

文章编号: 1000-0747(2021)02-0411-10 DOI: 10.11698/PED.2021.02.18

新能源在碳中和中的地位与作用

邹才能, 熊波, 薛华庆, 郑德温, 葛稚新, 王影, 蒋璐阳, 潘松圻, 吴松涛

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 二氧化碳是全球碳循环的重要介质, 具有实现生态系统有机物的转换和造成温室效应的双重属性。将大气圈中被固定或可利用的二氧化碳定义为“灰碳”; 无法被固定或利用, 并留存在大气圈中的二氧化碳定义为“黑碳”。碳中和是人类发展的共识, 但在实施过程中面临着政治、资源、技术、市场、能源结构等诸多挑战。提出碳替代、碳减排、碳封存、碳循环是实现碳中和的 4 种主要途径, 其中碳替代将是碳中和的中坚力量。新能源已经成为第 3 次能源转换的主角, 未来将成为碳中和的主导。目前, 太阳能、风能、水能、核能、氢能等是新能源的主力军, 助力电力部门实现低碳排放; “绿氢”是新能源的后备军, 助力工业与交通等领域进一步降低碳排放; 人工碳转化技术是连接新能源与化石能源的桥梁, 有效降低化石能源的碳排放。预测 2030 年中国碳达峰的峰值约 110×10^8 t。按照高、中、低 3 种情景预测 2060 年中国碳排放将分别降至 22×10^8 , 33×10^8 , 44×10^8 t。针对中国实现碳中和提出 7 项实施建议。构建中国新的“三小一大”能源结构, 推动实现中国能源“独立自主”战略。图 9 表 2 参 35

关键词: 新能源; 碳达峰; 碳中和; 灰碳; 黑碳; 碳替代; 碳减排; 碳封存; 碳循环

中图分类号: TE122.14 文献标识码: A

The role of new energy in carbon neutral

ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, ZHENG Dewen, GE Zhixin, WANG Ying,
JIANG Luyang, PAN Songqi, WU Songtao*(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)*

Abstract: Carbon dioxide is an important medium of the global carbon cycle, and has the dual properties of realizing the conversion of organic matter in the ecosystem and causing the greenhouse effect. The fixed or available carbon dioxide in the atmosphere is defined as “gray carbon”, while the carbon dioxide that cannot be fixed or used and remains in the atmosphere is called “black carbon”. Carbon neutral is the consensus of human development, but its implementation still faces many challenges in politics, resources, technology, market, and energy structure, etc. It is proposed that carbon replacement, carbon emission reduction, carbon sequestration, and carbon cycle are the four main approaches to achieve carbon neutral, among which carbon replacement is the backbone. New energy has become the leading role of the third energy conversion and will dominate carbon neutral in the future. Nowadays, solar energy, wind energy, hydropower, nuclear energy and hydrogen energy are the main forces of new energy, helping the power sector to achieve low carbon emissions. “Green hydrogen” is the reserve force of new energy, helping further reduce carbon emissions in industrial and transportation fields. Artificial carbon conversion technology is a bridge connecting new energy and fossil energy, effectively reducing the carbon emissions of fossil energy. It is predicted that the peak value of China’s carbon dioxide emissions will reach 110×10^8 t in 2030. The study predicts that China’s carbon emissions will drop to 22×10^8 t, 33×10^8 t and 44×10^8 t, respectively, in 2060 according to three scenarios of high, medium, and low levels. To realize carbon neutral in China, seven implementation suggestions have been put forward to build a new “three small and one large” energy structure in China and promote the realization of China’s energy independence strategy.

Key words: new energy; peak carbon dioxide emissions; carbon neutral; gray carbon; black carbon; carbon replacement; carbon emissions reduction; carbon sequestration; carbon cycle

引用: 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.

ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.

0 引言

能源是自然界中能为人类生存及社会进步提供的

能力资源。人类自第 1 次拿起火种之后, 能源与水、粮食就构成了人类赖以生存的 3 大要素。科技进步、社会文明两大动力驱动了能源发展。世界能源结构已

经发生两次转换,第1次转换实现了薪柴向煤炭的能源革命,第2次转换实现了煤炭向石油、天然气的能源革命,当前正在经历传统化石能源向新能源的第3次重大转换。按照能源发展规律,能源形态从固体(薪柴与煤炭)、液态(石油)向气态(天然气)转换、能源中碳的数量从高碳(薪柴与煤炭)、中低碳(石油与天然气)向无碳(新能源)转换,未来沿着资源类型减碳化、生产技术密集化、利用方式多样化3大趋势发展。目前,世界能源正在进行化石能源低碳化革命、新能源规模化革命、能源管理智能化革命,3场能源革命正在同步进行,加快形成“新煤炭”、“新油气”、“新电网”。

人类生活在同一个地球、同一个天空,但呼吸着不同二氧化碳含量的“空气”。人类进入工业化以来,二氧化碳排放量不断增加,导致全球气温升高、冰川融化、海平面上升等诸多环境问题,人类赖以生存的环境面临着前所未有的威胁与挑战。据统计自1850年以来,大气中二氧化碳的浓度从 280×10^{-6} 上升至 450×10^{-6} ,全球气温上升了 $0.9 \sim 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$,海平面上升了 $20 \text{ cm}^{[1-3]}$ 。特别是近30年来,全球气温、海平面上升速度加快,气温升高速度达到每10年上升 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$,海平面上升速度达到 $0.32 \text{ cm/a}^{[4-6]}$ 。到本世纪末,如果全球气候升温达到 $2 \text{ }^\circ\text{C}$,海平面升高将达到 $36 \sim 87 \text{ cm}$,99%的珊瑚礁将消失,陆地上约13%的生态系统将遭到破坏,许多植物和动物面临着灭绝的风险^[7]。因此,减少二氧化碳等温室气体排放,限制全球气温上升已经成为全人类共同的目标。2018年10月,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称IPCC)提出了“碳中和”的目标,到本世纪末将全球气温升高控制在 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

人类活动导致的二氧化碳排放主要来源于化石燃料消费。发展新能源,实现能源转型,降低化石能源消费,构建绿色低碳的能源体系,是降低二氧化碳排放,实现全球碳中和的重要举措之一。本文总结主要国家应对碳中和的主要经验和做法,分析全球二氧化碳排放的分布情况,提出全球实现碳中和所面临的挑战和应对措施。新能源已是第3次能源转换的主角,

