

文章编号: 1000-0747(2020)02-0416-11 DOI: 10.11698/PED.2020.02.21

论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义

邹才能, 潘松圻, 赵群

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

基金项目: 国家自然科学基金(41902151); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA14010403)

摘要: 世界能源正处在从化石能源向新能源发展的“第3次重大转换期”, 各国都制定能源发展战略。美国通过超前部署, 依靠“非常规油气革命”即将实现“能源独立”。中国能源发展面临4大挑战: 人口基数和经济发展规模决定能源消费“总量大”, “富煤但油气不足”的资源结构决定能源结构“不清洁”、持续攀升的油气对外依存度决定能源供应“不安全”、非常规油气禀赋决定复制美国模式实现能源独立“不可行”。从世界能源大势与中国能源特殊性出发, 开启中国“能源独立”长征路, 提出“三步走”构想: ①2020—2035年, 依靠“洁煤稳油增气、大力发展新能源”, 解决“供给安全”问题; ②2035—2050年, 依靠“国内生产+海外权益”, 兑现“生产自主”愿景; ③2050—2100年, 依靠“新能源+智能源”, 有望实现中国“能源独立”。中国“能源独立”战略两个重要标志是国内生产量占消费量90%以上、清洁能源生产量占消费量70%以上, 能源安全实现“长久安全”和“自主可控”, 战略意义是保障国家能源安全、带动相关大产业发展、实现能源管理变革、落实零碳化环保目标。中国“能源独立”是个战略性命题, 随着国家实力显著提升, 或许不需要国内能源生产量与消费量基本相当, 就能保障能源供给与消费安全。世界新科技革命或将超出预期, 中国“能源独立”梦想将如愿到来。图4参30

关键词: 能源独立; 能源革命; 智能源; 煤炭; 非常规油气; 新能源; 能源长征路

中图分类号: TE122

文献标识码: A

On the connotation, challenge and significance of China's “energy independence” strategy

ZOU Caineng, PAN Songqi, ZHAO Qun

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The world's energy is in the “third major transformation period” from fossil energy to new energy, and all countries in the world have formulated energy development strategies. Through advanced deployment, the United States is about to achieve “energy independence” relying on “unconventional oil and gas revolution”. China's energy development is faced with four challenges: (1) The population base and economic development scale determine the “totally huge amount” of energy consumption; (2) the “coal rich but oil and gas insufficient” resource structure determines the “unclean” energy consuming structure; (3) the increasing dependence on imported oil and gas determines the “unsafe” energy supply; and (4) the unconventional oil and gas endowment makes it impossible to achieve energy independence by copying the American model. From the perspective of the world energy trend and the unique situation of China's energy, we put forward a “three-step” strategy for China to achieve “energy independence”: From 2020 to 2035, “energy supply security” will be addressed by “cleaning coal, stabilizing oil and gas production and vigorously developing new alternative energy”; from 2035 to 2050, the vision of “production independence” will be realized by relying on “domestic production and overseas oil and gas mining rights”; from 2050 to 2100, “intelligent energy and new energy” will help China realize “energy independence”. The two important signs of China's “energy independence” are that domestic production accounts for more than 90% of the domestic consumption and clean energy production accounts for more than 70%, and energy security realizes “independence and self-control” and “long-term security”. The strategic significance of “energy independence” is to ensure national energy security, drive the development of relevant major industries, achieve energy management reform, and implement the environmental protection goal of zero carbon emissions. The “energy independence” of China is a strategic mission, it might be fulfilled in the future with the growth of the state's power, even when the domestic energy production does not catch up with the domestic consumption. Perhaps the world's new technological revolution will exceed expectations, and China's “energy independence” dream will eventually come true.

Key words: energy independence; energy revolution; intelligent energy; coal; unconventional oil and gas; new energy; energy long march

引用: 邹才能, 潘松圻, 赵群. 论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 416-426.

ZOU Caineng, PAN Songqi, ZHAO Qun. On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 416-426.

