

储能技术经济性分析



沙特能源转型及氢能发展展望

江 涵, 徐新智, 刘 哲, 张 锐, 胡 旭
(全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031)

摘 要: 在当前世界能源结构清洁化的情况下, 长期依赖石油经济的沙特阿拉伯提出能源转型和经济多元化发展目标。基于此, 文章对沙特能源转型动因及发展方向进行剖析, 提出氢能发展构想, 并对其氢能中长期开发与国际贸易的经济性进行量化分析。调研显示, 在中短期内借助丰富的天然气资源优先发展蓝氢, 构建产业链, 后期利用丰富的清洁能源资源开发绿氢将成为沙特能源转型重要机遇。而相似国家可借鉴沙特能源结构化调整措施, 实现本国的能源转型和氢能发展。

关键词: 氢能; 中东北非; 能源转型; 可再生能源; “一带一路”

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0074

中图分类号: F 206

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 07-2354-12

Energy transition and hydrogen development prospects in Saudi Arabia

JIANG Han, XU Xinzhi, LIU Zhe, ZHANG Rui, HU Xu
(Global Energy Interconnection Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: In the context of cleaning the global energy structure, Saudi Arabia, which has long been dependent on oil, has proposed energy transition and diversification in its economic development. This paper analyzes the motivations and development direction of Saudi Arabia's energy transition and proposes the hydrogen development concept. In addition, this paper quantifies the economics of hydrogen energy development and international trade in the medium and long terms. The results demonstrate that in the short and medium terms, KSA could develop a blue hydrogen industry and construct an industrial chain with abundant natural gas resources. For the long term, the development of green hydrogen with abundant clean energy resources will become an important opportunity for Saudi Arabia's energy transition. In addition, related countries can learn from Saudi Arabia's energy restructuring measures to realize domestic energy transition and hydrogen development.

Key words: hydrogen; MENA; energy transition; renewable energy; the "Belt and Road"

2021年10月, 沙特阿拉伯王储萨勒曼宣布沙特承诺到2060年将净碳排放量降至零, 并将在这气候目标上投入约1870亿美元, 到2030年每年碳排放量将减少2.78亿吨^[1], 但将继续保持其作为石油和天然气主要生产国的地位, 此前沙特政府已计划到

2030年将本国可再生能源发电提升至58.7 GW, 占总发电装机比例达到50%^[2]。沙特阿拉伯作为全球最大石油出口国和生产国之一^[3], 人均二氧化碳排放达到15.27 t, 超过世界平均水平4.44 t的3倍, 是世界上人均二氧化碳排放最高的国家之一^[4], 明

确提出清洁能源发展规划和碳中和目标反映了沙特政府对能源清洁转型和可持续发展的积极态度。但其经济系统长期依赖石油产业,在能源转型的过程中,确立可行的转型路径和方向,稳步退出传统能源,维护经济社会的创新和可持续发展将成为沙特所面临的主要挑战。

本文通过分析沙特能源转型动因及转型政策规划,结合世界能源发展趋势,研究了沙特氢能转型及向日本、欧洲输氢的经济可行性,并对氢能发展路径进行研究,提出沙特氢能发展构想。国情相似的清洁能源资源丰富国家,例如摩洛哥、突尼斯、阿根廷和智利等,可参考沙特能源转型及氢能发展经验,统筹规划本国发展。

1 沙特能源转型动因

1.1 能源结构调整

2019年,沙特一次能源总产量达到214.6百万吨标准油当量,而消费总量为139.8百万吨标准油当量。沙特能源消费以油气为主,石油和天然气占其能源供应的99%以上^[9]。2019年其石油消费达到380万桶/d,以3400万人口成为世界上第五大石油消费国,生产的石油约1/3用于其国内消费,生物质能和清洁能源多年来稳步发展,但在总能源消费体系中依旧占比较小。

沙特是全球最大石油生产国和出口国,从20世纪70年代起经济系统长期依赖石油产业。1973年、1979年和1990年3次石油危机导致的油价飙升使沙特当年的石油占GDP比例出现较大增幅,而随后的油价暴跌也致使沙特GDP出现萎缩,如图1所示,其经济体系与石油价格已深度绑定。2020年沙特石油探明储量达到2975亿桶(约合409亿吨),占世界储量的17.2%,是世界上继委内瑞拉之后第二大已探明石油储备国。2020年沙特阿拉伯石油产

量约为1104万桶/d,全年出口石油占全世界总量的17.2%^[9],当年石油产业占全国GDP的比例达到24.7%^[7]。

沙特国民经济受到油价波动的影响大。2014年年底国际油价大幅下跌,从每桶超过100美元下跌至50美元以下,沙特的财政收入从2014财年的2800亿美元缩水至2015财年的1620亿美元,跌幅高达42%^[9]。2018—2019年,受石油价格回升、改革政策落地等利好影响,沙特经济呈现复苏迹象,但2020年受新冠疫情影响,全球能源需求出现萎缩,沙特GDP较上年缩减4.1%^[10],名义GDP降至7001亿美元^[11]。2021年沙特政府财政预算赤字达到约376亿美元,这也是沙特政府预算连续第8年出现赤字。

随着世界石油消费达峰的日益临近,如何摆脱对石油产业的依赖,调整自身国家能源结构,转变经济发展模式,实现产业结构的多元化发展,是沙特实现经济可持续发展所面临的主要问题。沙特是世界第二大已探明石油储备国^[9]和第六大已探明天然气储备国^[12]。除此之外,沙特可再生能源资源禀赋也极为优越,开发潜力巨大,全国太阳能年均光照强度高达2300 kW·h/m²,北部大内夫得沙漠、南部鲁卜哈利沙漠及东部代赫纳沙漠均为日照充裕地区,具备大规模光伏电站建设条件,沙特风电资源也极为丰富,年平均陆上风速约为6.0~8.0 m/s,全国多个地区陆上风速高于标准经济风速(7+m/s)。壳牌全球能源资源数据库数据显示,沙特在全球发展陆上风能潜能排行榜上排第13名。沙特东北地区、中部地区和西部山系均有较高的发展风能的潜力。历史数据显示,上述3个区域的年均风速分别为5.0~5.5 m/s、9.0~9.5 m/s和4.0~4.5 m/s,陆上风能开发潜力超过200 GW,平均容量系数达到35.2%^[13]。如何利用本国的能源资源优势,在推动国家产业结构多元化发展和清洁能源转型的同时