将在实现碳中和发挥主导作用。针对中国碳中和面临的挑战与机遇,提出中国实现碳中和的路线图与实施路径,为2060年顺利实现碳中和目标提供参考依据。

1 全球碳中和概况

1.1 “碳”的类型

碳是生命物质中的主要元素之一,是有机质的重要组成部分,并以二氧化碳、有机物和无机物的形式贮存于地球的大气圈、陆地生态圈、海洋圈和岩石圈中。碳元素通过碳固定和碳释放的方式,在地球的大气圈、陆地生态圈、海洋圈和岩石圈中进行循环^[8]。碳固定是指植物的光合作用吸收二氧化碳、海水溶解大气中的二氧化碳、干旱区盐碱土吸收二氧化碳、含碳元素岩石的形成,以及利用人工技术将二氧化碳转化为化学品或燃料等。碳释放主要来自于植物和动物的呼吸作用、化石燃料的消耗、岩石圈中含碳元素岩石的分解等。本文将大气圈中被固定或可利用的二氧化碳定义为“灰碳”;将无法被固定或利用,并留存在大气圈中的二氧化碳定义为“黑碳”。人类进入工业化以来,化石燃料消耗急剧增加,岩石圈中化石能源的碳被释放到大气圈中,导致大气圈中二氧化碳的浓度不断增加,地球的碳循环平衡被破坏,造成了大气圈中“黑碳”含量不断增加。因此,碳中和主要目的是减少大气圈中“黑碳”含量,逐步恢复绿色地球碳循环平衡,保护人类赖以生存的生态环境,建设宜居地球。

1.2 碳中和的内涵及意义

IPCC发布的《全球升温 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 特别报告》指出,碳中和(Carbon-neutral)是指1个组织在1年内的二氧化碳排放通过二氧化碳消除技术达到平衡,或称为净零二氧化碳排放(net zero CO_2 emissions)^[7]。碳中和目标是到2030年全球二氧化碳排放量比2010年下降约45%,到2050年实现净零二氧化碳排放。

碳中和的首要任务是到本世纪末将全球气候变暖控制在 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。碳中和不仅控制气候变化,也是人类保护生态环境的根本措施,有助于保护生物多样性和生态系统,避免更多的物种灭绝。碳中和加速了能源

系统的低碳绿色转型，为全球带来新的经济增长点。根据国际可再生能源机构（IRENA）发布的《能源转型 2050》报告显示，碳中和为全球带来 2.4% 的 GDP 额外增长，额外增加 7×10^6 个能源行业就业岗位等^[9]。

1.3 碳中和的进展与做法

截至 2021 年 1 月，根据英国能源与气候智库（Energy & Climate Intelligence Unit）统计显示^[10]，全球已有 28 个国家实现或承诺碳中和目标（见表 1）。其中，苏里南共和国和不丹已经实现碳中和，瑞典、英国、法国等 6 个国家通过立法承诺碳中和，欧盟、加拿大、韩国等 6 个国家及地区正在制定相关法律，中国、澳大利亚、日本、德国等 14 个国家承诺实现碳中和。2050 年是全球实现碳中和的主要时间节点，除 2 个已经实现碳中和的国家外，芬兰承诺最早（2035 年）实现碳中和。另有 99 个国家正在讨论碳中和目标，其

表 1 各国家及地区承诺实现碳中和时间表（据文献^[10]修改）

碳中和时间	正在立法	立法规定	国家承诺
2035 年			芬兰
2040 年			奥地利、冰岛
2045 年		瑞典	
2050 年	欧盟、加拿大、英国、法国、南韩、西班牙、丹麦、新西兰、智利、斐济	日本、德国、瑞士、挪威、爱尔兰、南非、葡萄牙、哥斯达黎加、斯洛文尼亚、马绍尔群岛	
2060 年			中国

中乌拉圭拟将目标定于 2030 年，其余国家均将目标拟定于 2050 年。

已经实现碳中和的 2 个国家具有国土面积小、森林覆盖率极高等特点，其中苏里南共和国的森林覆盖率达 93%，不丹的森林覆盖率为 72%。碳中和进程中，欧盟最为积极，欲建设首个碳中和大陆。2019 年 12 月，欧盟委员会正式发布《欧洲绿色协议》，提出到 2030 年温室气体排放量在 1990 年基础上减少 50%~55%，到 2050 年实现碳中和目标。2020 年 12 月，日本政府推出《绿色增长战略》，被视为日本 2050 年实现碳中和目标的进度表。从目前已经承诺碳中和的国家来看，除了欧盟和日本发布了碳中和具体的路线图外，其余国家的碳

中和路线尚在进一步制定中。

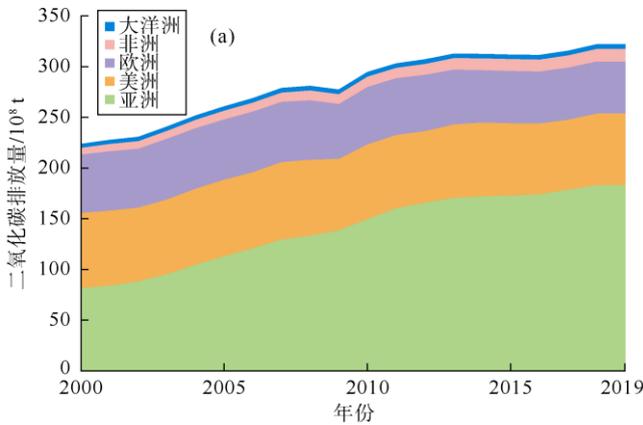
本文分析总结主要国家和地区碳中和的做法有如下几点：①逐步退出煤发电计划。除德国外，已承诺碳中和的欧盟国家煤炭资源较少，国土面积较小，已经全部退出煤发电。德国宣布将于 2040 年前全部退出煤发电。煤炭资源丰富或者煤发电消费占比较高的国家（如澳大利亚等），尚未确定退出煤发电计划。②加快太阳能、风能、氢能等新能源产业应用与推广。光伏发电将成为欧盟、日本的第一大电力来源，海上风电迎来爆发式增长。预计到 2050 年，欧盟、日本海上风电将增长 25 倍以上。氢能方面，欧盟注重绿氢制备，日本全面发展氢能产业链，韩国已就氢能立法，将氢能应用拓展至交通运输、冶金、发电等领域。③发展碳封存与碳转化技术。德国将重启二氧化碳捕集及封存项目，同时利用丰富的天然气管网设施，大力发展电转气技术，将二氧化碳转化为甲烷进行管网运输。日本发展碳回收和资源化利用技术，到 2030 年实现二氧化碳回收制燃料的价格与传统喷气燃料相当，到 2050 年二氧化碳制塑料实现与现有的塑料制品价格相当。④出台碳定价机制，增加碳排放成本。2005 年，欧盟开始实施排放交易体系（EU ETS），是世界上第 1 个多国参与的碳排放交易体系。该交易体系采用“总量管制和交易”规则，在限制温室气体排放总量的基础上，通过买卖行政许可的方式进行碳排放交易。该体系还通过限量和设定交易计划，对各成员国设置限额，将减排目标分解到企业，明确减排上限强制减排。

