

特色专题

中国与沙特清洁能源合作:基础、挑战与未来发展潜力

王艺博¹, 任瑞华¹, 葛建平^{1,2*}

摘要 清洁能源转型是一项应对全球气候变化,牵动全球供应链的工程,而关键矿产则是实现净零碳排放目标和发展清洁能源技术不可缺少的物质基础。在沙特试图摆脱对石油经济依赖的前提下,如何保障能源转型过程中所亟需的关键矿产供给、快速发展清洁能源产业是沙特调整经济结构多元化、实现“2030 愿景”的重点。当前,中国“一带一路”倡议与沙特“2030 愿景”目标高度契合,双方在清洁能源领域合作可以充分实现资源禀赋互补、技术经验共享、产业市场互通。因此,应在社会、供应链等多维度下梳理和分析中沙两国在清洁能源领域的合作基础与发展潜力,在双方的利益视角下提出合作建议,推动沙特能源转型、促进沙特“2030 愿景”实现的同时,进一步释放双方资源共享、技术创新、市场开拓等潜力,推进中国与沙特周边地区建立合作伙伴关系,构建“一带一路”中国国际合作发展新格局。

关键词 清洁能源;合作;中国;沙特;一带一路

当今世界,化石能源的大量使用,带来了环境、生态和全球气候变化等领域一系列问题^[1]。在人类共同应对全球气候变化大背景下,世界各国将目光注视到可再生能源上,纷纷制定能源转型战略,提出更具挑战的能效目标,制定更加科学的低碳政策,推动清洁能源发展^[2]。海湾阿拉伯国家合作委员会(简称“海合会”)国家正在应对气候变化作出清洁能源转型努力,即使其中一些国家无法在 2050 年实现净零碳排放^[3]。清洁能源转型是一个阶段性的过程,由于海湾地区的整体经济特征是以石油为基础的,因此,这些成员国的能源转型过渡需要更长的时间^[4]。

作为海合会国家的代表性成员国,沙特在 2021

年 10 月 23 日在首都利雅得举行的首届清洁倡议论坛上宣布,作为世界上最大的原油出口国,沙特的目标是在 2060 年前实现净零碳排放。当前,以清洁能源转型为抓手,构建适应高比例可再生能源发展的新型清洁能源系统是实现净碳排放目标的关键举措,而实现净零碳排放目标和能源结构的转型则需要大力发展清洁能源技术,矿产则是支撑清洁能源技术发展必不可少的物质基础^[5]。

近年来,中国和沙特(简称“中沙”)关系实现飞跃式发展,两国始终彼此支持双方主权独立,尊重各自发展道路,坚持大小国家一律平等,坚定维护多边主义。在中阿合作论坛等平台 and 多项合作机制的保障下,中沙双方在“一带一路”框架内的各领域合作不断拓宽,双方发展高度互补,特别是两国已初步形成以能源合作为主轴,以基础设施建设、贸易和投资为两翼,以新能源等高新领域为突破口的合作格局^[6]。在

1. 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083

2. 中国地质大学(北京)自然资源战略发展研究院,北京 100083

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(72274183); 北京市社会科学基金项目(21DTR059)

作者简介: 王艺博,博士研究生,研究方向为自然资源经济与管理,电子邮箱: yeebom@email.cugb.edu.cn; 葛建平(通信作者),教授,研究方向为资源经济与政策,电子邮箱: gejianping@cugb.edu.cn

引用格式: 王艺博,任瑞华,葛建平. 中国与沙特清洁能源合作:基础、挑战与未来发展潜力[J]. 科技导报, 2025, 43(7): 79-91; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01129

“一带一路”的纽带下,中国与沙特的合作达成了清洁能源转型发生和成功的必要条件——资源、技术与市场的“完美结合”^[7]。因此,本文在全球清洁能源转型的背景下,以中国“一带一路”与沙特“2030 愿景”战略性对接为抓手,多维度分析两国在清洁能源领域的合作基础与发展潜力,在双方立场下提出政策建议,以期推动中沙经济与资源的可持续发展,进一步增进双方人民福祉。

1 中沙清洁能源合作的政治基础与发展潜力

1.1 中沙全面战略伙伴关系愈发紧密

中沙于 1990 年建交以来,两国友好关系不断深入,于 2008 年两国建立战略性友好关系。随着丝绸之路经济带兴起,中国基本保持着沙特第一大贸易伙伴的地位,双方投资涵盖油气、制造、电力等众多领域,完成了一批推动中沙战略合作升级的标志性项目工程。2016 年中沙建立全面战略伙伴关系,并决定成立中沙高级别联合委员会。

纲领性文件聚焦中沙清洁能源领域合作。为进一步加强中国同沙特的战略性关系,2022 年 12 月 8 日,中国政府与沙特政府就巩固和发展中沙全面战略伙伴关系及共同关心的国际和地区问题交换了意见,签署了《中华人民共和国和沙特阿拉伯王国全面战略伙伴关系协议》《中华人民共和国政府和沙特阿拉伯王国政府关于共建“一带一路”倡议与“2030 愿景”对接实施方案》,同意每 2 年在两国轮流举行一次元首会晤,全面落实两国领导人关于深化共建“一带一路”倡议与“2030 愿景”对接的重要共识,共同推进两国能源、矿产、贸易等领域的建设合作^[8-10]。会上,中沙联合声明支持沙特发起的“清洁沙特”和“清洁中东”倡议,双方同意通过资金、技术支持和能力建设切实帮助发展中国家提高应对气候挑战的能力,进一步发挥中沙互补优势,实现互利和共同发展^[11]。此外,中沙在峰会期间签署了 34 项投资协议,涉及清洁能源、氢能、光伏能源等多个领域,价值近 500 亿美元^[12]。

1.2 中国拥有清晰的清洁能源外交布局

在全球能源加速转型,共同应对气候变化的大背景下,中国与“一带一路”沿线众多国家清洁能源合作

关系紧密。截至 2023 年,中国已与超过 150 多个国家、32 个国际组织签署 200 多份共建“一带一路”合作文件。在此基础上,中国已与多个国家、组织签署双边、多边清洁能源合作机制文件,推动清洁能源发展所需矿产、技术、资金、人才等资源互联互通,实现区域能源、经济的跨越式发展,让清洁能源“中国经验”惠及更多国家和地区^[13](表 1)。