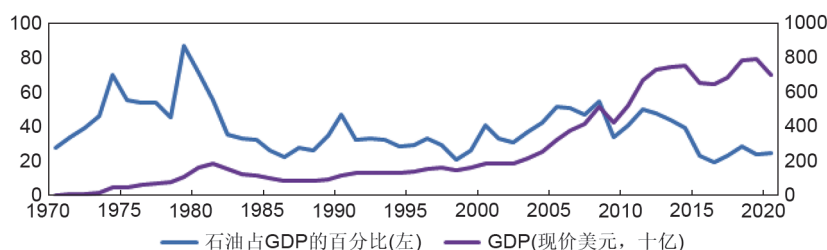


图1 1970—2020年沙特GDP及石油占GDP百分比^[8]

Fig. 1 Saudi GDP and oil rent (& of GDP) from 1970 to 2020

维护自身世界能源枢纽的地位,也成为沙特未来发展的重点问题。

1.2 国家转型发展

沙特作为世界上最大的石油生产和出口国,经济结构过于单一,一方面,沙特政府由于过度依赖资源出口带来的收益,而将大部分财政预算拨给能源资源相关产业,忽视了在教育进步、科技创新等方面的投入。另一方面,由于国民多从事劳动密集型的资源行业工作,且往往习惯了高福利、高补贴的生活,对知识和技术的追求动力不足,本国劳动力整体素质较差^[14]。在政府和公民均不重视的情况下,沙特的人才储备和创新能力薄弱。经合组织2017年数据显示,沙特25~34岁的年轻人中只有25.8%受过高等教育,在46个国家中排名第38。同时据联合国人类发展报告数据,2017年沙特的创新指数为36.2,在127个国家中位列55,较为落后^[15]。

1.3 世界能源转型趋势

除沙特自身产业结构调整外,世界清洁能源转型的趋势也督促沙特加快能源转型步伐。近年来随着气候问题的日益突出,全球已形成统一明确的气候治理愿景和低碳发展目标。随着《巴黎协定》的生效,应对气候变化已成为世界各国的共识,世界能源结构也经历着重大的变革,世界能源发展呈现出低碳化趋势。从世界能源未来发展图景的关键指标来看,各主要能源展望报告的预测数据皆表明,未来世界能源需求量将继续增加,到2050年,世界一次能源供应增长在25%~60%^[16-19]。清洁能源将成为满足世界能源需求增长的主体,因此抢占能源转型和清洁能源发展的制高点成为世界各国关注的热点。

伴随世界能源系统逐渐向清洁化方向转型,能源供应的稳定性问题也日益得到关注。清洁能源出力具有较大波动性、间歇性和随机性的特点,如何保证清洁能源系统中能源供应的安全性和稳定性也成为各国面对的主要问题之一。氢能作为优秀的二级能源载体,清洁无碳,可以与电能、热能、燃料等多种能源耦合,组成新型能源系统,而以绿氢(可再生能源电解水制氢)和蓝氢(普通化石燃料制氢与碳捕捉与封存技术结合的制氢方案)为代表的低碳氢作为全球实现碳中和目标的重要手段,开始受到世界各国的关注。在碳中和目标下,基于温控

1.5℃以内的预测,预计到2050年全球氢能需求量将达到1.87亿~6.96亿吨,分别占2050年全球能源消费总量的7%~24%,其中近1.50亿吨为海运市场交易,来自中日韩市场的低碳氢进口需求达到约8000万吨(相当于海运能源贸易的55%);欧洲低碳氢能进口量约为2300万吨,占海运能源贸易总量的16%^[20-22],氢能领域将吸引投资超过15万亿美元,减排二氧化碳超过800亿吨^[23]。氢能将成为全球能源系统的重要组成部分。

沙特能源转型面临着世界能源系统发展清洁化和低碳氢能发展热点化的双重影响,同时其国内的经济多元化发展需求也对其能源结构的调整提出更高的要求。丰富的油气资源储备和优越的清洁能源资源是沙特能源转型发展得天独厚的优势,未来降低自身碳排放,推动清洁能源发展,促进开发利用氢能将成为沙特实现能源转型的重要抓手。

2 能源转型及氢能发展趋势

2.1 能源转型政策

2016年初,在全球油价从115美元/桶骤降到28美元/桶的刺激下,沙特出台“2030愿景”^[24],全面深化社会、经济、能源多样性改革,以“活力社会”“繁荣经济”和“雄心国家”为三大主线,确立了未来15年的发展方向,并提出了沙特实现美好愿景的三大支柱:成为阿拉伯与伊斯兰世界的核心国家、全球投资强国、连接亚欧非三大洲的世界枢纽。2016年6月,沙特政府提出“国家转型计划2020”,正式使用“国家转型”的概念,该计划是“2030愿景”的有机组成部分,包含8个主题涉及24个政府机构,旨在实现“2030愿景”的宏伟目标和要求^[25]。核心目标是大幅提高非石油经济的收入,到2020年创造45万个新就业机会。能源转型是沙特从石油依赖性经济向多元化经济转型的一个重要内容,而沙特政府也从多方面采取行动来推进能源系统调整,促进新能源开发。

(1) 推动新能源的开发利用,加快项目落地。2017年,沙特在能源部成立可再生能源项目发展办公室(REPDO),并提出国家可再生能源计划(NREP),同年开启第1轮新能源项目招标,2个可再生能源项目总装机达到700 MW,2019年开始第2轮新能源项目招标,6个项目总装机为1.47 GW^[26],2020年4月REPDO开启第3轮新能源项目招标,

项目总装机为 1.2 GW^[27], 相关项目信息如附录所示。总发展目标方面, 2019 年沙特更新其国家可再生能源计划, 上调 2023 年可再生能源装机目标至 27.3 GW, 包括 20 GW 光伏和 7.3 GW 的风电, 计划到 2023 年在可再生能源项目上投资 500 亿美元, 并规划到 2030 年可再生能源装机将达到 60 GW^[28]。

(2) 提高项目国际合作程度, 推进开发本地化。沙特新能源项目开发目前有两种模式, 一是以独立发电商(IPP)模式公开招标, 中标开发商(联营体)与沙特购电公司签署 20~25 年 PPA, 大多数清洁能源项目以此模式开发。二是通过竞争性谈判模式来完成, 该模式主要为沙特公共投资基金(PIF)负责的大型新能源投资开发项目, 由 PIF 旗下的全资子公司 **Badeel** 统筹就规划项目邀请意向开发商进行合作谈判或非公开招标, 达成一致后由 PIF 与开发商共同投资进行项目开发, 目前只有一个 **Sudair** 1.5 GW 光伏项目正在执行。为提升项目国际参与程度, **REPDO** 要求超过 100 MW 的大型项目必须由国际开发商担任联营体牵头方, 100 MW 以下的项目沙特本地开发商可以担任联营体牵头方, 而为促进本土产业发展, **REPDO** 明确规定项目执行期间项目公司本地成分比例不得低于 17%, 进入运营期后, 本地成分需要分阶段提升, 满足更为严格的沙特本地化率要求。