2 碳中和面临的主要挑战与对策

2.1 全球碳排放现状

据国际能源署（IEA）统计，2019 年全球与能源相关的二氧化碳排放量与 2018 年持平（为 333×10^8 t），前 5 名碳排放量国家分别为中国、美国、印度、俄罗斯、日本，碳排放量分别为 98×10^8 ， 48×10^8 ， 23×10^8 ， 15×10^8 ， 11×10^8 t（见图 1）^[11-12]。亚洲的碳排放主要来自中国、印度和日本，美洲的碳排放主要来自美国、加拿大和巴西，欧洲的碳排放主要来自俄罗斯、德国

和英国,非洲的碳排放主要来自南非、埃及和阿尔及利亚,大洋洲的碳排放主要来自澳大利亚。



化石燃料消费是二氧化碳排放增加的主要来源。2003年以来,煤炭消费一直是二氧化碳排放的第1大

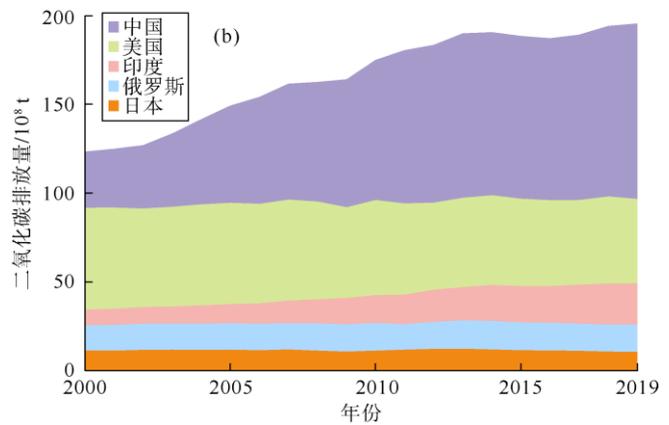


图1 2000—2019年全球能源相关主要大洲(a)及主要国家(b)二氧化碳排放量统计(据文献[11-12]修改)

来源(见图2)。2019年煤炭、石油、天然气消费所排放的二氧化碳量分别占总排量的45%、33%、21%。电力行业是最大的碳排放行业,占总排量的38%,其次为交通、工业和建筑等行业,分别占总排量的24%、23%和9%^[12]。

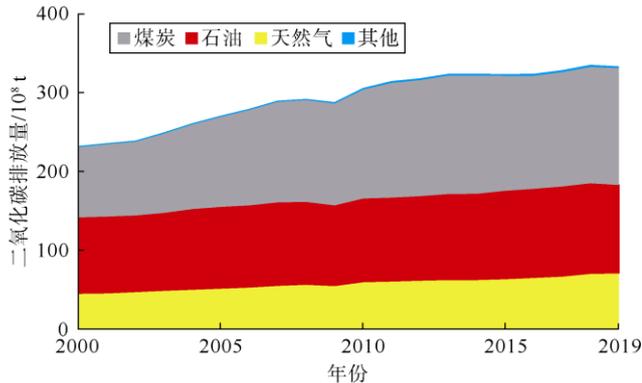


图2 2000—2019年全球能源相关的二氧化碳排放量统计(据文献[11-12]修改)

2.2 碳中和面临的主要问题

碳中和应对全球气候变化已成为全球共识,但在实施过程中还面临政治、资源、技术、市场、能源结构等多方面挑战。

2.2.1 政治层面

实现碳中和是全球性目标,需要世界各国合作应对,联合国常任理事国应率先在碳中和目标上做出表率,但是美国和俄罗斯两个常任理事国尚未承诺实现

碳中和。全球碳排放前5名国家中的印度还没有承诺实现碳中和时间。安哥拉、伊朗、伊拉克、南苏丹、土耳其、也门等国最初签署了《巴黎气候协定》,但还没有正式立法批准。另有99个国家正在讨论碳中和目标,能否通过碳中和目标尚未定论^[9]。

2.2.2 资源层面

新能源替代化石燃料是实现碳中和的根本措施。全球太阳能、风能等新能源分布存在时空差异性,为新能源规模发展带来挑战。全球太阳能资源主要集中在赤道附近南北回归线之间,以非洲北部撒哈拉地区最为丰富,非洲大陆东侧及南部、澳大利亚和中国西北地区也是太阳能资源丰富区。风能资源主要分布在东亚、东南亚、中亚、美洲30°S—30°N地区,以及中国北部和东部、蒙古、澳大利亚东北部、非洲撒哈拉沙漠以南等地区。全球陆地太阳能和风能资源存在明显的地区性与季节性差异^[13]。

2.2.3 技术层面

新能源技术成熟度决定了碳中和进程的快慢。太阳能、风能等新能源发电总体价格仍较煤电高,峰谷稳定性差,调峰技术有待进一步创新。重工业和长途运输等领域难以实现电气化,氢燃料电池是最优选择,但部分关键技术仍处于示范或原型阶段,尚未大规模推广和工业化应用。与传统化石能源制氢(即“灰

氢”)相比,可再生能源制氢(即“绿氢”)的成本较高,配套的二氧化碳捕集与封存技术尚处于示范阶段。虽然低碳技术转移具有显著的减排和升温控制效果,但发达国家承诺对发展中国家提供资金和低碳技术援助尚未兑现。

2.2.4 市场层面

碳中和进程中,新能源的推广与应用取决于成本优势和应用便利程度。目前,新能源成本逐年下降,但相对于化石能源仍缺乏竞争力。特别是2020年全球原油价格暴跌,化石能源的成本优势对新能源转型产生不利影响^[14]。新能源配套设备不完善,应用不便利,如充电桩尚未普及、加氢站数量少等问题推高了新能源汽车的使用成本。

2.2.5 能源结构层面

全球能源消费结构仍然以化石能源为主,新能源占比偏低。2019年全球能源消费 144×10^8 t油当量,其中煤炭占27%、石油占33%、天然气占24%、新能源占16%^[15]。碳中和进程中,要大幅度降低煤炭、石油等高碳化石能源消费占比,提高新能源占比。目前,化石能源消费占比仍然偏高,为能源转型带来了挑战。

2.3 实现碳中和的对策

减少碳排放,实现碳中和的对策可以分为碳替代、碳减排、碳封存、碳循环4种主要途径。

碳替代主要包括用电替代、用热替代和用氢替代等。用电替代是利用水电、光电、风电等“绿电”替代火电,用热替代是指利用光热、地热等替代化石燃料供热,用氢替代是指用“绿氢”替代“灰氢”。

碳减排主要包括节约能源和提高能效。在建筑行业主要以提高电器和设备能效、房屋外加太阳能光伏等为主,开发新型的水泥和钢材等材料、减少水泥和钢材的隐含碳排放量等;在交通行业主要以使用更高效的动力系统和更轻的材料等为主。从源头减少“黑碳”的排放量。