表 1 中国与部分国家、组织在清洁能源方面的合作机制

双边机制	多边机制
中国-瑞士能源合作	中国-东盟清洁能源能力建设计划
中国-巴基斯坦能源合作	中国-东盟能源合作
中国-俄罗斯能源合作	中国-东盟清洁能源培训中心
中国-埃及能源合作	中国-中东能源项目对话与合作中心
中国-文莱能源合作	中国-非盟能源伙伴关系
中国-蒙古能源合作	亚太经合组织可持续能源中心
中国-阿富汗能源合作	“一带一路”能源合作伙伴关系
中国-刚果(布)能源合作	二十国集团(G20)能源合作
中国-玻利维亚能源合作	中欧(盟)能源对话(ECECP)
中国-老挝能源合作	联合国亚太经社会(ESCAP)
中国-塞尔维亚能源合作	上海合作组织能源俱乐部
中国-缅甸能源合作	大湄公河次区域能源合作

注:资料来源于“一带一路”能源合作网^[14]。

作为全球清洁能源市场最大的投资方和产能的引领者,中国始终秉持优势互补、互利共赢的原则,鼓励国际区域间共建具有开放性、满足全球清洁能源需求的产业链与供应链,拓宽在新型储能、海上风电、光伏电网技术等方面的合作空间,提高各国本土的清洁能源供给和消费水平,加快中国与各国的清洁能源产业升级和低碳能源转型的步伐,推动全球清洁能源合作的可持续发展。

2 中沙清洁能源合作的社会基础与发展潜力

2.1 沙特具备支撑“一带一路”的独特属性

在中国看来,沙特具备支撑“一带一路”的独特属性,即沙特具有重要的地缘战略位置和能源超级大国角色。

重要的地缘战略位置。沙特处于有利的战略地位,可以充分实现“一带一路”倡议的海上和陆上互联

互通的雄心。沙特位于中东的中心位置,与8个国家接壤,占据阿拉伯半岛约80%的面积,也是唯一拥有通往波斯湾和红海的沿海通道的国家^[15]。由于霍尔木兹海峡和曼德海峡是全球能源市场的潜在阻塞点,如果通道受到限制或关闭,沙特则提供了一条可能替代穿越半岛的过境路线。

能源超级大国。中国传统能源结构呈现多煤、少气、贫油的特征,保障国家能源安全稳定供应是共建“一带一路”的重点领域^[16]。沙特作为全球公认的能源大国,2020年沙特已探明石油储量达到409亿t,居世界第二位(仅次于委内瑞拉),占比全球17.2%;2022年,沙特石油产出5.7亿t,居世界第二位(仅次于美国),占比全球市场13.0%;此外,2020年沙特本土已探明的天然气储量达到60000亿m³,占据全球的3.2%,2022年天然气产量为1204亿m³,占据全球市场3.0%^[17]。

2.2 中国是沙特实现“2030愿景”的重要保障

对沙特来说,中国一直是一个巨大的石油出口市场,也是促进实现沙特“2030愿景”目标中清洁能源转型的重要合作伙伴。

中沙在能源进口安全和能源出口安全上是相互依存的^[18]。在低油价周期,为了能保住亚洲市场的份额,沙特针对中国市场调低了销往亚洲的原油基准价格^[19]。因此,沙特石油出口安全的重要利益就是确保在中国市场的份额。中国是沙特最大的石油进口国,沙特也是中国最大的石油出口国。2022年,沙特石油共出口36480万t,出口中国8750万t(24.0%),远高于其他进口国;中国石油共进口50820万t,其中17.2%的石油来自沙特。随着石油市场份额竞争加剧,国际石油价格起伏不定,对沙特来说,中国的市场需求是其石油安全利益的重要保障。

中国引领全球清洁革命。中国在清洁能源领域的投资和发展上起到了举足轻重的作用。2022年,全球清洁能源投资达1.4万亿美元,中国清洁能源投资近5400亿美元,占全球总额的近40%^[20]。同时,中国在清洁能源技术研发和应用方面取得了显著成果,成为全球清洁能源技术的领导者之一。中国的风力、光伏发电装机容量居全球首位,氢能、新能源汽车产能全球最大,核能发电量位居世界第二。中国清洁能源技术的进步与发展,能够支持沙特“2030愿景”目标

实现,落实“清洁沙特”低碳循环经济理念的计划,帮助沙特完成经济多元化以减少对石油依赖。

3 中沙清洁能源合作的供应链基础与发展潜力

3.1 沙特能源转型所需关键矿产供给有限

发展清洁能源技术所需的矿产具有种类多、强度大、用途广、性能高且替代难的特点,大部分矿产被全球重要经济体列为关键矿产^[21]。以风力和太阳能光伏发电为例,铜、铁、铝、镍和钕、镓、铽等稀土元素是制造风力发电设备不可或缺的关键矿产;铜、镍、银、镉、镓、铟、镁、硒、硅、锡和碲则是太阳能光伏产业发展必备的关键矿产^[22]。这些关键矿产由于具有耐热、难熔、耐腐蚀以及优良的光、电、磁等物化特性,在清洁能源技术的开发和应用中发挥着特殊作用^[23]。清洁转型将推进关键矿产的需求大幅增加。在实现《巴黎协定》目标的前提下,随着能源转型的步伐加快,清洁能源技术正成为增长最快的关键矿产需求领域^[24]。尤其是过去10年,以风、光发电为代表的清洁能源技术不断进步,其生产、安装和运营成本不断下降,风、光发电的装机容量也随之不断增加,全球风电装机量增加了4倍,光伏发电装机量更是增长了近20倍。预计到2040年,在可持续发展情景下,风、光发电的装机量将在目前的水平上增长3倍;在技术进步和回收利用水平提高的情况下,风力、太阳能光伏发电对关键矿产需求将增加1倍以上,对稀土的需求更是增长4倍以上。

沙特对清洁能源发展必需的关键矿产保障压力倍增。在“2030愿景”目标下,沙特制定了国家可再生能源计划,到2023年光伏发电装机量达到20GW、风力发电装机量达到7GW;到2030年光伏发电装机量达到40GW、风力发电装机量达到16GW^[25]。在目前及可预见的技术条件下,按照沙特国家可再生能源计划设定的目标来发展风力、太阳能光伏发电产业,风、光发电对相关关键矿产的需求将大幅提升。经过推算,2016—2023年,铜、铁、铝等大宗矿产的需求量将分别达到12万、100万、0.5万t;钕、镓、铽等稀土矿产的需求量分别达到853、68和1t;硒、硅、碲等非金属矿产的需求量分别为10、126530和94t;

其他的镍、银、镁、锡、镉、镓和铟等稀有金属矿产的需求量将分别达到 799、2660、1070、10410、122、2 和 90 t。相比 2016—2023 年,2030 年风、光发电目标下的所有关键矿产需求量翻了一番,其中铜、铁、铝等大宗矿产的需求量将分别达到 24 万、228 万、1 万 t;钽、镨、铽等稀土矿产的需求量分别达到 1949、152 和 2 t;硒、硅、碲等非金属矿产的需求量分别为 20、253060 和 188 t;其他的镍、银、镁、锡、镉、镓和铟等稀有金属矿产的需求量将分别达到 1820、5320、2140、20802、244、4 和 180 t^[26-29]。