(3) 促进清洁能源技术研发, 增加产业竞争力。沙特政府根据国家可再生能源计划指导建议, 加快完善可再生能源部门技术研发和产品制造产业链, 增强该国工业竞争力, 组织阿卜杜勒阿齐兹国王科技城(KACST)、阿卜杜拉国王科技大学(KAUST)、阿卜杜拉国王石油研究中心(KAPSARC)、阿卜杜拉国王核能和可再生能源城(KACARE)、沙特基本工业公司(SABIC)、沙特国家石油公司(Aramco)等其国内多个大学、企业及研究所开展联合研究, 推动相关可再生能源项目发展框架和落地研究。

(4) 加快电力市场改革, 增加市场活力。目前沙特本国电力市场中发电、购电、输电、配电环节相互独立, 但绝大多数环节及装机由国有企业控制, 沙特发电侧 65% 来自沙特电力公司(SEC), 7.6% 来自沙特国家海水淡化公司(SWCC), 私营或外资的独立发电商(IPP)占比则为 17.4%, 沙特电力采购公司(SPPC)是沙特电力市场的唯一购电方, 输电、配电也由国有公司沙特国家电网(National Grid SA)、

沙特电力公司和马拉菲克(Marafiq)控制^[29], 总体来说私营占比较小。为实现高占比清洁能源下的新型电力系统机制, 沙特政府自 2016 年起对本国电力市场系统进行改革, 针对发电、购电、输电、配电等一系列环节进行私有化进程, 促进私营企业进入电力市场, 推动电力系统清洁化和市场化发展。

2.2 氢能发展

随着能源转型政策和电力市场改革方针的双管齐下, 氢能成为沙特能源未来发展的重点发展方向之一, 目前沙特政府正在根据世界氢能发展情况制定氢能战略规划和发展路线图^[30], 相关部门和企业负责人均发布沙特支持氢能发展的意愿, 同时相关部门也积极探索氢能领域的国际合作和氢能应用, 并在交通、能源贸易和生产、本地化等多个领域加快氢能应用步伐。

2019 年, 沙特阿美公司与美国空气产品公司合作研发的沙特第 1 座加氢站建成并投入试运行, 为从丰田公司进口的 6 辆 **Mirai** 燃料汽车提供氢能^[31]。

2020 年沙特主办 G20 峰会期间, 提出氢能政策支持在能源转型过程中至关重要, 建议效仿碳排放证书设定氢证书和国际交易平台, 差异化灰氢、蓝氢和绿氢的价值作用, 激励 G20 成员国加强在低碳氢领域的投资和研发, 鼓励成员国开展大型氢能项目开发, 通过规模化降低技术成本带动氢能广泛应用。6 月, 沙特国际电力和水务公司 **ACWA Power** 与美国空气产品公司和沙特未来城 **NEOM** 新城签署协议, 共同投资 50 亿美元, 在沙特规划的零碳城市 **NEOM** 建造一座装机容量达到 4 GW 的绿色氢氨工厂, 日产 650 t 绿氢, 年产 120 万吨绿氨。9 月沙特阿美将 40 t 蓝氨运往日本, 成为世界上第 1 条蓝氨示范供应链^[32]。同月, 沙特从韩国现代进口多种型号氢燃料汽车和公交车用于试验^[33]。

2021 年 3 月, 沙特阿美与韩国现代集团签署合作协议, 将从沙特运输液化石油气(LPG)至韩国, 在当地转化为氢气后, 在此过程中产生的二氧化碳将被带回沙特存储^[34]。同月, 沙特与德国签署氢能合作的 MoU, 正式确立了双方在低碳氢生产、加工、运输及利用方面的合作^[35]。10 月, 沙特宣布将投资 1100 亿美元开发 **Jafurah** 气田, 作为世界上最大的天然气田项目, 未来其产生的大部分天然气将用于生产蓝氢。沙特能源大臣表示沙特计划到 2035 年生产和出口约 400 万吨氢气能源, 有望成

为全球最大的氢能供应来源^[36]。2021年底,沙特与美国 Hyzon Motors 和法国 Gaussin 签署合作协议,共同推动氢燃料卡车沙特本地生产^[37]。

2022年1月,沙特能源部与其国内单位签署8项合作协议,联合推动氢燃料汽车、氢燃料公共汽车和列车、可持续航空燃料在沙特的项目试点^[38]。

国际能源署等国际研究机构和智库部门均认为沙特氢能开发前景广阔,未来将成为世界氢能生产的主要地区之一,同时凭借其优越的地理位置,完善的能源产业基础和能源贸易体系,沙特将可能成为世界最大的氢能供应国^[39-42]。

世界应对气候变化步伐在逐渐加快,沙特能源转型刻不容缓。作为全球公认氢能发展潜力最大的国家之一,在现有的能源转型政策下,尽快制定氢能发展规划,牢牢把握氢能发展的契机,将成为沙特调整能源系统架构、实现国家自主承诺的重要机遇。

3 氢能发展分析

氢能利用可以分为灰氢(普通化石燃料制氢)、蓝氢和绿氢。目前,已有的大型绿氢项目成本为2.5~4.5美元/kg,而灰氢价格为1~1.8美元/kg,蓝氢价格为1.4~2.4美元/kg^[43]。在中短期内,沙特可依托自身油气资源发展蓝氢经济,加快完善上下游产业链,夯实基础设施建设,搭建氢能交易枢纽,掌握氢能经济话语权,同时推动绿氢技术规模化开发,推进氢能经济长续化发展。长期来看,沙特可以充分发挥本国优越的清洁能源资源禀赋,在绿氢产业规模化完备发展的情况下,依托本国前期完善的氢能产、运、储设施和项目经验,继续维持在氢能领域的全球领先地位,实现国家能源经济转型。

3.1 蓝氢经济性分析

蓝氢是将普通化石燃料制氢方式,即灰氢与碳捕捉技术结合的制氢方案,可大幅度减少制氢过程中的碳排放,其发展潜力与化石资源条件相关。2020年底沙特已探明天然气储量达到8.4万亿立方米,位居全球第六,占世界天然气储量的4.5%^[12],中短期内利用天然气资源发展蓝氢技术潜力巨大。本节将对沙特蓝氢的经济性进行分析。