碳封存是指将大型火力发电、炼钢厂、化工厂等产生的二氧化碳收集后,运输至合适场所,利用技术手段长时间与大气隔离封存。地质封存是碳封存的主要形式,封存场所主要为油气藏、地下深部咸水层和

废弃煤矿等。未来油田、气田采完后,应用已有地面与地下设施,进行二氧化碳库封存,可能是主要举措。通过技术减少大气圈中的“黑碳”数量。

碳循环包括人工碳转化和森林碳汇。人工碳转化是指利用化学或生物手段将二氧化碳转化为有用的化学品或燃料,包括二氧化碳合成甲醇、二氧化碳电催化还原制备CO或轻烃产品(C_1-C_3)等。森林碳汇是指植物通过光合作用将大气中的二氧化碳吸收并固定在植被与土壤中,减少大气中二氧化碳浓度。发挥“灰碳”可再利用的作用。

针对碳替代、碳减排、碳封存、碳循环4种主要碳中和对策,依据技术成熟度或与常规化石能源价格的竞争性,预测2020—2050年全球碳中和目标下二氧化碳减排趋势(见图3)。2020—2030年,二氧化碳减排速度相对较慢,主要原因是新能源的价格优势尚未显现,未能实现大规模应用,且碳封存技术尚未成熟。2030—2050年,随着相关技术的成熟,新能源成本可与化石能源竞争,新能源项目快速推广落地,二氧化碳排放大幅度下降。碳封存技术达到推广应用要求,为碳中和做出主要贡献。总体看,碳替代将成为碳中和进程中的中坚力量,预测到2050年,贡献率占全球碳中和的47%,碳减排、碳封存和碳循环贡献率分别占21%、15%和17%。

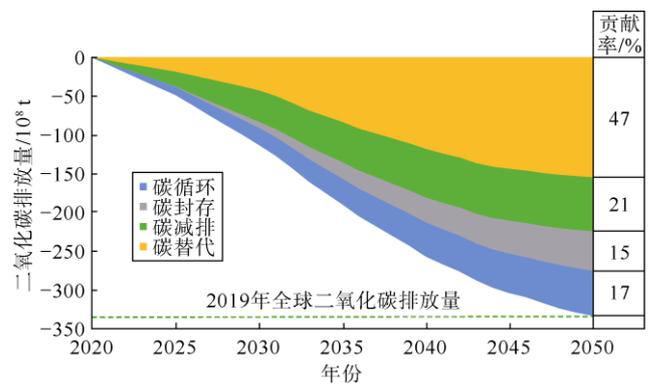


图3 2020—2050年4种途径对全球碳中和的贡献

3 新能源在碳中和进程中的重要地位

新能源是指在新技术基础上加以开发利用,接替传统能源的非化石无碳、可再生清洁能源,主要类型

有太阳能、风能、生物质能、氢能、地热能、海洋能、核能、新材料储能等^[16]。与煤炭、石油、天然气等传统含碳化石能源相比,在理论技术、利用成本、环境影响、管理方式等方面有显著不同。随着新能源技术快速发展和互联网+、人工智能、新材料等技术不断进步,新能源产业处于突破期,逐渐进入黄金发展期。发展新能源,推动能源结构转型是实现碳中和的关键。新能源开发利用步伐加快,已成为全球能源增长新动力,并将逐步替代化石能源,在碳中和进程中发挥关键作用。

3.1 新能源是第3次能源转换的主角

从世界能源发展历程看,人类能源利用史经历了从薪柴到煤炭、从煤炭到油气的两次转型,正在经历从化石能源到新能源的第3次转型。新能源具有清洁、低碳的特点,符合碳中和发展需求,将在第3次能源转换中成为主角。

1925年以来,全球能源变得更加清洁,除生物质能外的新能源呈现加速发展态势。1925—2019年全球能源的需求量从 14×10^8 t油当量增加至 144×10^8 t油当量,增长了10倍,但新能源在全球能源中的占比从0.6%增加至15.1%,增幅达到24倍^[17](见图4)。

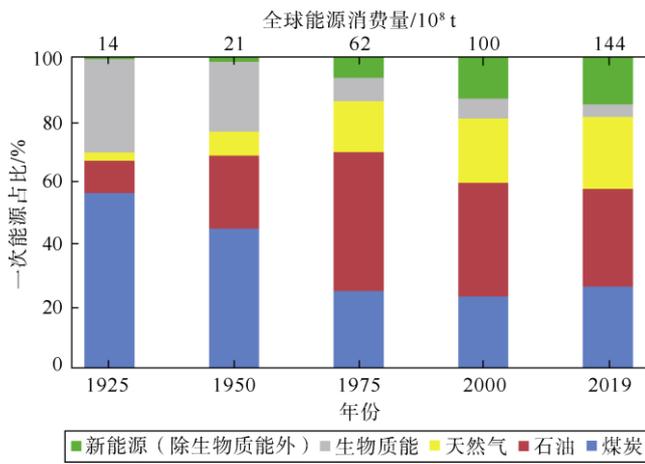


图4 1925—2019年全球能源结构变化趋势图

(据文献^[17]修改)

近10年来,全球能源技术变革显著加快,光伏发电、风电等成本大幅下降,加速推动了能源系统绿色转型。据IRENA报告,自2010年以来,2019年光伏发电(PV)、光热发电(CSP)、陆上风电和海上风电的平准化度电成本分别下降82%、47%、39%和29%^[18]。

2019年,新投产并网的大规模新能源发电装机容量中,56%可实现成本低于最便宜的化石燃料发电。2010—2019年光伏发电量从32 TW·h增至699 TW·h,年增幅达到240%;风力发电量从342 TW·h增至1404 TW·h,年增幅达到45%(见图5)。

3.2 新能源是碳中和的主导

从能源生产和消费结构看,世界能源已形成煤、油、气、新能源“四分天下”的格局。研究预测,到2030年将是新能源的转折年,多种新能源成本下降至可与化石能源竞争,能源去碳化趋势持续加强。预计2030年,全球一次能源量将达到峰值 156×10^8 t油当量,

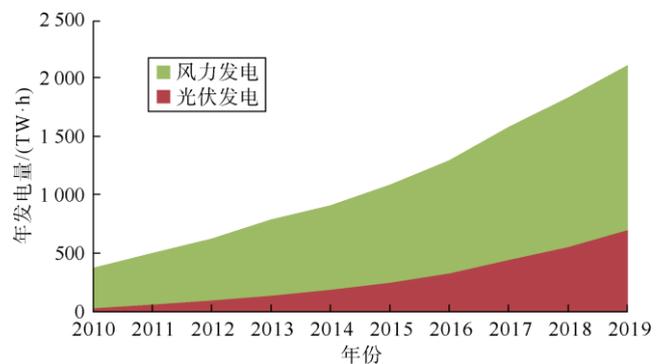


图5 2010—2019年全球光伏发电与风力发电量

(据文献^[17]修改)