沙特的本土关键矿产供给有限。除绿色能源以外,信息通信、绿色交通、航空航天、军事科技等战略性新兴产业的发展也将对其他关键矿产产生巨大需求。沙特本土矿产的供给并不理想,根据现有的统计信息,2021 年沙特铜、铁产量分别约 10 万 t 和 32 万 t,如果仅凭沙特本土的矿石生产来满足风、光发电产业的需求,必定会严重影响相关矿产的供需平衡,进而影响相关矿产的价格,并进一步增加其他相关行业以及整个社会经济体系的压力,阻碍沙特国家经济社会的可持续健康发展。沙特作为全球原油储量最大、石油产量最高的国家,拥有包括金、银、铜、铁、铝、锌、磷酸盐等金属和非金属矿产。但是,风、光发电发展所需的其他矿产,如镍、镁、锡、镉、镓、铟和稀土等关键矿产,在沙特分布极少,仅凭国内供给很难满足未来需求。因此,通过挖掘自身矿产潜力,增强对外合作,是沙特保障矿产供给安全,推进绿色能源转型,实现“2030 愿景”的必经之路。

3.2 全球清洁能源所需关键矿产供应链冲突明显

以风、光发电所需的关键矿产清单为例。风能发电产业所需的铜、铁、铝、镍和钽、镨、铽等稀土元素主要分布在俄罗斯、巴西、澳大利亚、中国、印度、越南、智利、秘鲁、墨西哥、几内亚、牙买加、印度尼西亚、新喀里多尼亚。其中,全球铜主要分布在智利、澳大利亚和秘鲁,智利拥有全球最多的铜,储量占比全球 19.00%(1.9 亿 t),同时,其铜产量占全球 24.34%(530 万 t),而中国铜储量虽然不多,仅占全球 4.10%(4100 万 t),但精炼铜产量却占全球 42.86%(1100 t);全球铁主要分布在澳大利亚、巴西和俄罗斯,三者的储量之和达到全球 65.88%(560 亿 t),其中,澳大利亚铁储量最为丰富,占全球的 31.76%(270 亿 t),同时,

其铁产量也位居世界第一,占全球 33.75%(5.4 亿 t);几内亚、越南和澳大利亚分别控制着 74 亿、58 亿、51 亿 t 的铝,三者储量合计占全球铝的 59.03%(183 亿 t);印度尼西亚、巴西和澳大利亚分别控制着 2100 万、1600 万、2100 万 t 的镍,三者储量合计占全球 58.00%(5800 万 t);稀土则主要分布在中国、越南、俄罗斯和巴西,其中,中国作为世界第一的稀土大国,稀土储量占全球 33.85%(4400 万 t),同时产量达到了全球的 70%(21 万 t)。

在风能发电所需的关键矿产清单中,澳大利亚、巴西、俄罗斯和中国的资源地位尤为突出。其中,澳大利亚的关键矿产种类和储量最为丰富,除了稀土外,其他矿产储量排名都在世界前 3 名,其中铁、镍储量都占比全球 20% 以上,这使得澳大利亚在风能发电相关的矿产供给领域具有举足轻重的地位。巴西除了铜以外,其他储量排名都在世界前 3 名,虽然在整体矿产储量上略逊澳大利亚一筹,但也是世界关键矿产供给链上的重要一环。俄罗斯除铝以外,其他矿产储量都较为丰富,均排名世界前五。与以上 3 个国家不同,中国除了稀土外,其他关键矿产并不丰富,但是其产量较为突出,如铜、稀土、铝等产量平均超过了全球的 40%,出色的产能使得中国在全球关键矿产的供应链上发挥着不可忽视的作用。

太阳能光伏发电产业所需的铜、镍、银、镉、铜、镓、铟、镁、硒、硅、锡和碲等关键矿产主要分布在中国、俄罗斯、澳大利亚、秘鲁、美国、加拿大、墨西哥、巴西、印度尼西亚、波兰、斯洛伐克、希腊、缅甸、智利、新喀里多尼亚和南非。银主要分布在秘鲁、澳大利亚、中国,它们分别控制着全球银储量的 17.82%(9.8 万 t)、16.73%(9.2 万 t)、12.91%(7.1 万 t);镉主要分布在澳大利亚、中国和俄罗斯,它们分别拥有全球镉储量的 31.43%(2 万 t)、14.76%(0.9 万 t)、10.48%(0.7 万 t);镁资源主要分布在俄罗斯和中国,二者合计控制了全球镁储量的 42.35%(28.8 亿 t)和全球镁产量的 66.48%(1795 万 t);硒主要分布在俄罗斯、秘鲁、美国,3 国分别拥有全球硒储量的 24.69%(2 万 t)、16.05%(1.3 万 t)、13%(1 万 t);锡主要分布在印度尼西亚、中国、缅甸,它们分别控制着全球锡储量的 17.39%(80 万 t)、15.65%(72 万 t)、15.22%(70 万 t);碲在全球的分布较为分散,俄罗斯、美国和

中国分别控制全球碲储量的 14.06%(0.6 万 t)、10.94%(0.4 万 t)和 9.38%(0.3 万 t);镓、锗、硅等没有具体的储量信息,但就产量而言,全球主要由中国供给,即中国生产了全球镓的 98.18%(540 t),全球硅的 68.18%(600 万 t),全球锗的 58.89%(530 t)。

清洁能源发展所需的关键矿产全球分布较为集中。如表 2 所示,中国、澳大利亚和巴西在储量、产量上都较为突出,是相关关键矿产供给的核心来源。其他国家虽然具有相关的矿产,但是存在种类不全面、

储量不丰富等缺陷,供给还要依赖现存的资源大国。此外,全球的资源供应链可能会因为相关供应国的自然灾害、产业或贸易政策等变化导致关键矿产供应面临单点或者多点中断的风险^[30]。随着清洁能源转型加速,关键矿产已成为全球资源布局的核心要素。在稀土和分散金属等战略资源领域,各国正通过供应链多元化、技术创新和战略储备等方式增强供应韧性。该过程中,国际间的协同合作与市场竞争交织并存,将持续塑造全球清洁能源矿产供应链的长期发展格局^[31]。