天然气制氢成本 LCOH 主要包括3部分:天然气成本(LCOG)、资本支出(CAPEX)和运营支出(OPEX)。其中:LCOG(天然气燃料成本)反映了制

氢成本中的燃料成本因素,目前占制氢总成本的45%~75%。CAPEX(资本支出)反映了前期蒸汽重整设施投资成本,占制氢总成本12%~20%。OPEX(年运营支出)反映了蒸汽重整工厂建成后每年设施维护、人工、税务等费用支出。

天然气制取的氢气为灰氢,需要加装碳捕捉装置减少碳排放后才能被称为蓝氢,但对其中二氧化碳的捕捉率界限全球目前没有统一的标准,一般项目对于蓝氢碳捕捉率的定义会介于70%~95%,2019年欧洲绿氢及低碳氢标准制定项目组提出欧盟蓝氢的参考标准,基于天然气制灰氢方案,减少60%的温室气体排放即可认为是蓝氢,以此测算,相较于灰氢排放基准91 g/MJ [328 g/(kW·h)],蓝氢的碳排放标准为36.4 g/MJ [131 g/(kW·h)]。加装CCS装置将大幅提高天然气制氢价格,使资本支出升高80%,燃料成本升高约10%,运营支出升高约90%。

根据 LCOE 成本:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{CAPEX} + C_{OPEX}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{E}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

蓝氢的成本 LCOH(B) 计算为:

$$LCOH(B) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{inv}}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{FOM}}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{VOM}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{M(H_2)}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

式中, C_{inv} 为 CAPEX 投资; C_{FOM} 为固定设备运维成本; C_{VOM} 为可变运维成本; r 为折现率, $r=6\%$; $M(H_2)$ 为氢气年产量; T 为时间, 设定为20年。

CAPEX 投资成本 C_{inv} 包括制氢设备投资成本 C_{HC} , 纯化设备投资成本 C_{pur} , 存储设备投资成本 C_{stor} , 计算公式为:

$$C_{inv} = C_{HC} + C_{pur} + C_{stor} \quad (3)$$

固定运维成本 C_{FOM} 包括制氢设备运维成本 $C_{Main,HC}$, 纯化设备运维成本 $C_{Main,pur}$, 存储设备运维成本 $C_{Main,stor}$, 计算公式为:

$$C_{FOM} = C_{Main,HC} + C_{Main,pur} + C_{Main,stor} \quad (4)$$

可变运维成本 C_{VOM} 包括天然气费用 C_{Gas} , 电费 C_{Elec} 和水费 C_{Wat} , 计算公式为:

$$C_{VOM} = C_{Gas} + C_{Elec} + C_{Wat} \quad (5)$$

根据模型最终沙特的蓝氢制取成本位于1.4~2.35美元/kg之间,与全球范围内其他主要国家对

比,如图2所示,仍具有较大优势,因此中短期内发展蓝氢方案对于沙特能源转型具备经济可行性。

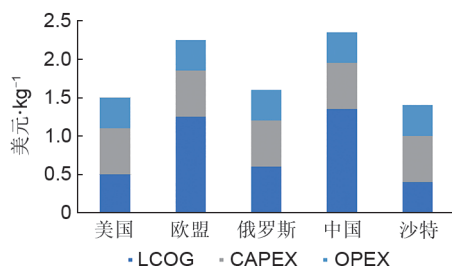


图2 不同区域天然气制取蓝氢成本计算^[43]

Fig. 2 Blue hydrogen production costs in different regions, 2018

3.2 绿氢经济性分析

随着全球清洁能源转型的进行及其国内能源转型进程的推动,中长期来看,沙特可利用其清洁能源资源发展绿氢,支持其氢能经济的进一步发展。

绿氢发展主要依赖本国可再生能源资源特性。未来随着可再生能源的大规模开发,将支持沙特的绿氢发展。下面将对沙特绿氢发展的经济性进行分析。

绿氢成本主要由3部分组成:电力成本(LCOE),即可再生能源电力成本,资本支出(CAPEX),主要为电解槽系统成本,运营支出(OPEX)。绿氢受电价和资本支出影响较大,两者占总成本的比例超过90%,电解槽的技术参数,如电解效率、寿命、年满载小时数也影响最终的绿氢成本^[44]。尽管目前绿氢不具备成本优势,但从能源转型及深度脱碳角度出发,考虑碳减排效益,未来随着可再生能源发电成本逐渐下降,绿氢成本将逐渐降低,最终实现低价零碳氢气经济,满足全球能源转型需求。

电力成本(LCOE)方面。根据相关数据,目前沙特的大型光伏项目 LCOE 约为 2 美分/kWh^[45] (25年PPA价格为1.04美分/kWh^[46]),到2050年沙特可再生能源电力 LCOE 预计将较2020年下降30%,达到1.4美分/kWh^[47]。目前世界主流电解槽工艺能耗约为50~55 kWh/kg(转化效率为65%),未来随着电解槽工艺的逐步完善提升,预计到2050年碱式电解槽电解效率可以提升至45 kWh/kg(转化效率达到76%),而SOEC技术下电解效率将达到40 kWh/kg^[48]。

投资成本(CAPEX)方面。投资成本主要为电解槽成本,而未来电解槽的投资成本将从电解槽电堆

降本、系统降本两方面下降。到2050年,全球电解槽系统规模将进入TW时代,电解槽系统成本相较目前将降低70%,同时电解槽寿命也将由现在的10年增长至20年^[49]。

绿氢的成本 LCOH(G) 计算为:

$$\text{LCOH(G)} = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{\text{inv}}}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{\text{FOM}}}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{t=T} \frac{C_{\text{VOM}}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t=T} \frac{M(\text{H}_2)}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

CAPEX投资成本 C_{inv} 包括电解槽投资成本 C_{WE} , 加压设备投资成本 C_{comp} , 存储设备投资成本 C_{stor} , 计算公式为:

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{WE}} + C_{\text{comp}} + C_{\text{stor}} + C_{\text{other}} \quad (7)$$

固定运维成本 C_{FOM} 包括电解槽运维成本 $C_{\text{Main, WE}}$, 加压设备运维成本 $C_{\text{Main, comp}}$, 存储设备运维成本 $C_{\text{Main, stor}}$, 电解槽置换成本 C_{SR} , 计算公式为:

$$C_{\text{FOM}} = C_{\text{Main, WE}} + C_{\text{Main, comp}} + C_{\text{Main, stor}} + C_{\text{SR}} \quad (8)$$

