皓, 李伟. “碳中和”背景下中国天然气产业发展综述 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 194–202. Wang Z, Kong Y H, Li W. Review on the development of China’s natural gas industry in the background of “carbon neutrality” [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 194–202.
- [7] International Gas Union. Global gas report 2023 [EB/OL]. (2023-10-19)[2023-11-15]. <https://www.igu.org/resources/global-gas-report-2023-edition/>.
- [8] 段宏波, 唐旭, 任凯鹏, 等. 多模型比较框架下中国天然气消费的中长期发展路径 [J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 193–201. Duan H B, Tang X, Ren K P, et al. China’s middle- and long-term pathways of natural gas consumption: Based on a multi-model comparison framework [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (2): 193–201.
- [9] 侯正猛, 罗佳顺, 曹成, 等. 中国碳中和目标下的天然气产业发展与贡献 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 243–252. Hou Z M, Luo J S, Cao C, et al. Development and contribution of natural gas industry under the goal of carbon neutrality in China [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 243–252.
- [10] International Gas Union. Global renewable & low-carbon gas report [R]. London: International Gas Union, 2021.
- [11] 刘合, 梁英波, 张国生, 等. 天然气与可再生燃气融合发展挑战

- 与路径 [J]. 天然气工业, 2022, 42(9): 1–9.
- Liu H, Liang Y B, Zhang G S, et al. Challenge and path to integrated development of natural gas and renewable gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(9): 1–9.
- [12] 宋科余, 龙涛, 段红梅, 等. 未来我国气体能源发展动向研究 [J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 187–195.
- Song K Y, Long T, Duan H M, et al. Research on the development trend of China's gas energy in the future [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 187–195.
- [13] 石云, 潘继平, 王恺, 等. “双碳”背景下天然气与新能源融合发展路径及策略 [J]. *油气与新能源*, 2023, 35(4): 1–6.
- Shi Y, Pan J P, Wang K, et al. The paths and strategies of integrated development of natural gas and new energy in the context of “double carbon” [J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(4): 1–6.
- [14] 宋鹏飞, 张超, 肖立, 等. 对天然气产业与氢能融合发展的战略思考 [J]. *油气与新能源*, 2023, 35(2): 37–45.
- Song P F, Zhang C, Xiao L, et al. Strategic thinking of the integrated development of natural gas industry and hydrogen industry [J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(2): 37–45.
- [15] 张莉, 薛勃飞, 刘玉新, 等. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究 [J]. *科学通报*, 2023, 68(23): 3107–3112.
- Zhang L, Xue B F, Liu Y X, et al. A strategic study of ammonia-hydrogen new energy interdisciplinary science frontiers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(23): 3107–3112.
- [16] Ye D P, Tsang S C E. Prospects and challenges of green ammonia synthesis [J]. *Nature Synthesis*, 2023, 2: 612–623.
- [17] Oshiro K, Fujimori S. Limited impact of hydrogen co-firing on prolonging fossil-based power generation under low emissions scenarios [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1778.
- [18] Farrokhifar M, Nie Y H, Pozo D. Energy systems planning: A survey on models for integrated power and natural gas networks coordination [J]. *Applied Energy*, 2020 (262): 114567.
- [19] 钱兴坤, 陆如泉. 2023 年国内外油气行业发展报告 [R]. 北京: 石油工业出版社, 2024.
- Qian X K, Lu R Q. 2023 oil and gas industry development report for world and China [R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2024.
- [20] 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-07]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228\\_1947915.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html).
- Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2023 [EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-07]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228\\_1947915.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html).
- [21] European Commission. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on russian fossil fuels and fast forward the green transition [EB/OL]. (2022-05-18)[2023-11-15]. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131).
- [22] Danish Energy Agency. Denmark's national energy and climate plan [R]. Copenhagen: Danish Energy Agency, 2023.
- [23] International Energy Agency. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth [EB/OL]. (2020-03-01)[2023-11-15]. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>.
- [24] Hydrogen basic strategy [EB/OL]. (2023-06-06)[2023-11-15]. [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/suiso\\_seisaku/pdf/20230606\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_1.pdf).
- [25] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. National hydrogen strategy update [EB/OL]. (2023-07-26)[2023-11-15]. [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/national-hydrogen-strategy-update.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/national-hydrogen-strategy-update.pdf?__blob=publicationFile&v=2).