表 2 2022 年风、光发电所需 14 种关键矿产的储量前 5 的国家概况

名称	国家	产量/t	产量占全球比例/%	储量/t	储量占全球比例/%
铜	智利	5200000	20.00	190000000	21.35
	澳大利亚	830000	3.19	97000000	10.90
	秘鲁	2200000	8.46	81000000	9.10
	俄罗斯	1000000	3.85	62000000	6.97
	墨西哥	740000	2.85	53000000	5.96
铁	澳大利亚	540000000	33.75	27000000000	31.76
	巴西	260000000	16.25	15000000000	17.65
	俄罗斯	63000000	3.94	14000000000	16.47
	中国	240000000	15.00	6900000000	8.12
	印度	180000000	11.25	3400000000	4.00
铝	几内亚	86000000	22.63	7400000000	23.87
	越南	3800000	1.00	5800000000	18.71
	澳大利亚	100000000	26.32	5100000000	16.45
	巴西	33000000	8.68	2700000000	8.71
	牙买加	3900000	1.03	2000000000	6.45
镍	印度尼西亚	1600000	48.48	21000000	21.00
	澳大利亚	160000	4.85	21000000	21.00
	巴西	83000	2.52	16000000	16.00
	俄罗斯	220000	6.67	7500000	7.50
	新喀里多尼亚	190000	5.76	7100000	7.10
稀土	中国	210000	70.00	44000000	33.85
	越南	4300	1.43	22000000	16.92
	俄罗斯	2600	0.87	21000000	16.15
	巴西	80	0.03	21000000	16.15
	印度	3900	1.30	6900000	5.31
银	秘鲁	3100	11.92	98000	17.82
	澳大利亚	1400	5.38	92000	16.73
	中国	3600	13.85	71000	12.91
	波兰	1300	5.00	65000	11.82
	俄罗斯	1200	4.62	45000	8.18

表 2 2022 年风、光发电所需 14 种关键矿产的储量前 5 的国家概况 (续)

名称	国家	产量/t	产量占全球比例/%	储量/t	储量占全球比例/%
镉	澳大利亚	400	1.67	19800	31.43
	中国	10000	41.67	9300	14.76
	俄罗斯	1000	4.17	6600	10.48
	秘鲁	300	1.25	5100	8.10
	墨西哥	1200	5.00	3600	5.71
镓	中国	540	98.18	NA	NA
	俄罗斯	5	0.91	NA	NA
	日本	3	0.55	NA	NA
	韩国	2	0.36	NA	NA
	乌克兰	1	0.18	NA	NA
铟	中国	530	58.89	NA	NA
	韩国	200	22.20	NA	NA
	日本	66	7.32	NA	NA
	加拿大	55	6.09	NA	NA
	法国	20	2.21	NA	NA
镁	俄罗斯	950000	3.52	2300000000	33.82
	中国	17000000	62.96	580000000	8.53
	斯洛伐克	480000	1.78	370000000	5.44
	澳大利亚	2600000	9.63	290000000	4.26
	希腊	510000	1.89	280000000	4.12
硒	俄罗斯	350	10.94	20000	24.69
	秘鲁	40	1.25	13000	16.05
	美国	NA	NA	10000	12.35
	中国	1300	40.63	6100	7.53
	加拿大	65	2.03	6000	7.41
硅	中国	6000000	68.18	NA	NA
	俄罗斯	640000	7.27	NA	NA
	巴西	400000	4.55	NA	NA
	挪威	360000	4.09	NA	NA
	美国	310	0.00	NA	NA
锡	印度尼西亚	74000	23.87	800000	17.39
	中国	95000	30.65	720000	15.65
	缅甸	31000	10.00	700000	15.22
	澳大利亚	9700	3.13	570000	12.39
	巴西	18000	5.81	420000	9.13
碲	俄罗斯	80	12.50	4500	14.06
	美国	NA	NA	3500	10.94
	中国	340	53.13	3000	9.38
	加拿大	50	7.81	800	2.50
	南非	4	0.63	800	2.50
锂	智利	39000	30.00	9300000	35.77
	澳大利亚	61000	46.92	6200000	23.85

表 2 2022 年风、光发电所需 14 种关键矿产的储量前 5 的国家概况 (续)

名称	国家	产量/t	产量占全球比例/%	储量/t	储量占全球比例/%
锂	阿根廷	6200	4.77	2700000	10.38
	中国	19000	14.62	2000000	7.69
	美国	NA	NA	1000000	3.85
钴	刚果(金)	130000	68.42	4000000	48.19
	澳大利亚	5900	3.11	1500000	18.07
	印度尼西亚	10000	5.26	600000	7.23
	古巴	3800	2.00	500000	6.02
	菲律宾	3800	2.00	260000	3.13

注: 资料来源于USGS^[32]; NA代表没有信息。

3.3 中国拥有清洁能源发展的强大供应链与产能

虽然太阳能和风能无疑将成为能源转型的明星, 但如果没有基础设施将电力从生产地输送到最终用户, 可再生能源发电能力就毫无用处^[33]。因此, 清洁能源产业的发展需要大量的关键矿产作为物质基础去建设落地。

中国拥有清洁能源相关的大部分关键矿产产能。根据已知数据统计, 沙特拥有包括金、银、铜、铁、铝、锌、磷酸盐等金属和非金属矿产。但是, 清洁能源发展所需的其他矿产, 如镁、锡、镉、镓、铟、碲和稀土等关键矿产在沙特分布极少。中国则在上述关键矿产具有资源禀赋优势。尽管中国在清洁能源发展相关的铜、镍等关键矿产禀赋并不丰富, 但是作为世界加工中心, 中国多数清洁能源发展相关的关键矿产产能全球第一, 其中镉、硒的产量占比全球超过 40%, 铟、镁、硅和碲的产量占比全球近 60%, 镓更是达到 98%^[34]。

清洁能源制造产能主要集中在 中国^[35]。国际能源署(IEA)发布的最新版本《能源技术展望 2023》报告指出, 中国是许多清洁能源技术的净出口国, 基本垄断了关键的清洁能源供应链, 目前拥有全球 70% 以上的太阳能光伏组件、40% 左右的风能设备、60% 电动汽车电池、40% 热泵设备制造产能^[36]。此外, 在近期全球宣布的到 2030 年制造业产能扩张计划中, 中国占了大部分, 其中光伏组件(电池和模块约 85%, 晶圆约 90%); 陆上风电组件(叶片约 85%, 短舱和塔架约 90%); 以及电动汽车电池组件(98% 用于阳极, 93% 用于阴极材料)。

4 中沙清洁能源合作的生产要素、技术基础与发展潜力

4.1 沙特本土清洁能源发展潜力巨大

沙特拥有充足的太阳能^[37]。沙特拥有世界上最广阔的无雨区域和强烈又长久的阳光资源, 其位于北纬 20°~30°西亚地区的阿拉伯半岛, 平均日照量超过 2200 kW·h/m², 日照时间高达 8.9 h, 在全球发展太阳能潜能排行榜上排名第六位。2019 年沙特发布《2030 年可再生能源规划》, 大力推动建设新能源发电项目, 其中太阳能是主要发展方向。计划到 2023 年实现新能源发电装机 27.3 GW, 16 GW 发电能力将由太阳能提供(2013 年太阳能发电能力为 19 MW); 2030 年达到 60 GW, 其中 40 GW 发电能力将由太阳能提供。