可变运维成本 C_{VOM} 包括电费 C_{Elec} 和水费 C_{Wat} , 计算公式为:

$$C_{\text{VOM}} = C_{\text{Elec}} + C_{\text{Wat}} \quad (9)$$

氢气年产量 $M(\text{H}_2)$ 由电解槽功率 E_{ES} , 电解槽效率 η 和氢气的低热值 $\text{LHV}(\text{H}_2)$ 组成, 计算公式为:

$$M(\text{H}_2) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} (E_{\text{ES}} \eta)}{\text{LHV}(\text{H}_2)} \quad (10)$$

按照现有模型计算,当前在沙特可再生能源电价 LCOE 为 2 美分/kWh 时,沙特绿氢理论价格约为 2.45 美元/kg,而到 2050 年,沙特可再生能源电价理论成本为 1.4 美分/kWh^[47] 时,而随着设备价格的下降,其绿氢价格将降至 0.77 美元/kg,在全球范围内较灰氢和蓝氢具备较强竞争力。

表1 沙特绿氢成本预测

Table 1 Green hydrogen cost forecast, Saudi

项目	单位	2020 年	2050 年
LCOE	美元/kWh	0.02	0.014
电解槽效率	kWh/kg	55	45
水费	美元/kg	0.01	0.01
C_{VOM}	美元/kg	1.11	0.64
电解槽支出	美元/千瓦	400	100
电解槽寿命	年	10	20
年满载小时数	h	3200	4200
WACC	%	10%	6%
C_{inv}	美元/千克	1.21	0.10
C_{FOM}	美元/千克	0.14	0.02
LCOH	美元/千克	2.45	0.77

同时与世界相关能源消费大国/区域绿氢生产成本相比^[43]，如表 2 所示，沙特绿氢成本更具优势。

表 2 不同区域绿氢成本预测^[43]

国家/区域	绿氢成本/(\$/kg)
日本	3.8~4.1
美国	1.8~2.8
西欧	2.3~2.8
中国	1.4~2.8

3.3 氢能贸易

沙特可通过氢能贸易保持自身能源出口竞争力。根据世界未来绿氢供需情景^[50]，如图 3 所示，未来沙特具有高出口潜力，而欧洲、东北亚等地具有进口潜力。沙特可依托自身优越的地理位置和绿氢成本优势，将氢能外送，实现能源转型和经济多元化发展。

未来氢能国际贸易将参考全球天然气贸易方式，主要分为管道运输和液态海运两种模式^[51]。其

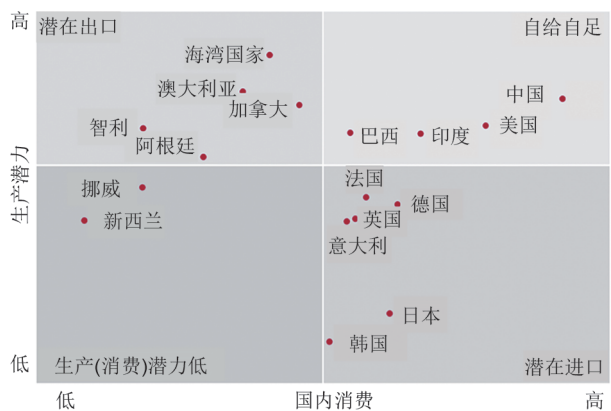


图 3 世界未来绿氢供需情景^[50]
Fig. 3 Green hydrogen production, domestic consumption, and export potential

中海运又主要分为液氢、液态有机氢载体(LOHC)和液氨 3 种运输模式，3 种运输方式均是将氢液化后运输。相关运输模式的对比见表 3，管道运输与液态海运均有不同优缺点，实际运输方式应根据运输情景进行选择。

表 3 国际氢能运输模式对比^[51-54]

运输模式	优点	缺点
管道运输	可翻新现有管道用于运输，满足大规模持续运输，中长距离运输成本较低	新建管道初始投资较高，技术成熟度不高，输送端固定，受地缘政治影响，长距离运输成本过高
液氢海运	可直接使用，纯度高，体积储氢量较高(70.8 kg/m ³)	运输损耗较大，需要低温运输(-253 ℃，液化耗能占初始氢能的 25%~40%)，运输存储成本较高
液氨海运	易液化(-33 ℃)，体积储氢量高(121.4 kg/m ³)，氨也可直接使用，已有国际贸易情景，运输成本较低	氢氨转化能量消耗较大(耗能占初始氢能的 25%~40%)，氨有毒，易造成空气污染
LOHC 海运	常温常压运输，运输成本较低	载氢密度较低(体积储氢量 56.6 kg/m ³)，加氢脱氢转化能量消耗大(耗能占初始氢能的 35%~40%)

沙特具备良好的地理位置环境，但鉴于沙特与主要输氢目的地之间的地理因素，未来管道输氢实现难度较大，因此在沙特氢能外送上将主要对海运模式进行比较分析。

海运模式的成本主要分为投资成本(CAPEX)、固定运维成本(OPEX)和可变运维成本(OPEX)三部分。其中投资成本主要包括：运输管道和压缩机、液化设施、运输船、存储设施和气化设施的投资成本。固定运维成本(OPEX)主要包括：运输管道和压缩机运行，液化设施运行，运输船运行，存储设施运行和气化设施运行的成本。可变运维成本(OPEX)主要包括：压缩机供能、液化设施供能、运输船燃料和港口费用和气化设施供能成本^[52]，相

关运输成本设定见附录。

以沙特-日本氢能为例，选取沙特未来氢能生产基地之一的 NEOM 新城至日本东京做成本分析，氢气从 NEOM 城通过 300 km 管道运输至沙特杜巴港液化，通过海运 15600 km 至东京港，相关管道和海运技术参数见附录。计算 3 种海运模式的价格处于 1.26~2.11 美元/kg 之间，中短期内叠加蓝氢成本 1.4 美元/kg，综合成本为 2.66~3.51 美元/kg，远期叠加绿氢成本 0.77 美元/kg，综合成本为 2.03~2.88 美元/kg，较日本本土绿氢价格 4.1 美元/kg^[43]具备较大优势。

而对于沙特-欧洲氢能运输，选取 NEOM 新城至欧洲天然气枢纽意大利米兰方案做成本分析，氢

气从NEOM城通过300 km管道运输至沙特杜巴港液化,然后通过海运2300 km至西西里岛,气化后通过1200 km管道运输至意大利米兰。3种海运模式成本如图4所示。