年均增长1.2%,其中煤炭占19%、石油占28%、天然气占26%、新能源占27%(见图6)^[15]。预计2025年石油需求增速放缓,到2030年石油需求进入平台期,天然气由于其低碳属性,或将成为唯一有望保持增长的化石能源。

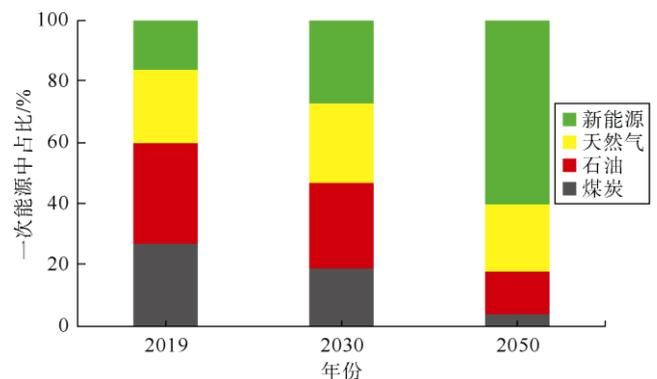


图6 2019—2050年全球能源结构变化趋势

(据文献^[15]、^[17-18]修改)

预计2030年后,新能源成本基本低于化石能源。

预计2030—2050年，世界一次能源消费总量将维持在较为平稳的水平。到2050年，世界一次能源消费量基本与2030年持平，其中煤炭占4%、石油占14%、天然气占22%、新能源占60%，世界能源消费结构发生根本性变化，新能源将超过煤炭、石油、天然气，成为主体能源。

3.3 新能源在碳中和进程中的作用

太阳能、风能、水能、核能、氢能等是新能源的主力军，助力电力部门实现低碳排放。2019年以来，新能源平均发电成本已实现低于燃气发电成本，但总体水平较煤电仍高出16%^[19]。预计到2030年左右，大部分新建光伏发电、风电项目平均投资水平将低于新建煤发电厂，几乎所有亚太市场可实现光伏、风能发电成本低于煤电^[19]。预计到2050年，新能源发电可满足全球电力需求的80%，其中光伏发电和风力发电量累计占总发电量的一半以上^[9]。

“绿氢”是新能源的后备军，助力工业与交通等领域进一步降低碳排放。电价占电解水制氢成本的60%~70%，随着电价大幅度下降，“绿氢”成本将快速下降。到2030年左右，“绿氢”有望比化石燃料制氢更具成本优势^[20]。到2050年，全球氢能占终端能源消费比重有望达到18%，“绿氢”技术完全成熟，大规模用于难以通过电气化实现零排放的领域^[21-23]，主要包括钢铁、炼油、合成氨等工业用氢，以及重卡、船舶等长距离交通运输领域。

人工碳转化技术是连接新能源与化石能源的桥梁，有效降低化石能源碳排放，将过剩电量转化为化工产品或燃料进行储存，对新能源电网起到削峰填谷作用。电转气是人工碳转化的主要形式，可以将二氧化碳重整制甲烷，被视为是欧洲实现能源转型的关键。预计到2050年，欧盟工业部门10%~65%的能源消耗来自电转气，供热行业和交通运输行业30%~65%的能源来自于电转气^[23-24]。

4 中国碳中和实施路径

4.1 中国碳中和目标与路线图

中国政府承诺实现碳中和，制定政策积极推进碳中和进程。2020年9月，习近平在联合国大会上表示“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”^[25]。同年12月，发布《新时代的中国能源发展》白皮书，全面阐述了新时代新阶段中国能源安全发展战略的主要政策和重大举措。

《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》报告指出，预计到2025年前后，中国二氧化碳排放进入峰值平台期，力争2030年前可实现稳定达峰，化石能源消费的二氧化碳峰值排放量控制在 $110 \times 10^8 \text{ t}$ 之内，到2035年二氧化碳排放量将比峰值年份显著下降^[26]。按照二氧化碳排放峰值的减排程度，本文分低、中、高3种情景预测中国2060年碳排放量（见图7）。低情景下，二氧化碳减排至峰值的40%，排放量降低至 $44 \times 10^8 \text{ t}$ ；中情景下，二氧化碳减排至峰值的30%，排放量降低至 $33 \times 10^8 \text{ t}$ ；高情景下，二氧化碳减排至峰值的20%，排放量降低至 $22 \times 10^8 \text{ t}$ 。剩余排放量主要通过二氧化碳封存及利用、人工碳转化、森林碳汇等方式消纳。中、高情景下对二氧化碳封存及利用、人工碳转化、森林碳汇等碳中和技术需求较大，应该加强这些领域的投入。

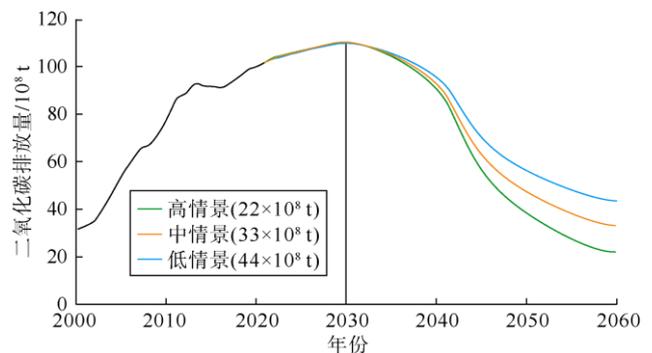


图7 中国碳排放量趋势预测图

4.2 中国碳中和实施路径

与其他国家相比，中国在实现碳中和道路上将面临碳排放量大、能源消费以化石能源为主、碳达峰到碳中和缓冲时间短等诸多挑战。中国是全球最大的二

氧化碳排放国，2019年二氧化碳排放量占全球总排放量的29.4%，比美国（14.4%）、印度（6.9%）和俄罗斯（4.5%）的总和还要多。目前，中国能源消费仍然以煤炭、石油、天然气等化石能源为主，特别是煤炭比重占一半以上。2019年，中国能源消费总量为34×10⁸ t油当量，煤炭占58%，石油占19%^[18]。中国从碳达峰到碳中和经历只有短短30年，即碳达峰后需要快

速下降，走向碳中和。欧盟承诺的碳达峰到碳中和时间为60~70年，缓冲时间是中国的2倍。针对中国国情，不能复制国外碳中和模式，需要制定符合中国资源禀赋及国情的碳中和实施路线。在实现碳中和的道路上，中国需要在电力、工业、建筑、农业等领域共同努力，减少“黑碳”的排放量和发挥“灰碳”的可利用性（见表2）。