沙特具备风电发展潜力^[37]。一般来说一个地区风力常年平均在 7 m/s 就是比较适宜风力发电的区域, 沙特大部分地区全年平均风速高达 6~8 m/s, 2 个主要风能区域集中在东部波斯湾、西部红海沿岸以及西北部地区, 靠近阿拉伯湾的海岸平均风速为 7.5~8 m/s, 靠近红海的海岸平均风速为 7~7.5 m/s, 都具有发展风电的潜力^[38]。沙特计划到 2023 年风力发电装机量达到 7 GW, 到 2030 年风力发电装机量达到 16 GW。

沙特制氢成本全球最低。随着氢能的可存储性和以燃料电池为代表的氢能发电技术的逐渐成熟, “风光发电+氢储能”一体化的氢能应用受到沙特重视。氢气生产源于天然气和太阳能、风能的转化。其中, 由天然气转化的氢气属于蓝氢, 由太阳能、风能发电进行电解产生的氢气属于绿氢。沙特拥有丰富的天然气、太阳能和风能资源, 具备发展蓝氢和绿氢产

业的资源优势^[39]。欧美各国利用可再生能源生产氢气成本很高,但沙特却有得天独厚的优势,稳定的阳光和风能以及低廉的土地,使得沙特制造氢气的成本可达到全球最低,即 1.5 美元/kg,甚至低于当下用非可再生能源制氢的成本^[40]。未来几年,预计沙特生产的蓝氢和绿氢成本还将大幅下降,到 2030 年蓝氢生产成本将从 1.34 美元/kg 降至 1.13 美元/kg;到 2050 年前,绿氢生产成本可能进一步下降到 1 美元/kg^[41]。此外,沙特计划投资 1100 亿美元开发蓝氢等对清洁能源转型至关重要的燃料。在沙特发布的“2030 愿景”中,目标是到 2030 年实现 400 万 t 氢能年产量和出口量的目标,成为全球氢能经济的引领者。

沙特核电计划规模较大。沙特具有世界级的铀矿资源,在其“2030 年愿景”中提及,未来 25 年内建造 16 个核电站,投资超 800 亿美元^[25]。2022 年,沙特成立沙特核能控股公司(SNEHC)建设核电厂,开展电力生产、制热及淡化海水等工作,同时参与沙特本国和国际上的核项目,并将建设一个吸引核科技人才的国家平台。沙特原本计划于 2019 年开始核电站建设,2027 年投入运营。但当前项目合作伙伴暂时未定。

沙特地热能源资源相对丰富。沙特红海沿岸拥有许多众多火山和温泉,其中 Al Khouba 温泉被视为沙特最重要的潜在地热资源。过去 5 年,沙特吉赞等地已经安装了一些直接使用的低品位地热应用,而地热发电厂还未普及^[42]。沙特可再生能源发展部门计划开发地热资源,规划 1 GW 的地热发电,在开发太阳能和风力发电的基础上。2024 年,TAQA 地热公司将在沙特和中东和北非地区勘探和开发地热资源,利用沙特丰富的中低焓资源,实现大规模直接使用地热制冷和海水淡化项目^[43]。

沙特电动汽车发展空间大。在“2030 愿景”中沙特政府设定了电动汽车的目标,预计到 2030 年,首都利雅得的电动汽车数量将至少占 30%,并努力进行能源转型^[25]。汽车消费的基础支撑是人口基数,而中东地区消费能力较强的海湾六国中,沙特以 3640.9 万人口位居首位。此外,沙特居民大部分拥有自己的独栋别墅,可以安装充电桩,对电动汽车使用更加方便。

4.2 中国清洁能源技术相对全球领先

中国光伏技术处于全球绝对领先地位。中国拥有全球最完善的产业链,其中,光伏组件作为硅片及

电池的下游产业,是中国光伏出口领域的主要产品。在硅片领域,硅片大型化、薄片化可有效降低产业链制造成本,驱动光伏组件功率提升。通威股份有限公司在行业中率先开启 210 mm 大尺寸的 TOPCon 技术开发并顺利投产,产品转换效率已超过 25%;TCL 中环新能源科技股份有限公司将主流 P 型(PERC)硅片厚度切换为 150 μm ,且将 N 型硅片厚度下降至 150 和 130 μm ,薄片化进程全球行业领先。在电池领域,太阳能光伏电池效率是光伏科技创新的核心。在德国慕尼黑太阳能光伏展览会上,经欧洲太阳能测试机构(ESTI)权威认证,中国企业隆基绿能实现了晶硅-钙钛矿叠层电池 33.5% 的转换效率,“再次”刷新电池转换效率世界纪录。

中国风力发电技术相对全球领先。大型化风机有助于项目综合降本,可以摊薄海风项目的基础设施、安装和输电的高成本。目前,国际海风机组主流单机容量为 7 MW 左右,中国企业金风科技研发的 GWH252-16 风机,全球首台 16 MW 超大单机容量海上离岸风电机组已于 2022 年 11 月下线,中国海装、明阳智能公司分别研发的 MySE18 和 H260-18 系列(全球最大风机,单机容量为 18 MW)也已于 2023 年 1 月下线,有望在未来 1~2 年内实现量产,进一步推高中国海风机组的技术优势。叶片是风电组件中重要的组成部分,时代新材公司自主研发的 TMT110A 海上叶片首次采用碳纤维拉挤板,可较大程度地降低叶片和整机载荷,降低项目成本,旗下百米级海上叶型 SR220、D225 均实现了技术突破。此外,全球海拔最高陆上风电场(海拔 5050 m)西藏措美哲古风电场项目的完成,填补了国际超高海拔地区风电开发与管理的技术空白。

中国氢能源技术不断进步。自 2020 年“双碳”目标提出后,中国氢能产业热度攀升,发展进入快车道。制氢端,派瑞氢能公司是 2022 年北京冬奥会绿氢装置唯一供应商,研发出首台单体产氢量 2000 Nm^3/h 水电解制氢装备,属于全球电解水制氢行业的前列企业。储氢端,中集安瑞科公司在氢气长管拖车、站用储氢瓶组和球罐产品全球市占率领先,且已成功研发 99、103 MPa 站用储氢瓶组等产品,为香港首辆氢燃料电池双层巴士提供 IV 型车载储氢瓶及供氢系统。加氢端,蜀道装备公司是中国最早进入天然气液化行

业并有关键技术的企业之一,公司具备 35 MPa/70 MPa 气态加氢站及液态加氢站的设计、装备能力及项目经验。氢能和氢燃料电池的发展规划已写入中国政府报告中,未来的技术进步会相当迅速。