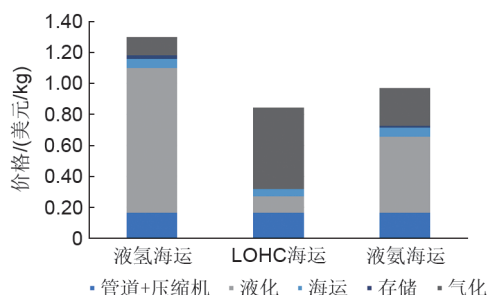


图4 沙特-意大利氢能运输方案对比
Fig. 4 Transport cost comparison for Saudi Arabia to Italy

NEOM-米兰海运价格处于0.84~1.30美元/kg之间,中短期内叠加蓝氢成本1.4美元/kg,综合成本为2.24~2.7美元/kg,远期叠加绿氢成本0.77美元/kg,综合成本为1.61~2.07美元/kg,较欧洲本土绿氢成本2.27~2.83美元/kg^[44]具有较强竞争力。

4 挑战及建议

综上,综合沙特氢能成本和运输成本,充分利用其优越的地理位置和丰富的自然资源发展氢能经济,将是其摆脱石油产业依赖、实现能源转型、完成2060碳中和目标的重要机遇,同时也是实现经济多元化发展和“2030愿景”的重要手段。而未来氢能贸易也将对现有国际能源贸易情景带来较大影响,这将是氢能资源丰富的国家和地区的重要发展机遇。清洁能源资源禀赋优越的国家,例如智利、突尼斯、摩洛哥、阿根廷等国家都可利用本国优越的资源开发氢能,积极布局氢能产业链的上下游,在世界能源转型的过程中探寻本国能源发展的新道路,开辟经济发展的新路线,从而在这百年未有之大变局中寻求国家的新发展。然而能源转型和氢能经济发展既是机遇,也是挑战,如何保障清洁能源占比过高的能源系统的安全性和稳定性、怎样在前期带动氢能经济开发、氢能开发后的本地利用和对外贸易等均是该类国家面临的难题,而沙特作为代表性国家,在当下其能源转型和氢能经济的发展面临的挑战不容忽视:

一是能源转型目标与行动脱节,欠缺系统规

划,转型计划实施困难。多年来经济系统与石油绑定,在实施能源转型过程中国家和政府掉头缓慢,同时缺少能源转型的细化方案,使得能源转型没有详细的实施路径指导,致使转型目标过于空洞。根据沙特国家可再生能源计划,2023年可再生能源装机目标设定为27.3 GW,然而目前其国内可再生能源项目总装机仅为417 MW,加上正在建设和招标中的项目也刚刚达到4.87 GW,距离目标差距较大,从现有发展趋势推测,按时实现制定的可再生能源目标难度较大,规划与现实较为脱节。

二是氢能落地项目较少,前期开发困难。尽管目前全球范围内绿氢项目开发火热,总开发规模达到207 GW,但长期规划项目居多,并主要位于欧洲、澳大利亚等地区,且预计开发时间已规划至2030年,在氢能经济发展的前期,技术成熟度、落地项目匮乏、项目运营经验缺失都将成为阻碍。

三是技术人才体系储备较差,科研实力较低。沙特教育与行业需求长期存在错位现象,沙特本土人才培养缺乏物理科学、化工能源、工程建设等方面的专业人才培养机制。尽管沙特当前和未来将进一步重视教育,但是学科建设、人才培养需要一个较长的过程。沙特在相当一段时间将缺少充足的、合格的专业技术人才支撑能源转型。同时相关领域的技术依赖进口,自身科研实力的缺失也使得能源转型举步维艰,这将对其国内能源转型和氢能发展造成较大阻碍。

为尽快实现沙特“2030愿景”,未来沙特政府亟须加快制定切实可行的能源转型计划和积极推动清洁能源开发。建议沙特政府逐步完善相关机制,从以下几方面加快推动能源转型和氢能发展:

一是增强明确的转型意识。要成为世界能源转型的先行者,沙特政府首先需要树立明确的能源转型和社会变革意识,提高能源转型的战略地位,并在战略层次上统一协调政府部门、企业和国家投资基金的动作,做到真正的步调一致推动能源转型。二是制定切实可行的能源转型计划。政府部门继续细化可再生能源发展方案,并根据进度适时调整,推动相关企业积极落实项目开发计划。三是加强技术、教育领域投资。扶持推动相关大学、企业进行能源技术研发和商业化进程,投资现有的清洁能源技术研发和技术创新,同时提升各种能源转型项目中本地成分占比要求,促进技术转移,带动本地产

业发展。四是加强国际合作。推动与欧洲、日本等地区和国家的技术和项目合作,加快技术合作落地,优化示范项目上线,积极优化投资环境,引入国际资本推动能源转型进程,加强多边合作和协调行动,推动区域内相关产业联合发展。

沙特积极推进能源转型也将对绿色“一带一路”发展和中资企业拓展海外业务具有重要意义。2021年9月,国家主席习近平在第七十六届联合国大会发言中指出:“中国将大力支持发展中国家能源绿色低碳发展,不再新建境外煤电项目”。这是中国为应对全球气候变化做出的又一重大标志性努力,不仅引起了国际社会广泛而积极的关注与反响,而且也进一步证实中国参与、贡献和引领全球气候变化进程的决心。对于中资企业出海来说,积极参与国际清洁能源项目是响应国家支持发展清洁能源承诺的企业担当。在之前中资企业参与的西亚北非地区清洁能源项目中,如摩洛哥瓦尔扎扎特太阳能项目、埃及本班太阳能园区、卡塔尔哈尔萨光伏项目等,其更多承担EPC承包商或供应商等角色,对于项目开发、投融资等方面参与较少,沙特能源转型及氢能发展将是中资企业打通项目开发上下游、实践“走出去”战略的重要机遇。相关企业可依托国内较为成熟的技术、经验、标准、运营模式,积极参与沙特清洁能源及蓝氢、绿氢项目的上下游环节,提高在项目开发、投资、建设、运维和咨询等环节的参与度,提升地区新型项目开发的话语权,加强企业在碳中和背景下的全球竞争力,同时在海外项目承包商服务趋同的情况下,拔高企业服务领域差异化能力,在国内国际双循环下构建企业新发展战略。

5 结 论

综上,本文认为沙特能源转型及氢能发展是其重塑世界能源枢纽、推动能源转型、促进经济多元化发展的重要机遇,对沙特落实国家转型、保障能源安全和实现“2030愿景”有着重要意义。