0 引言

中国作为能源生产、消费、进口大国，应加快制定适合国情的近、中、远期能源战略规划，并明确技术路线与实施举措。本文提出中国“能源独立”是一个战略命题，主要目的是希望“能源独立”的战略命题和科学谋划，实现本质上国内能源生产满足至少 90% 消费。但随着国家经济、技术、军事等力量的显著提升，或许不需要实现形式上的能源生产量与消费量基本相当，就能够保障国家能源安全的“自主可控”与“长治久安”。

人类自 600 万年前诞生，开始到世界各地建设家园，开启能源利用时代^[1-3]。第 1 次拿起火种之后，能源、水、粮食构成人类赖以生存的 3 大物质要素。能源是自然界中能为人类生存及社会进步提供能量的资源，可分为传统化石能源和非化石能源。新能源是指在新技术基础上加以开发利用，接替传统能源的可再生清洁能源，主要类型有太阳能、水能、风能、氢能、地热能、海洋能、生物质能、核能等^[4]。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^[4]。

科技进步、社会发展两大动力驱动了能源发展，“能源独立”是一个国家强盛的保障和安全的基石。美国自 1973 年提出“能源独立”以来^[5]，以页岩油气等非常规资源为重点，通过超前战略引领、财税法律配套，坚定不移支持页岩油气全面产业化，经过近 50 年不懈努力，预计 2022 年全面实现“能源独立”。美国已于 2018 年实现天然气净出口 $1.085 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，预计 2022 年将实现原油净出口。预计到 2030 年，美国化石能源净出口 $3.1 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量，包括天然气 $1.700 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、原油 $1.1 \times 10^8 \text{ t}$ 、煤炭 $1.0 \times 10^8 \text{ t}$ ^[6]。

本文从世界能源发展规律出发，分析世界能源发展态势和中国能源现状，提出能源生产和消费不平衡决定当前世界 5 种能源发展模式，研判未来以零碳智能化新能源为主是世界能源转型大方向。中国能源发展面临“总量大、不清洁、不安全”的挑战，资源禀赋和基本国情决定不能简单复制美国发展模式，但成功经验可借鉴。从中长远谋划，应以“新能源革命”为主导，开启中国“能源独立”的长征路，是中国未来能源发展的必由之路与战略选择。制定“三步走”发展技术路线图，依靠“洁煤稳油增气、大力提高新

能源”解决“能源安全”问题，依靠“国内生产+海外权益”兑现“能源自主”愿景，依靠“新能源+智能能源”实现“能源独立”战略，分步有序调整能源结构从“一大三小”向“三足鼎立”、“一大一小”转变。只有完成新能源占主体的“一大一小”能源结构革命性转型，方可能实现中国“能源独立”战略。

1 世界能源发展态势

1.1 世界正处于化石能源向新能源发展的“第 3 次重大转换期”

从时间维度上看，人类已完成 17 世纪—19 世纪中叶从木柴到煤炭的第 1 次转换、19 世纪中叶—20 世纪中叶从煤炭到油气的第 2 次转换。自 20 世纪中叶起，已进入从油气向新能源的第 3 次转换^[4]。能源利用展现出由高碳到低碳、无碳的发展规律，由固态到液态、气态的发展方向。

从世界能源生产和消费结构来看，世界能源呈现“四分天下”新格局。2018 年，世界能源产量 $138 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量，其中煤炭占 28%、石油占 32%、天然气占 24%、新能源占 16%，与消费格局相当，已形成煤、油、气、新能源“四分天下”格局，能源去碳化趋势持续加强。

从能源发展未来趋势来看，全球新能源消费占比不断增加，世界能源转型革命必将完成可再生的新能源对传统不可再生化石能源的“终极革命”。2018 年，全球新能源消费 $21 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量，占能源总消费的 15.3%，同比增速 5.7%。近 10 年来，全球新能源以水电、核电为主，太阳能、风能等消费增势强劲，地热、生物质能等缓慢增长，核电消费呈下降趋势。

1.2 能源生产和消费的不均衡决定当前世界 5 种能源发展模式

高消费-高产量能源自给型的美国，能源需求平稳，化石资源充足，非常规油气产量增长迅速。2018 年，美国能源生产 $21.1 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量，消费 $23.0 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量，对外依存度 8.3%。从 1973 年尼克松政府提出“能源独立”战略，到 2022 年美国或将依靠“页岩革命”实现“能源独立”，历经 50 年，美国引领全球页岩油气跨越式发展，重塑全球能源版图，影响全球政治经济格局。