中国核电跻身世界核电大国之列。核电发展一直以来是国家战略,“中国制造 2025”需要核电拉动国家制造业的发展;国家打响“蓝天保卫战”、解决环境污染等问题需要核电发展。核电的可持续发展是确保中国核大国地位、抢占核领域制高点的重要一环,发展核电符合国际发展规律。中广核集团与中国核电集团基于 ACP1000 和 ACP1000+的技术优势,联合开发具有完全自主知识产权的“华龙一号”机组,是目前国际上安全标准最高的核电站之一,也标志着中国真正自主掌握了三代核电技术。此外,中国核电集团已与沙特签署了一份关于高温气冷反应堆合作的谅解备忘录^[44]。

中国石油掌握了地热行业核心技术。地热能作为一种可再生、低碳的能源形式,可以弥补太阳能和风能等间歇性能源的不足。中国石油在地热产业具有五大关键核心技术:在地热资源勘探方面,地热地球物理勘查与评价技术,可以识别地层界面、断裂和其他构造,识别侵入岩体等热源岩体,识别热储、通道位置及含水性;地热井优快钻完井技术,形成了强漏地层的固井、堵漏技术以及高温地热钻完井技术体系;热储改造技术,针对物性较差、渗透率较低、出水量较小的砂岩型地层,通过钻径向分支井、深穿透射孔、压裂改造等增产措施,人为改变储层结构,大幅度提升单井出水量;砂岩回灌技术,基本实现了无压回灌,形成了《地热回灌技术要求》行业标准;热能高效利用技术,自主设计高效磁悬浮热泵机组,提高了冷凝器放热效率。

中国电动汽车具备全球领先优势。中国电动汽车电池、电机、电控技术持续升级,头部车企引领全球向上趋势。电池新技术是提升电能的核心,龙头企业在锂电、钠电新技术变革中均有突破。亿纬锂能公司首件搭载 46 系列大圆柱电池的系统产品的中试线成功下线,并获得宝马 46 系列电池 40 GW·h/a 的订单;宁德时代公司分别推出凝聚态电池和第一代钠离子电池“极钠 1 号”,凝聚态电池能量密度可达 500 W·h/kg,钠离子电池年钠电池成本接近 0.5 元/W·h。

比亚迪公司研发的八合一高效电驱总成技术,采用发卡扁线永磁同步电机、超薄硅钢片,电机功率提升 40%,最高效率 97.5%;首次应用低粘度油品,齿轮传动最高效率 97.6%;电机控制 VCU、BMS、MCU(含 DCDC、OBC、PDU 配电升压类)深度集成,相对独立式,电控系统响应时间缩短 90%,模块体积缩小 40%,具备前驱、后驱、双电机四驱 3 种驱动形式,满足 A0 级到 C/D 级车型动力搭载需求,是全球截至目前唯一一家能够开发且量产八合一电驱总成的车企。蔚来汽车公司自主开发的辅助驾驶系统 NIO Pilot 和车载 AI 系统 NOMI,智能化对比特斯拉 Model Y 性能更优。此外,红旗智慧补能系统全球首发 600 kW 超充技术,充电 5 min 续航增加 300 km,同时还具有 22 kW 无线充电技术,充电效率可达到 94%。

5 中沙清洁能源合作的代表性项目

近年来,沙特清洁能源发展的需求和中国强大的清洁能源科技、制造和投资能力,构成了中国与沙特开展清洁能源合作的双赢格局。如表 3 所示,中国已与沙特开展了一系列具有代表性的合作案例,清洁能源项目成果显著。

目前来看,中国与沙特清洁能源合作仍有较大的拓展空间。第一,中沙合作形式大多是工程总承包模式(EPC),主要集中在工程承包和建设、管理领域,缺少产业链上游核心技术的联合研发与共享,以及关键领域的生产性合作。第二,民营企业“走出去”动力仍然不足,山东电建公司是在沙特合作中企的骨干力量,可以说,国有企业占据了多数沙特投资合作资源,导致部分实力雄厚的民营企业海外拓展动力不足,而民营企业是产业创新升级的重要来源。第三,中沙清洁能源合作项目集中于光伏储能,其他领域相对较少,在大力发展太阳能和风能产业的同时,必须加强适合两国资源和技术优势的清洁能源合作领域,进一步形成中沙资源互补相促进、优势互补同提高的可持续发展的合作关系。

6 促进中沙清洁能源合作的建议

沙特拥有丰富的清洁能源发展潜力,并积极寻求

表 3 近年来中沙清洁能源合作的代表性项目

中方企业	时间	项目领域	合作项目
中国出行科技	2023年6月	电动汽车	电动汽车合资协议
TCL中环	2023年5月	光伏	光伏晶体晶片工厂项目
阳光电源、中国电建、盛弘股份	2023年4月	储能	沙特新未来城NEOM
中国能建	2023年4月	光伏	沙特拉比格300 MW光伏电站
山东电建	2023年3月	光伏	沙特WAD光伏项目EPC合同
九丰能源	2023年2月	氢能	清洁能源和氢能源等领域的合作意向
中广核能源国际	2022年12月	光伏、风电、地热	沙特、老挝、孟加拉、阿塞拜疆等多国能源项目框架合作协议
中国地质	2022年11月	天然气	Ras Al-Khair工业区天然气管道连接项目
山东电建	2022年11月	光伏	沙特红海新城406 MW光伏电站
中国能建	2022年10月	光伏	沙特PIF二期 2.6 GW 光伏项目
国家电投、晶科电力	2021年10月	光伏	沙特国家新能源计划(NREP)第三轮新能源IPP项目
山东电建、华为	2021年10月	储能	沙特红海新城储能项目
中国能建	2021年4月	光伏	沙特拉比克300 MW光伏电站
山东电建	2021年2月	综合类	EPC项目 沙特红海公用事业基础设施项目 EPC项目

清洁能源产业的快速发展。中国拥有先进的清洁能源技术与经验,可以帮助沙特完善清洁能源发展的全产业链建设,保障清洁能源发展所需的资源供应链。中国“一带一路”倡议与沙特“2030 愿景”目标战略性对接,中沙在清洁能源供应链、产业链的高度互补性为两国在清洁能源领域带来了广阔的合作空间。

1) 深化能源合作,实现资源互补,保障双方能源经济安全。

清洁能源发展需要相关关键矿产的安全、稳定和经济性供应。中国在关键矿产供应链中的主导地位将对沙特清洁能源的快速发展带来积极影响。中沙应追求资源互补的深度能源合作,共同提升双方的清洁能源转型韧性和长期的能源安全。