本文从沙特能源电力供需现状和能源发展规划入手,分析论证了沙特能源转型的必要性和氢能发展的经济可行性,规划其国家氢能发展路径。沙特近年来致力推行经济和社会改革,务求实现彻底转型,令国家发展迈向新纪元,而“2030愿景”作为重要方针,对其能源转型具有指导作用,能源转

型已成为其国家战略的重要组成部分,而氢能作为清洁能源发展的主要抓手也将成为沙特实现能源转型的一个重点发展领域。随着世界各国对低碳发展的逐渐重视,氢能技术将成为全球关注的热点,对于降低蓝氢、绿氢生产成本和运输成本提供了技术支撑;而沙特具备丰富的天然气资源,完善的能源基础设施和优秀的清洁能源资源禀赋,发展氢能得天独厚,未来将是实现沙特能源转型的重要机遇,而智利、突尼斯、摩洛哥和阿根廷等国家等可以依托自身优越的清洁能源资源,参考沙特能源转型和氢能发展,针对性地提出本国发展方案,从而在世界能源变革的浪潮中掌握先机,促进国家能源结构优化升级,带动经济可持续发展。

参 考 文 献

- [1] BBC. Saudi Arabia commits to net zero emissions by 2060[EB/OL]. <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-58955584>.
- [2] IEF. Saudi Arabia National Renewable Energy Program[R/OL]. https://www.ief.org/_resources/files/events/third-ief-eu-energy-day/turki-al-shehri-24.02-repdo---ief_riyadh_v2-2.pdf.
- [3] IEA. World oil production by region 1971-2020[EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-oil-production-by-region-1971-2020>.
- [4] World Bank. CO₂ emissions (metric tons per capita)-Saudi Arabia [EB/OL]. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?locations=SA>.
- [5] IEA. Saudi Arabia[EB/OL]. <https://www.iea.org/countries/saudi-arabia>.
- [6] BP. BP Statistical review of world energy[R/OL]. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2021/BP_Stats_2021.pdf.
- [7] World Bank. Oil rents (% of GDP)-Saudi Arabia, 2020[EB/OL]. <https://data.worldbank.org.cn/indicator/NY.GDP.PETR.RT.ZS?end=2020&locations=SA&start=2019>.
- [8] World Bank. Oil rents (% of GDP)-Saudi Arabia[EB/OL]. <https://data.worldbank.org.cn/indicator/NY.GDP.PETR.RT.ZS?locations=SA>.
- [9] Saudi Arabia Ministry of Finance. Recent Economic Developments and Highlights of Fiscal Years 2014/2015[R/OL]. <https://www.mof.gov.sa/en/docslibrary/Budget/Documents/2016.pdf>.
- [10] Kingdom of Saudi Arabia. Annual Saudi GDP declines by 4.1% in 2020[R/OL]. <https://www.stats.gov.sa/sites/default/files/Gross%20Domestic%20Product%20annual%202020%20EN.pdf>.
- [11] The Royal Embassy of Saudi Arabia. About Saudi Arabia: Facts and figures[EB/OL]. http://www.saudiembassy.net/about/country-information/facts_and_figures/.
- [12] OPEC. Annual statistical bulletin[R/OL]. https://www.opec.org/opec_web/en/about_us/169.htm.
- [13] Acwa Power. Saudi Arabia is unlocking the potential of wind energy[EB/OL]. <https://www.acwapower.com/news/saudi-arabia->

- is-unlocking-the-potential-of-wind-energy/.
- [14] GYLFASSON T. Natural resources, education, and economic development[J]. *European Economic Review*, 2001, 45(4/5/6): 847-859.
- [15] The Global Innovation Index. Explore the Interactive Database of the GII 2017 Indicators[EB/OL]. https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2017.pdf.
- [16] IEA. World energy outlook 2021[R/OL]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [17] EIA. International energy outlook 2021[R/OL]. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/consumption/sub-topic-01.php>.
- [18] ExxonMobil. Outlook for Energy: A perspective to 2040[R/OL]. <https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-innovation/Outlook-for-Energy/Outlook-for-Energy-A-perspective-to-2040>.
- [19] Statista. Global energy consumption by source[EB/OL]. <https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/>.
- [20] WoodMac. The blue-green planet: How hydrogen can transform the global energy trade[R/OL]. <https://www.woodmac.com/horizons/the-blue-green-planet-how-hydrogen-can-transform-the-global-energy-trade/>.
- [21] Hydrogen Council. Hydrogen for Net-Zero[R/OL]. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>.
- [22] PwC. The green hydrogen economy, Predicting the decarbonisation agenda of tomorrow[R/OL]. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html>.
- [23] Energy Transitions Commission. Making the hydrogen economy possible: accelerating clean hydrogen in an electrified economy[R/OL]. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible>.
- [24] Kingdom of Saudi Arabia. Vision 2030[R/OL]. https://www.vision2030.gov.sa/media/rc0b5oy1/saudi_vision203.pdf.
- [25] Kingdom of Saudi Arabia. National transformation program-Vision 2030[R/OL]. https://www.vision2030.gov.sa/media/nhyo0lix/ntp_eng_opt.pdf.
- [26] The Ministry of Energy, Kingdom of Saudi Arabia. The national renewable energy program 2019[EB/OL]. <https://www.powersaudiarabia.com.sa/esop/toolkit/opportunity/past/5/detail.si>.
- [27] The Ministry of Energy, Kingdom of Saudi Arabia. The national renewable energy program 2020[EB/OL]. <https://www.powersaudiarabia.com.sa/esop/toolkit/opportunity/past/9/detail.si>.
- [28] Kingdom of Saudi Arabia. National transformation program-Vision 2030[EB/OL]. <https://ksa-climate.com/making-a-difference/nrep/>.
- [29] BNEF. 2020 Saudi Arabia energy transition outlook[R/OL]. <https://vimeo.com/486458634>.
- [30] World Energy Council. Working paper, national hydrogen strategies[R/OL]. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf.
- [31] Aramco. Saudi Aramco and Air Products inaugurate Saudi Arabia's first hydrogen fueling station[EB/OL]. <https://www.aramco.com/en/news-media/news/2019/hydrogen-inauguration>.
- [32] Bloomberg green, Saudi arabia sends blue ammonia to Japan in world first shipment[EB/OL]. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-09-27/saudi-arabia-sends-blue-ammonia-to-japan-in-world-first-shipment>.
- [33] Kedglobal. Hyundai exports hydrogen vehicles to world's No. 1 oil producer Saudi Aramco[EB/OL]. <https://www.kedglobal.com/automobiles/newsView/ked202010100021>.
- [34] Bloomberg Green. Saudi Arabia to ship gas to South Korea and take CO₂ back[EB/OL]. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-03/saudi-arabia-to-ship-gas-to-south-korea-and-take-back-the-co2?sref=B2BBHw9t>.
- [35] Energy Post. Saudi Arabia's clean hydrogen plans for converting ambitions into action[EB/OL]. <https://energypost.eu/saudi-arabias-clean-hydrogen-plans-for-converting-ambitions-into-action/>.
- [36] Reuters. Saudi Arabia wants be top supplier hydrogen energy [EB/OL]. <https://www.reuters.com/business/energy/saudi-arabia-wants-be-top-supplier-hydrogen-energy-minister-2021-10-24/>.
- [37] Electrive. Gaussin explores FCEV production in Saudi Arabia[EB/OL]. <https://www.electrive.com/2021/12/06/gaussin-explores-fcev-production-in-saudi-arabia/>.
- [38] Spglobal. Saudi Arabia to develop hydrogen fuel cell-based transport, sustainable jet fuel[EB/OL]. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/012022-saudi-arabia-to-develop-hydrogen-fuel-cell-based-transport-sustainable-jet-fuel>.
- [39] Reuters. Saudi Arabia wants to be top supplier of hydrogen[EB/OL]. <https://www.reuters.com/business/energy/saudi-arabia-wants-be-top-supplier-hydrogen-energy-minister-2021-10-24/>.
- [40] CSIS. Saudi Arabia's Hydrogen Industrial Strategy[EB/OL]. <https://www.csis.org/analysis/saudi-arabias-hydrogen-industrial-strategy>.
- [41] Dii & Roland Berger. The Potential for green hydrogen in the GCC region[R/OL]. <https://www.menaenergymeet.com/wp-content/uploads/the-potential-for-green-hydrogen-in-the-gcc-region.pdf>.
- [42] BloombergNEF. Hydrogen economy outlook. 2020[R/OL]. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>.
- [43] IEA. The future of hydrogen[R/OL]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- [44] IRENA. Hydrogen from renewable power—Technology outlook for the energy transition. 2018[R/OL]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf.
- [45] IRENA. Renewable power generation costs in 2020[R/OL]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf.
- [46] Saudi Gulf Projects. Saudi Arabia signed power purchase agreement for 2,970 MW solar PV projects[EB/OL]. <https://www.saudigulfprojects.com/2021/04/saudi-arabia-signed-power-purchase-agreement-for-2970mw-solar-pv-projects/>.
- [47] IRENA. Future of solar photovoltaic[R/OL]. https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf.
- [48] IRENA. Green hydrogen cost reduction-scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal[R/OL]. <https://www.irena.org/-/media/>

- Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.
- [49] IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective[R/OL]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.
- [50] Strategy&. the dawn of green hydrogen—Maintaining the GCC's Edge in a decarbonized world 2020[R/OL]. <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-green-hydrogen.pdf>.
- [51] HURSKAINEN M, IHONEN J. Techno-economic feasibility of road transport of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(56): 32098-32112.
- [52] DNV G L. Study on the import of liquid renewable energy: Technology cost assessment[R/OL]. https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/2598/DNV-GL_Study-GLE-Technologies-and-costs-analysis-on-imports-of-liquid-renewable-energy.pdf.
- [53] ENTSO-E. TYNDP 2020 scenario report[R/OL]. https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf.
- [54] BØE A V, GULLBRÅ D O, REINERTSEN T A. An efficiency comparison of liquid hydrogen, ammonia, and liquid organic hydrogen carriers for maritime use[D]. Høgskulen på Vestlandet, 2021.

附录

表 A1 沙特新能源项目列表^[49]

Table A1 List of Renewable energy projects in Saudi Arabia

时间	项目名称	项目装机	开发商	项目状态
第一轮(2017 年)	Sakaka 光伏项目	300 MW	ACWA Power	2019 年 11 月并网
	Dumat Al Jandal 风电项目	400 MW	EDF/Masdar	2021 年 8 月并网
第二轮(2019 年)	Madinah 光伏项目(A 类)	50 MW	Al Blagha Holding/Al fanar Construction/Desert Technologies	建设中
	Rafha 光伏项目(A 类)	20 MW	Al Blagha Holding/Al fanar /Desert Technologies	建设中
	Al-Faisaliah 光伏项目(B 类)	600 MW	ACWA Power/Al-Babtain/GIC	建设中
	Jeddah 光伏项目(B 类)	300 MW	Masdar/EDF/Nesma	建设中
	Rabigh 光伏项目(B 类)	300 MW	Marubeni/Al Jomaih	建设中
	Qurrayyat 光伏项目(B 类)	200 MW	ACWA Power/Al-Babtain/GIC	建设中
	Sudair 光伏项目	1.5 GW	ACWA/Badeel (PIF)	建设中
第三轮(2020 年)	Wadi Ad Dawasir 光伏(A 类)	120 MW		投标
	Layla 光伏(A 类)	80 MW		投标
	Ar Rass 光伏(B 类)	700 MW		投标
	Saad 光伏(B 类)	300 MW		投标

表 A2 海运参数设定^[49]

Table A2 Key shipping parameters

参数	液氢	液氨	LOCH
管道尺寸/英寸		48	
液化投资 CAPEX/(美元/kW)	1350	808	84
液化可变运维 OPEX/(kWh/kWh)	0.3	0.14	0.051
液化固定运维 OPEX/%CAPEX		2.5%	
船运容积/m ³		160000	
运输船投资 CAPEX/(美元/船)	179944000	134924800	99600000
运输船可变运维 OPEX/(美元/船/年)	9900000	9047000	15604000
液化固定运维 OPEX/% CAPEX		4%	
燃料/(MWh/kg/1000 km)		4.0	
存储投资 CAPEX/(美元/MWh)	750	226	239
存储固定运维 OPEX/%CAPEX		2%	
气化效率	100%	100%	90%
气化投资 CAPEX/(美元/kW)	273	235	237
气化固定运维 OPEX/%CAPEX		2.5%	
用电支出/(美元/MWh)		50	

表 A3 管道运输参数设定^[50]

Table A3 Key Network design parameters

运载能力	48 英寸			36 英寸			20 英寸		
	新建	翻新		新建	翻新		新建	翻新	
投资成本/(美元/m)	2750	500		2200	400		1510	275	
压缩机间距/km					100~200				
压缩机投资成本/(美元/MW)					3400000				
压缩机功率/MW/1000 km)	100%	75%	25%	100%	75%	25%	100%	75%	25%
	434	183	6	93	40	2	26	6	0.6
电费/(美元/kWh)					50				