低消费-高产量能源出口型的俄罗斯，油气资源极其丰富，油气产量高，是油气资源的主要出口国，基

本不发展除油气以外的其他能源类型。2018年,俄罗斯能源产量 14.5×10^8 t油当量,消费 7.2×10^8 t油当量,出口51%。

低资源-部分进口能源平衡型的英国,化石能源面临枯竭,可再生能源发展潜力大,能源消费和产量基本平衡。英国率先提出低碳经济,实施“碳预算”,实行碳捕捉与封存商业化^[7]。2018年,英国能源生产 1.27×10^8 t油当量,消费 1.87×10^8 t油当量,对外依存度33%。

高消费-极低产量能源进口型的日本,化石能源严重匮乏,能源消费长期依赖进口,新能源快速发展。2018年,日本能源生产 1.4×10^8 t油当量,消费 4.5×10^8 t油当量,对外依存度70%。日本福岛核事故后“弃核转氢”,在国内全面发展氢能产业,或将于2050年前依靠建设“氢能社会”实现“能源自主”。

高增长-稳定产量能源部分进口型的中国,经济快速发展推动能源需求持续增长,煤炭资源丰富但油气资源相对匮乏,油气对外依存度不断加大。油气是中国能源生产的“短板”,又是能源消费中影响安全最敏感的战略资源。2018年,中国能源生产 26.4×10^8 t油当量,消费 32.7×10^8 t油当量,对外依存度19%,其中石油和天然气对外依存度分别达到71%和43%。

1.3 人类生态环境恶化和生活方式转变双重推动新能源加快发展

1.3.1 世界局部地区化石能源消费超过环境承载能力

二氧化碳等温室气体排放持续增加,全球变暖趋势加强。2018年,大气中二氧化碳含量处在过去80万年以来最高值,浓度达到 407.3×10^{-6} ^[8-10]。大气中另外两种强效温室气体甲烷和一氧化氮的浓度也达到了有记录以来最高值,分别为 1857.3×10^{-9} 和 330.9×10^{-9} ^[10]。

地球正面临气候变化带来的环境危机^[11]。珊瑚白化事件反映海水变暖,珊瑚大量死亡^[12];永冻带高温导致冻土层解冻向大气释放二氧化碳和甲烷,加剧全球气候变暖^[13-14];北极地区海冰受到变暖影响,温度持续升高,超过全球平均水平^[9];格陵兰冰盖加速融化,若全部融化将使海平面上升7.2 m^[15-17]。

1.3.2 新4次工业革命推动新能源加快发展

世界已进入第6次科技革命,已经发生的2次科学革命与3次技术革命,引领和推动世界进入第4次工业革命,能源也进入油气向新能源第3次转化阶段(见图1)。每次产业技术的革新必将引领新的能源利用方式。18世纪60年代的第1次工业革命得益于力学、热力学理论进步,以蒸汽机作为动力为标志,完成了

以机器替代手工劳动的生产方式,开启了煤炭利用的时代,能源利用进入“蒸汽机时代”。19世纪70年代的第2次工业革命,电磁学应用于电力领域,电器开始用于代替机器,电力成为新的能源,能源利用进入“电气化时代”。随着以煤气和汽油为燃料的内燃机发明,推动了石油开采业和石油工业的发展。20世纪50年代的第3次工业革命,伴随二进制计算机语言的发明,数学和通信紧密结合,构建了全球产业链互联,能源开发、利用和分享更加紧密,能源利用进入“信息化时代”。随着生物与计算科学的融合,量子计算机赋予机器更强算力、更多智慧,第4次工业革命正在来临,是以石墨烯、基因技术、量子信息智能技术、可控核聚变、生物技术及清洁能源为技术突破口的工业革命,社会面临更加激烈的资源整合和产业互联,能源利用进入“智能化新能源时代”。

纵观世界能源发展史,伴随每次工业化进步,能源类型呈现从高碳向低碳、无碳的发展趋势,利用途径从直接一次到多次转换,为新能源产业带来革命,为中国“能源独立”战略带来机遇,传统化石能源必将完成到新能源的终极转换^[4],能源生产和利用将进入“清洁化、智能化”时代。

1.4 长期中低油价倒逼油气理论创新与技术进步

自1859年世界第1口工业油井在美国宾夕法尼亚州成功开采以来,石油工业理论、技术发展经历了3个时期(见图2):①找油萌芽时期,以背斜理论为标志,以使用顿钻和旋转钻井概念提出为技术特点;②常规油气时期,以圈闭型“油气藏”理论为指导,形成旋转钻井发展、喷射钻井、自动化钻井技术序列;③常规-非常规油气时期,以连续型“甜点区”为核心的非常规油气地质学理论创新,以水平井水力压裂、平台式工厂化作业为技术突破,尤其是美国和中国,实现了非常规油气勘探开发规模高效发展。