一是持续加强中沙传统能源合作。通过双方建立长期稳定的石油贸易合作机制下,持续往石油、天然气全产业链合作发展,保障沙特清洁能源转型过程的能源经济,同时也能保证中国能源供给安全。二是增强中沙关键矿产的贸易供应。中沙应建立清洁能源发展数据平台,明确沙特能源转型的关键矿产需求:一方面,中国可以直接贸易提供沙特所需的关键矿产;另一方面,中国可以提供相关勘探技术与人员,帮助沙特释放本地的关键矿产潜力。三是注重双方能源之间的平衡发展。中国应在深化传统能源合作的基础上分阶段与沙特进行清洁能源合作,满足双方

能源合作中的对等互利平衡,真正实现资源互补相促进、优势互补同提高的可持续发展的合作关系。

2) 加强技术创新,优化产能布局,促进完善产业合作体系。

清洁能源发展快慢取决于清洁能源核心技术的创新应用。中国在清洁能源技术的主导地位将对沙特清洁能源的快速发展带来积极影响。中沙加强清洁能源技术交流,为双方创新产业技术合作方式带来了重要的机遇。

一是加强中沙清洁能源技术合作创新。推动光伏、风能、氢能等清洁能源的技术合作,帮助沙特转型清洁能源出口国,同时充分利用沙特工业发展基金,建立中沙清洁能源培训中心,促进人才培养,开展联合研究,共同研发创新清洁能源相关技术。二是拓展中国企业海外产能布局。一方面,中国企业可以加大对沙特的光伏、风电等组件贸易为企业自身积累技术经验、实践数据,为更高层次的技术创新奠定基础,同时可以改善产能过剩的困境;另一方面,中国与沙特投资合作在沙特设厂,拓展中国企业的海外产能布局。三是完善“一带一路”双边清洁贸易和产业技术合作体系。推动形成中沙双边技术交流合作平台,共同探索建立国家清洁能源技术转移和产权交易体系,促进清洁能源产业合作模式创新,逐步形成“一带一路”双边技术转移、创新合作机制。

3) 加强资本投入, 促进市场互通, 推动周边国家参与合作。

作为资本密集型技术, 清洁能源比传统能源面临更大的融资成本压力。沙特计划利用千亿美元发展清洁能源, 而中国对清洁能源领域的投资规模更加宏大。随着中沙金融合作近年来快速发展, 双方清洁能源长期发展投资合作潜力巨大。此外, “一带一路”倡议与沙特“2030 愿景”紧密对接, 为两国共同开拓第三方市场提供了重要机遇。

一是降低中沙间的合作交易成本。以“一带一路”为纽带, 为中沙金融机构互在双方布局和投资提供发展平台, 在沙特搭建人民币跨境支付系统和构建以境外人民币清算行为网络的清算系统, 帮助双方在清洁能源领域投资降低交易成本。二是加强中沙双方金融机构和企业对对方投资清洁能源项目。一方面, 要降低跨国投资门槛, 为双方国内资金投资拓宽海外渠道, 实现清洁能源市场互联互通, 满足相关项目融资需求; 另一方面, 开发多元化的融资方案, 降低金融机构和企业的外部融资成本, 要鼓励基金和保险资金参与投资, 降低投资系统风险, 激发金融机构和企业对外投资热情。三是推动形成韧性的区域性合作体系。充分发挥沙特作为亚非欧三大洲重要战略地位, 提升中国与沙特的市场互联互通水平、贸易投资自由化水平, 依托沙特“国际大通道、重点经济走廊”和中国的清洁能源外交合作政策, 推动中沙与周边非洲、拉丁美洲和加勒比地区建成合作伙伴关系, 形成中沙多元韧性的区域性合作体系, 打造“一带一路”中沙利益共同体和命运共同体。

7 结论

中国“一带一路”倡议与沙特“2030 愿景”的战略对接, 使得双方在清洁能源领域合作拥有较高的契合度。从资源禀赋、技术能力、市场投资等多个角度来看, 两国的合作具有相互补充和互惠互利的特点。

中沙清洁能源合作将为双方带来多处受益。对于中国来说, 一是有利于双方进一步加强传统能源贸易合作, 沙特的石油制品、化学衍生品等具有广泛的应用场景, 而由于庞大的中国消费市场, 传统能源的需求依旧持续释放; 二是有利于提高中国企业在清洁

能源领域的国际竞争力与品牌影响力, 优化产业产能配置与布局; 三是有利于打造“一带一路”中沙利益共同体和命运共同体, 促使中国进一步吸引沙特投资, 拉动国内需求, 促进经济可持续高质量发展。而对于沙特来说, 一是可以促进“2030 愿景”等目标的实现, 推动国家经济结构走向多元化、健康化、可持续化; 二是加快了清洁能源转型与发展, 保障了国内能源转型的资源、技术、市场供给, 促使沙特摆脱传统油气出口国成为绿色电力、氢气出口国; 三是为沙特提供劳动力就业岗位, 有利于缓解沙特的社会问题, 进一步增强了民生福祉。

未来, 应充分利用“一带一路”合作平台, 携手中国企业挖掘沙特及中东地区的发展潜力, 加强清洁能源等多领域合作, 实现互利共赢、共同发展, 助力中沙两国实现碳中和的气候目标。此外, 要将中国的生产要素输送出去, 让沿“带”沿“路”的发展中国家和地区共享中国发展的成果, 推动共建“一带一路”高质量发展新格局。

参考文献 (References)

- [1] Yan X, Ge J P, Lei Y L, et al. China's low-carbon economic transition: Provincial analysis from 2002 to 2012[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1050–1061.
- [2] Timilsina G R, Cornelis van Kooten G, Narbel P A. Global wind power development: Economics and policies[J]. Energy Policy, 2013, 61: 642–652.
- [3] Truby J. Decarbonizing the GCC: Sustainability and life after oil and in GCC countries[J]. The Journal of World Energy Law and Business, 2023, 16(2): 160–177.
- [4] 上外中东研究所. 海合会国家能源融合转型: 内涵、进展与挑战[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://news.goalfore.cn/topstories/detail/43605.html>.
- [5] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113612.
- [6] 孙海泳. 高质量共建“一带一路”视野下的中国—沙特科技产业合作[J]. 国际论坛, 2023, 25(5): 52–69.
- [7] 吴磊. 新能源发展对能源转型及地缘政治的影响[J]. 太平洋学报, 2021, 29(1): 62–70.
- [8] 国家发展改革委. 中国与沙特签署共建“一带一路”倡议与“2030 愿景”对接实施方案[EB/OL]. [2024-02-01]. https://mp.weixin.qq.com/s/EDQtVLXxF_U8_nyYoRilg.
- [9] 中国沙特关系的“重要里程碑”[EB/OL]. [2024-02-01]. <http://>