表2 中国实现“碳中和”路径主要途径与技术成熟度

领域	途径	技术成熟度	减量源头
电力	新能源发电	技术成熟、早期应用	减少“黑碳”排放量
	储能技术	技术成熟、早期应用	
	提高能源转化效率	研发阶段	
	碳捕集与封存	示范阶段	
交通	电动车	早期应用	减少“黑碳”排放量
	燃料电池动力系统	示范阶段	
	提高动力效率	研发阶段	
	生物质能替代	早期应用	
工业	清洁燃料替代	示范阶段	减少“黑碳”排放量
	锅炉电气化	示范阶段	
	提高能效	研发阶段	
	碳捕集与封存	示范阶段	
	人工碳转换	示范阶段	
建筑	清洁供热替代	技术成熟、早期应用	减少“黑碳”排放量
	分布式能源	示范阶段	
	电气化、热泵	早期应用	
	开发新型建筑材料	研发阶段	
农业	农机电气化	早期应用	减少“黑碳”排放量
	限制作物燃烧	技术成熟	
林业	禽畜粪便、秸秆还田	技术成熟	发挥“灰碳”的可利用性
	植树造林	技术成熟	
生活	绿色出行	技术成熟	减少“黑碳”排放量
	电器及电子产品回收	早期应用	
	垃圾分类及回收	早期应用	
	节约能源消费	技术成熟	

4.2.1 推进煤炭高效清洁化利用

中国煤炭资源丰富，是主体能源类型和重要工业原料。大力推进煤炭高效清洁化利用既可有效控制二氧化碳排放，还能发挥煤炭保障国家能源安全的主力作用。煤炭高效清洁利用包括煤的安全、高效、绿色开采，煤燃烧中的污染控制与净化，新型清洁煤燃烧，先进燃煤发电和煤洁净高效转化等。煤炭地下气化是清洁利用的重要途径，可从根本上改变中深层煤炭开采利用模式，减少煤炭在开采和应用中造成的环境负

面影响。要力争实现中国陆上埋深1 000~3 000 m煤炭资源气化利用，预估这部分煤炭资源气化开采可产甲烷、氢气等气体 $(272\sim 332)\times 10^{12}\text{ m}^3$ ^[27]。中国约50%的煤炭消费总量用于发电，解决燃煤发电的清洁高效问题是煤炭高效清洁利用的重中之重。现代煤化工主要以洁净能源和精细化学品为主，包括煤制气、煤制油、煤制化工品等。

4.2.2 加快清洁用能替代

加快实施清洁用能替代，优化能源结构，构建清

洁低碳、安全高效的能源体系是中国实现碳中和的重要举措。依靠技术创新，进一步降低太阳能、风能发电成本，利用风电-光电-储能耦合模式替代火电，发挥储能技术快速响应、双向调节、能量缓冲优势，提高新能源系统调节能力和上网稳定性。利用光热-地热耦合模式替代燃煤供热用能，发挥太阳能光热和地热的各自优势，形成互补供热用能。

4.2.3 提升天然气在低碳转型中的最佳伙伴到最后桥梁作用

天然气是低碳清洁能源，是能源从高碳到零碳过渡的桥梁，对实现碳中和起到积极促进作用。在碳中和背景下，中国天然气需求增长强劲，预计到 2035 年，需求量将可能快速增长至 $(6\,500\sim 7\,000)\times 10^8\text{ m}^3$ 。以四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地为重点，建成多个百亿立方米级天然气生产基地，促进常规天然气增产。重点突破非常规天然气勘探开发，完善产业政策体系，促进页岩气、煤层气等开发利用。

4.2.4 大力发展“绿氢”工业及其产业链

中国需要像煤炭、油气等工业一样，加快构建氢能工业，推动实施“氢能中国”战略。中国氢能需求旺盛，但仍以化石能源制氢（即“灰氢”）为主。利用“绿氢”替代“灰氢”可有效降低二氧化碳排放。据中国氢能联盟预测，2030 年中国将处于氢能市场发展中期，氢气年均需求量达 $3\,500\times 10^4\text{ t}$ ，在终端能源消费中占 5%；2050 年氢气年均需求量达 $6\,000\times 10^4\text{ t}$ ，“绿氢”占氢气来源的 70%，在终端能源消费中占比至少到 10%^[28]，可减排二氧化碳约 $7\times 10^8\text{ t}$ 。此外，加快推进储氢、运氢、氢燃料电池及加氢站等产业链整体发展，与油气工业深入融合，利用现有天然气管网和加油站等基础设施，在产氢、加氢等产业链节点发挥油气公司先天优势，实现“油、气、氢、电”四站合建，推进氢工业体系高质量发展。

4.2.5 加大二氧化碳埋藏及封存应用与推广

二氧化碳埋藏与封存能够实现二氧化碳大规模减排，是化石能源清洁化利用的配套技术。中国以煤炭为主的资源禀赋决定，必须加大二氧化碳的埋藏及封存应用与推广，发挥其在碳中和进程中的作用，推动

煤炭高效清洁化利用。未来可利用开采油气后的枯竭油田、气田和地下“水田”，形成埋藏及封存二氧化碳的“人工二氧化碳气田”（见图 8、图 9）。目前，中国石油已在吉林油田、新疆油田、大庆油田开展二氧化碳驱油等技术攻关，形成年产超 $100\times 10^4\text{ t}$ 驱油产量，

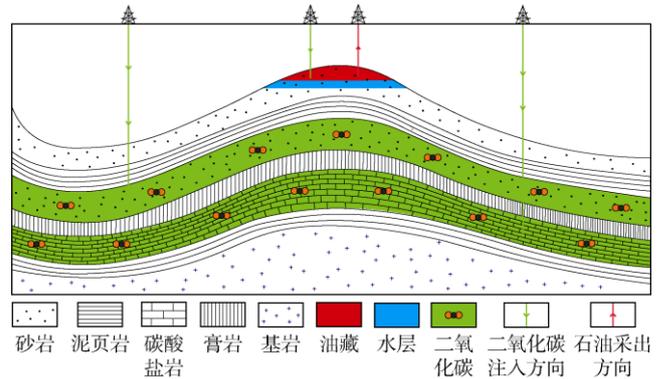


图 8 二氧化碳地下埋藏与封存地质模式图

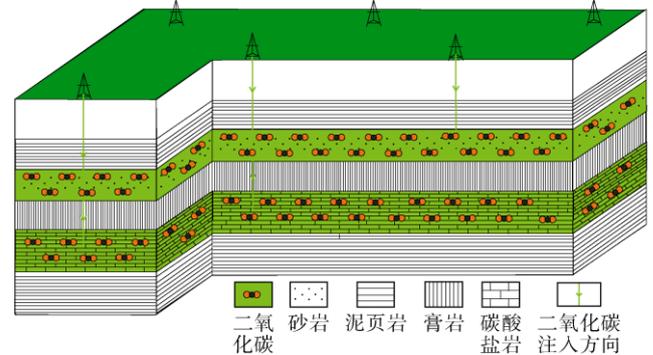


图 9 二氧化碳地下埋藏与封存模型

二氧化碳驱油技术取得新的突破。

中国近海二氧化碳海底地质封存潜力大，封存总容量约为 $2.5\times 10^{12}\text{ t}$ ^[29]。初步预测鄂尔多斯盆地深部咸水层和油藏的二氧化碳有效封存量分别为 $133\times 10^8\text{ t}$ 和 $19.1\times 10^8\text{ t}$ ，吐哈盆地油气藏、深部咸水层和煤层二氧化碳有效封存量为 $44\times 10^8\text{ t}$ 。预测沁水盆地煤层二氧化碳的吸附和封存量可达 $1\,280\times 10^8\text{ t}$ ，其中吸附量占 96% 以上^[30-32]。此外，二氧化碳驱油、驱气不仅可以实现二氧化碳埋存，还可以提高油气采收率^[33]。