- [26] Department of Energy, U.S. National clean hydrogen strategy and roadmap [EB/OL]. (2023-06-05)[2023-11-15]. <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-releases-first-ever-national-clean-hydrogen-strategy-and-roadmap>.
- [27] International Energy Agency. Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach (2023 update) [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [28] 毕马威企业咨询(中国)有限公司. 固碳、储氢、航运燃料、掺混发电: 绿氨行业概览与展望 [R]. 北京: 毕马威企业咨询(中国)有限公司, 2022.
- KPMG China. Carbon sequestration, hydrogen storage, marine fuels, blended electricity generation: Green ammonia industry overview and outlook [R]. Beijing: KPMG China, 2022.
- [29] Green growth strategy through achieving carbon neutrality in 2050 [EB/OL]. (2020-12-25)[2023-11-15]. [https://www.meti.go.jp/english/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs2050/index.html](https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/index.html).
- [30] International Energy Agency. Ammonia technology roadmap [EB/OL]. (2021-10-15)[2023-11-15]. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>.
- [31] 中国石油经济技术研究院. 2060 年世界与中国能源展望 [R]. 北京: 中国石油天然气集团有限公司, 2023.
- CNPC Economics and Technology Research Institute. World and China energy outlook for 2060 [R]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 2023.
- [32] 中国石化集团经济技术研究院. 中国能源展望 2060 (2024 年版) [R]. 北京: 中国石油化工集团有限公司, 2023.
- SINOPEC Economics & Development Research Institute. China energy outlook 2060 (2024 edition) [R]. Beijing: China Petrochemical Corporation, 2023.
- [33] 中国海油集团能源经济研究院. 2060 能源展望 (2023 年版) [R]. 北京: 中国海洋石油集团有限公司, 2023.
- CNOOC Energy Economics Institute. Energy outlook 2060 (2023 edition) [R]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2023.
- [34] 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/OL]. *石油勘探与开发*, [2024-02-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20240205.1127.002.html>.
- Zou C N, Lin M J, Ma F, et al. Natural gas industry development, challenges and strategies under carbon neutral target in China [J/OL]. *Petroleum Exploration and Development*, [2024-02-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20240205.1127.002.html>.
- [35] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 2023 中国生物质能产业发展年鉴 [EB/OL]. (2023-04-17)[2023-11-15]. <https://www.beipa.org.cn/productinfo/2091092.html?templateId=602287>.
- Biomass Energy Industry Promotion Association. 2023 China bio-



- mass energy industry development yearbook [EB/OL]. (2023-04-17)[2023-11-15]. <https://www.beipa.org.cn/productinfo/2091092.html?templateId=602287>.
- [36] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 碳中和目标下的生物天然气行业展望——减排潜力、成本效益及市场需求 [EB/OL]. (2023-12-15)[2024-03-07]. <https://www.beipa.org.cn/newsinfo/6620873.html>.
- Biomass Energy Industry Promotion Association. Outlook for the bionatural gas industry under carbon neutrality goals—Emission reduction potential, cost benefit, and market demand [EB/OL]. (2023-12-15)[2024-03-07]. <https://www.beipa.org.cn/newsinfo/6620873.html>.
- [37] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 635–642.
- Liu W, Wan Y M, Xiong Y L, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635–642.
- [38] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [EB/OL]. (2022-03-22)[2023-11-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html).
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th Five-Year Plan for modern energy system [EB/OL]. (2022-03-22)[2023-11-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html).
- [39] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国外交部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 等. 甲烷排放控制行动方案 [EB/OL]. (2023-11-07)[2023-11-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content\\_6914109.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914109.htm).
- Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, Ministry of Foreign Affairs of the People’s Republic of China, National Development and Reform Commission, etc. China methane emission control action plan [EB/OL]. (2023-11-07)[2023-11-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content\\_6914109.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914109.htm).
- [40] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2022-03-23)[2023-11-15]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c\\_1310525630.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm).
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. A plan on the development of hydrogen energy for the 2021—2035 period [EB/OL]. (2022-03-23)[2023-11-15]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c\\_1310525630.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm).
- [41] 仲冰, 张学秀, 张博, 等. 我国天然气掺氢产业发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 100–107.
- Zhong B, Zhang X X, Zhang B, et al. Industrial development of hydrogen blending in natural gas pipelines in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 100–107.
- [42] 李承周, 王宁玲, 窦潇潇, 等. 多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7127–7150.
- Li C Z, Wang N L, Dou X X, et al. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127–7150.