- //www.news.cn/2022-12/09/c_1129194746.htm.
- [10] 邹志强. 首届中阿峰会开创中阿关系新时代[EB/OL]. [2024-02-01]. https://www.cssn.cn/skgz/bwyc/202301/t20230103_5577418.shtml.
- [11] 外交部. 中华人民共和国和沙特阿拉伯王国联合声明[EB/OL]. [2024-02-01]. http://newyork.fmprc.gov.cn/gjhdq_676201/gj_676203/yz_676205/1206_676860/1207_676872/202212/t20221209_10988250.shtml.
- [12] 叶桢. 沙特: 中国峰会期间签署了约500亿美元的投资协议[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://wallstreetcn.com/articles/3677226>.
- [13] 李昕蕾. 全球气候能源格局变迁下中国清洁能源外交的新态势[J]. 太平洋学报, 2017, 25(12): 33–46.
- [14] 最佳实践[EB/OL]. [2024-02-01]. http://obor.nea.gov.cn/v_practice/toPractice.html?l=1.
- [15] 商务部国际贸易经济合作研究院. 对外投资合作国别(地区)指南: 沙特阿拉伯(2021年版)[EB/OL]. [2024-02-01]. <http://com.gd.gov.cn/zouchuqu/files/SaudiArabia>.
- [16] 肖新建. 准确把握共建“一带一路”能源合作高质量发展内涵[N]. 中国能源报, 2023-07-17(1).
- [17] Energy Institute. Statistical review of world energy[EB/OL]. [2024-02-01]. https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3.
- [18] Shariatinia M, Kermani H A. Iran, China and the Persian Gulf: An unfolding engagement[J]. Global Policy, 2022, 14: 36–45.
- [19] 陈沫. “一带一路”倡议: 加强中国与沙特经济合作的契机[J]. 宁夏社会科学, 2017(5): 97–104.
- [20] Par G de C, Ninon R. China leads in green technology[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.lesechos.fr/monde/enjeux-internationaux/la-chine-fait-la-course-en-tete-dans-les-technologies-vertes-1975573>.
- [21] Wang Y B, Ge J P. Potential of urban cobalt mines in China: An estimation of dynamic material flow from 2007 to 2016[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104955.
- [22] Li Y Z, Wang Y B, Ge J P. Tracing the material flows of dysprosium in China from 2010 to 2020: An investigation of the partition characteristics of different rare earth mining areas[J]. Resources Policy, 2023, 85: 103836.
- [23] IEA (International Energy Agency). The role of critical minerals in clean energy transitions[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [24] IEA. Global Energy Review 2021. [2024-02-01]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.
- [25] Economic and Development Affairs Council. Vision 2030[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.vision2030.gov.sa/>
- [26] Guezuraga B, Zauner R, Pölz W. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines[J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 37–44.
- [27] Lacal-Arántegui R. Materials use in electricity generators in wind turbines—state-of-the-art and future specifications[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 275–283.
- [28] Pavel C C, Lacal-Arántegui R, Marmier A, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines[J]. Resources Policy, 2017, 52: 349–357.
- [29] Valero A, Valero A, Calvo G, et al. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 178–200.
- [30] 张安迪, 葛建平. 中美稀土贸易现状与趋势[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 77–87.
- [31] Gulley A L, Nassar N T, Xun S A. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4111–4115.
- [32] USGS (U. S. Geological Survey). Commodity statistics and information[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>.
- [33] Bloomberg NEF. A power grid long enough to reach the sun is key to the climate fight[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://about.bnef.com/blog/a-power-grid-long-enough-to-reach-the-sun-is-key-to-the-climate-figh>.
- [34] Antoine V-J, Stephanie M P. The race to localize clean technology supply chains[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://about.bnef.com/blog/the-race-to-localize-clean-technology-supply-chains>.
- [35] IEA. Energy technology perspectives 2023[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023>.
- [36] 张路桐. “一带一路”倡议下中国—沙特清洁能源合作研究[J]. 产业创新研究, 2022(11): 39–41.
- [37] Global Solar Atlas. Photovoltaic power potential, 2024[EB/OL]. [2025-03-01]. <https://globalsolaratlas.info/download/world>.
- [38] Global Wind Atlas. Wind speed potential, 2024[EB/OL]. [2025-03-01]. https://gwa.cdn.nazkamapps.com/HR_posters/ws_World.
- [39] 康晓. 中国与沙特阿拉伯应对气候变化南南合作探析[J]. 阿拉伯世界研究, 2023(2): 3–24, 158.

- [40] Ratcliffe V. Saudi Arabia's bold plan to rule the \$700 billion hydrogen market[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.bnnbloomberg.ca/saudi-arabia-s-bold-plan-to-rule-the-700-billion-hydrogen-market-1.1573265>.
- [41] 能链研究院. 向东看 沙特能源转型迎来高光时刻[N]. 中国改革报, 2022-12-14(5).
- [42] Aboud E, Qaddah A, Harbi H, et al. Geothermal resources database in Saudi Arabia (GRDiSA): GIS model and geothermal favorability map[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(2): 112.
- [43] 沙特TAQA将大规模采用地热制冷、海水淡化[EB/OL]. (2023-03-16)[2024-02-01]. <https://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2420602.shtml>.
- [44] Tristan K. China's geoeconomic strategy and industrial transfer in the middle east[EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.globalpolicyjournal.com/blog/03/08/2017/china%E2%80%99s-geoeconomic-strategy-and-industrial-transfer-middle-east>.

On the foundations and prospects of clean energy collaboration between China and Saudi Arabia

WANG Yibo¹, REN Ruihua¹, GE Jianping^{1,2*}

1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Institute of Natural Resources Strategic Development, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The global imperative of addressing climate change through clean energy transformation has profound implications for the global supply chain. Critical minerals are essential to achieving net-zero carbon emissions and advancing clean energy technologies. In the context that Saudi Arabia pursues economic diversification and realizes "Vision 2030", it tries to reduce reliance on its oil-based economy and revolves around the urgent need to secure the supply of critical minerals and expedite the development of the clean energy sector. Currently, China's "Belt and Road" initiative closely aligns with Saudi Arabia's "2030 Vision". Collaborative efforts in the realm of clean energy between the two nations offer substantial opportunities for resource complementarity, technical expertise exchanges, and access to broader industrial markets. This paper systematically examines and analyzes the foundation and potential for the collaboration between China and Saudi Arabia in the field of clean energy across various dimensions, including politics, society, and the supply chain. Collaborative recommendations from the perspective of mutual interests are put forward to facilitate Saudi Arabia's transition in energy and the realization of its "2030 Vision". Simultaneously, the paper further unleashes the potential for resource sharing, technological innovation, and market expansion between the two parties. This endeavor seeks to advance the establishment of partnerships between China and the surrounding regions of Saudi Arabia and foster a new paradigm for China's international cooperation and development along the "Belt and Road".

Keywords clean energy; cooperation; China; Saudi Arabia; the Belt and Road ●



(责任编辑 卫夏雯)