未来，可在松辽、渤海湾、鄂尔多斯、大庆等大型油气区，将采完的油田、气田建设成为“人工二氧化碳气田”埋藏与封存示范基地。

4.2.6 发展碳转化及森林碳汇

发展碳转化，将二氧化碳转化为化工产品或燃料，

实现“变废为宝”。中国科学院大连化学与物理研究所提出的“液态阳光”技术，将“绿氢”与二氧化碳反应制成甲醇，生产 1 t 甲醇可固定 1.375 t 二氧化碳。中国甲醇产能是 $8\,000 \times 10^4$ t 左右，主要从天然气和煤中制取，如果全部采用“液态阳光”技术生产甲醇，可固定上亿吨二氧化碳^[34]。

大力发展森林碳汇，中国西南、东北等重要林区的碳汇能力很大。2010—2016 年，中国陆地植被年均固碳能力约 11×10^8 t，约等于在此期间中国每年排放量的 45%^[35]。植树造林可在碳中和的进程中发挥有利作用。

4.2.7 建立市场机制控制碳排放

建立健全全国碳排放交易市场，利用市场机制控制碳排放。建立碳市场，增加化石碳类利用成本，有利于从源头减少化石能源消费，降低二氧化碳和大气污染物排放。中国当前碳排放交易市场尚处于构建初期，要进一步完善碳排放交易市场配套细则，实施相关基础设施建设，明晰碳交易相关方的行为标准与规范，健全国家碳排放交易市场体系。

5 结语

当今世界正经历百年未有之大变局。生态环境事关人类生存和永续发展，需要各国团结合作，共同应对挑战。碳中和是人类应对全球气候变化达成的共识，世界各国积极承诺实现碳中和目标。碳替代、碳减排、碳封存、碳循环是实现碳中和的 4 种主要途径，碳替代是实现碳中和的中坚力量，预计到 2050 年将贡献 47% 的二氧化碳减排量。

碳中和进程加速了全球能源从化石能源向新能源转型，新能源已成为第 3 次能源转换主角，未来将在碳中和发挥主导作用。预计 2030 年是新能源发展的转折年，新能源成本下降至可与化石能源相竞争；2030—2050 年新能源将大规模推广应用，碳排放下降趋势加快。2050 年全球大部分地区和国家将实现碳中和，新能源走上能源舞台中央成为主体能源。预计到 2100 年以前，能源消费结构由现阶段的“四分天下”转变为“一大三小”新格局（“一大”为新能源，“三小”为煤炭、石油、天然气）。未来中国也将逐步向世界能源消费结构新趋

势靠拢发展，实现从现阶段“一大三小”（“一大”为煤炭，“三小”为石油、天然气、新能源）向“三小一大”（“三小”为煤炭、石油、天然气，“一大”为新能源）跨越。加快氢能、新材料储能、可控核聚变等颠覆性技术攻关及工业化，以新能源为主实现中国“能源独立”战略，为宜居地球、绿色地球作出贡献。本文观点是目前阶段性认识，未来不同时期，随着科技与世界格局变化，碳中和的认识将不断革新和发展。

参考文献：

- [1] SCHURER A P, MANN M E, HAWKINS E, et al. Importance of the pre-industrial baseline for likelihood of exceeding Paris goals[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(8): 563-567.
- [2] MILLAR R J, FUGLESTVEDT J S, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 741-747.
- [3] IPCC. Summary for policymakers in IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. London: Cambridge University Press, 2019.
- [4] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change[R]. London: Cambridge University Press, 2014.
- [5] NEREM R S, BECKLEY B D, FASULLO J T, et al. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era[J]. *PNAS*, 2018, 115(9): 2022-2025.
- [6] MARTIN S, RICHARD B A, ERIC R, et al. Twenty-first century sea-level rise could exceed IPCC projections for strong-warming futures[J]. *One Earth*, 2020, 3(6): 691-703.
- [7] IPCC. Special report: Global warming of 1.5 °C[EB/OL]. (2018-10-08)[2021-02-19]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [8] 姜联合. 全球碳循环：从基本的科学问题到国家的绿色担当[J]. *科学*, 2021, 73(1): 39-43, 4.
- [9] IRNEA. Global renewables outlook: Energy transformation 2050 [EB/OL]. (2020-04-12)[2021-02-19]. <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.
- [10] Energy & Climate Intelligence Unit. Net zero emissions race[EB/OL]. (2020-04-12)[2021-02-19]. <https://eci.net/netzerotracker>.
- [11] IEA. Global CO₂ emissions in 2019[EB/OL]. (2020-02-11)[2021-02-19]. <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>.
- [12] IEA. CO₂ emissions statistics[EB/OL]. (2020-11-16)[2021-02-19]. <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics>.
- [13] 潘进军, 江滢, 郭鹏, 等. 中国太阳能资源和环境气象因子影响分析[J]. *科技导报*, 2014, 32(20): 15-21.
- [14] PAN Jinjun, JIANG Ying, GUO Peng, et al. China's solar energy resources and environmental meteorological factors impact analysis[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(20): 15-21.
- [15] 能源日报. 油价暴跌对绿色能源转型的影响[J]. *中外能源*, 2020, 25(6): 97.
- [16] Energy Daily. The impact of the plunge in oil prices on the green energy transition[J]. *Sino-Foreign Energy*, 2020, 25(6): 97.
- [15] BP. BP energy outlook 2020 edition[R]. London: BP, 2020.
- [16] 邹才能, 潘松圻, 党刘柱. 论能源革命与科技使命[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(3): 1-12.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, DANG Liushuan. On the energy revolution and the mission of science and technology[J]. *Journal of*

- Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(3): 1-12.
- [17] IEA. Energy technology perspectives 2020[EB/OL]. (2020-09-10)[2021-02-19]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- [18] 中国石油经济研究院. 2050年世界与中国能源展望(2020版本)[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2020.
China Petroleum Economic Research Institute. World energy outlook 2050[R]. Beijing: PetroChina Research Institute of Economics and Technology, 2020.
- [19] WOOD Mackenzie. Renewables in most of Asia Pacific to be cheaper than coal power by 2030[EB/OL]. (2020-11-26)[2021-02-19]. <https://www.woodmac.com/press-releases/renewables-in-most-of-asia-pacific-to-be-cheaper-than-coal-power-by-2030/>.
- [20] IRENA. Renewable power generation costs in 2019[EB/OL]. (2020-06-10)[2021-02-19]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.
- [21] HIS Markit. Hydrogen and renewable gas forum.[EB/OL]. (2020-06-15)[2021-02-19]. <https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0720/Hydrogen-and-Renewable-Gas-Forum-Brochure.pdf>.
- [22] AMELANG S. Germany's national hydrogen strategy[EB/OL]. (2020-06-17)[2021-02-19]. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-national-hydrogen-strategy>.
- [23] European Commission. EU hydrogen strategy[EB/OL]. (2020-07-09)[2021-02-19]. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.
- [24] STORE & GO. Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimization[R]. Karlsruhe, Germany: Engler-Bunte-Institute of Karlsruhe Institute of Technology, 2019.
- [25] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(2020年9月22日, 北京)[N]. 人民日报海外版, 2020-09-23(2).
XI Jinping. Delivers an important speech at the general debate of the 75th session of the United Nations (UN) general assembly (2020/09/22, Beijing)[N]. People's Daily Overseas Edition, 2020-09-23(2).
- [26] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
Project Comprehensive Report Writing Team. Comprehensive report on "China's long-term low-carbon development strategy and transformation path"[J]. China's Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1-25.
- [27] 邹才能, 陈艳鹏, 孔令峰, 等. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 195-204.
ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 195-204.
- [28] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书(2019版)[R]. 潍坊: 中国氢能联盟, 2019.
China Hydrogen Energy Alliance. White paper of China hydrogen energy and fuel cell industry (2019 edition)[R]. Weifang: China Hydrogen Energy Alliance, 2019.
- [29] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
HUO Chuanlin. Evaluation of carbon dioxide sequestration potential offshore China and study of sequestration areas[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [30] ZHAO X L, LIAO X W, HE L P, et al. The evaluation methods for CO₂ storage in coal beds in China[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(3): 389-399.
- [31] 杨红, 赵习森, 康宇龙, 等. 鄂尔多斯盆地CO₂地质封存适宜性与潜力评价[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 95-102.
YANG Hong, ZHAO Xisen, KANG Yulong, et al. Evaluation of suitability and potential of CO₂ geological storage in Ordos Basin[J]. Climate Change Research Progress, 2019, 15(1): 95-102.
- [32] 库力孜那. 新疆吐哈盆地二氧化碳地质封存潜力分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
KULIZINA. Analysis on the potential of carbon dioxide storage in the Tuha Basin, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016.
- [33] HILL L B, LI X C, WEI N, et al. CO₂-EOR in China: A comparative review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 103: 103-173.
- [34] 姚金楠. “液体阳光”是实现低碳能源的主要途径[N]. 中国能源报, 2019-10-28(2).
YAO Jinnan. "Liquid Sunshine" is the main way to realize low-carbon energy[N]. China Energy News, 2019-10-28(2).
- [35] WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Publisher correction: Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 588(7837): 720-723.

第一作者简介: 邹才能(1963-), 男, 重庆北碚人, 博士, 中国科学院院士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事常规-非常规油气地质学理论与实践、新能源与能源战略等研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: zcn@petrochina.com.cn

联系作者简介: 熊波(1979-), 男, 湖北荆州人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事能源战略与新能源研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院新能源研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: xiongbo69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-01-28 修回日期: 2021-03-10

(编辑 王晖)

(上接第393页)

- [18] MOMENI M S, RIDHA S, HOSSEINI S J, et al. Bit selection using field drilling data and mathematical investigation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 328(1): 012008.
- [19] EDALATKHAH S, RASOUL R, HASHEMI A. Bit selection optimization using artificial intelligence systems[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(18): 1946-1956.
- [20] 杨建超, 姜在炳. 灰色关联分析法在乌鲁木齐矿区储层评价中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(10): 36-40.
YANG Jianchao, JIANG Zaibing. Application of grey relational analysis in Urumqi mining area reservoir assessment[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(10): 36-40.
- [21] 李刚伟. 基于 Z-Score 模型对宜人贷财务风险进行评定[J]. 价值工程, 2020, 39(21): 76-78.
LI Gangwei. The evaluation of financial risk of YRD based on Z-Score model[J]. Value Engineering, 2020, 39(21): 76-78.
- [22] 赵峰含, 王德运, 诸克军. TOPSIS 法在油田企业勘探开发投资一体化效益评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(10): 1-7.
ZHAO Xiaohan, WANG Deyun, ZHU Kejun. An evaluation approach for oil exploration and exploitation investment based on TOPSIS[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(10): 1-7.
- [23] 廖炎平, 刘莉, 邢超. TOPSIS 中不同规范化方法的研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(8): 871-875, 880.
LIAO Yanping, LIU Li, XING Chao. Investigation of different normalization methods for TOPSIS[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(8): 871-875, 880.
- [24] 车晴, 史弘宇. 基于熵权法和因子分析的区域经济活力模型[J]. 产业创新研究, 2020, 38(9): 23-24.
CHE Qing, SHI Hongyu. Regional economic vitality model based on

- entropy weight method and factor analysis[J]. Industrial Innovation, 2020, 38(9): 23-24.
- [25] 周春林. 地层岩性解释及 PDC 钻头选型方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
ZHOU Chunlin. Research on formation lithology interpretation and PDC bit selection method[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [26] 候德大. 大庆油田中深井 PDC 钻头结构优化设计研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
HOU Deda. Research on PDC bits structure optimization design in middle-deep well of Daqing oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [27] 隋梅, 孙明光. 针对地层岩性特征进行金刚石钻头优化设计和选型[J]. 西部探矿工程, 2003(7): 86-88.
SUI Mei, SUN Mingguang. Optimized design and selection of

diamond drill bits according to the lithological characteristics of the formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2003(7): 86-88.

第一作者简介: 闫铁 (1957-), 男, 黑龙江肇州人, 东北石油大学教授, 主要从事钻井岩石力学及油气井工艺理论方面的研究工作。地址: 黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号, 东北石油大学石油工程学院, 邮政编码: 163318。E-mail: Yant@nepu.edu.cn

联系作者简介: 许瑞 (1994-), 女, 甘肃省嘉峪关人, 东北石油大学在读博士研究生, 主要从事智能钻井技术方面的研究工作。地址: 黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号, 东北石油大学石油工程学院, 邮政编码: 163318。E-mail: sygcxytyb@163.com

收稿日期: 2020-06-04 修回日期: 2021-02-07

(编辑 唐俊伟)