全球油价中低位运行,倒逼石油公司开展理论和技术革新,降本增效,形成以非常规油气地质学、深层古老碳酸盐岩油气地质、常规-非常规“有序聚集”、“源岩油气”地质等为特色的理论体系(见图2)。2000年后,以风能、太阳能、地热能、生物质能等为代表的新能源消费量在低油价背景下大幅攀升。2018年,新能源(非化石能源)占一次能源消费比例达15.3%^[18]。

化石能源资源潜力还很大,全球化石能源还可以利用100年以上。2018年全球煤炭、石油和天然气储采比分别为132、50和51,尤其是非常规油气革命后,石油工业可采资源进一步增加。但化石能源未来面临

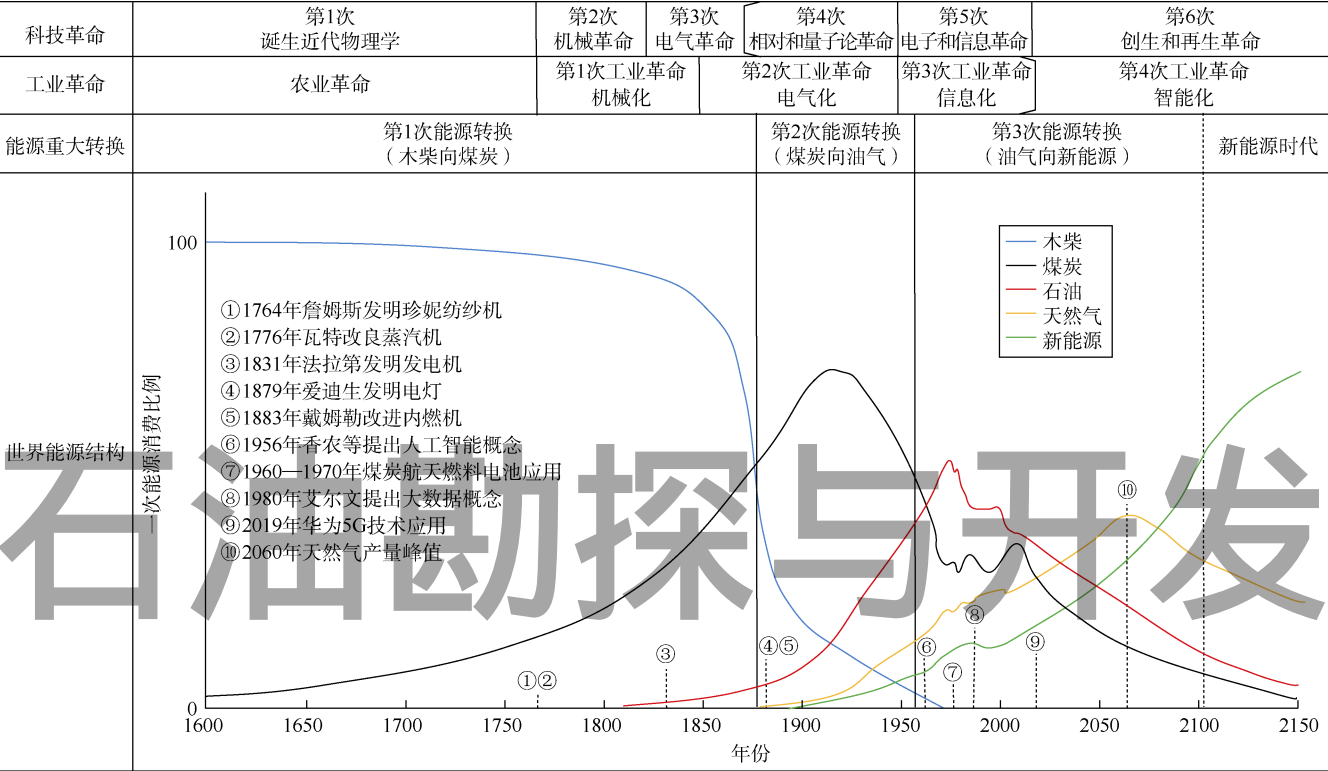


图 1 世界工业与科技革命及能源体系转型趋势

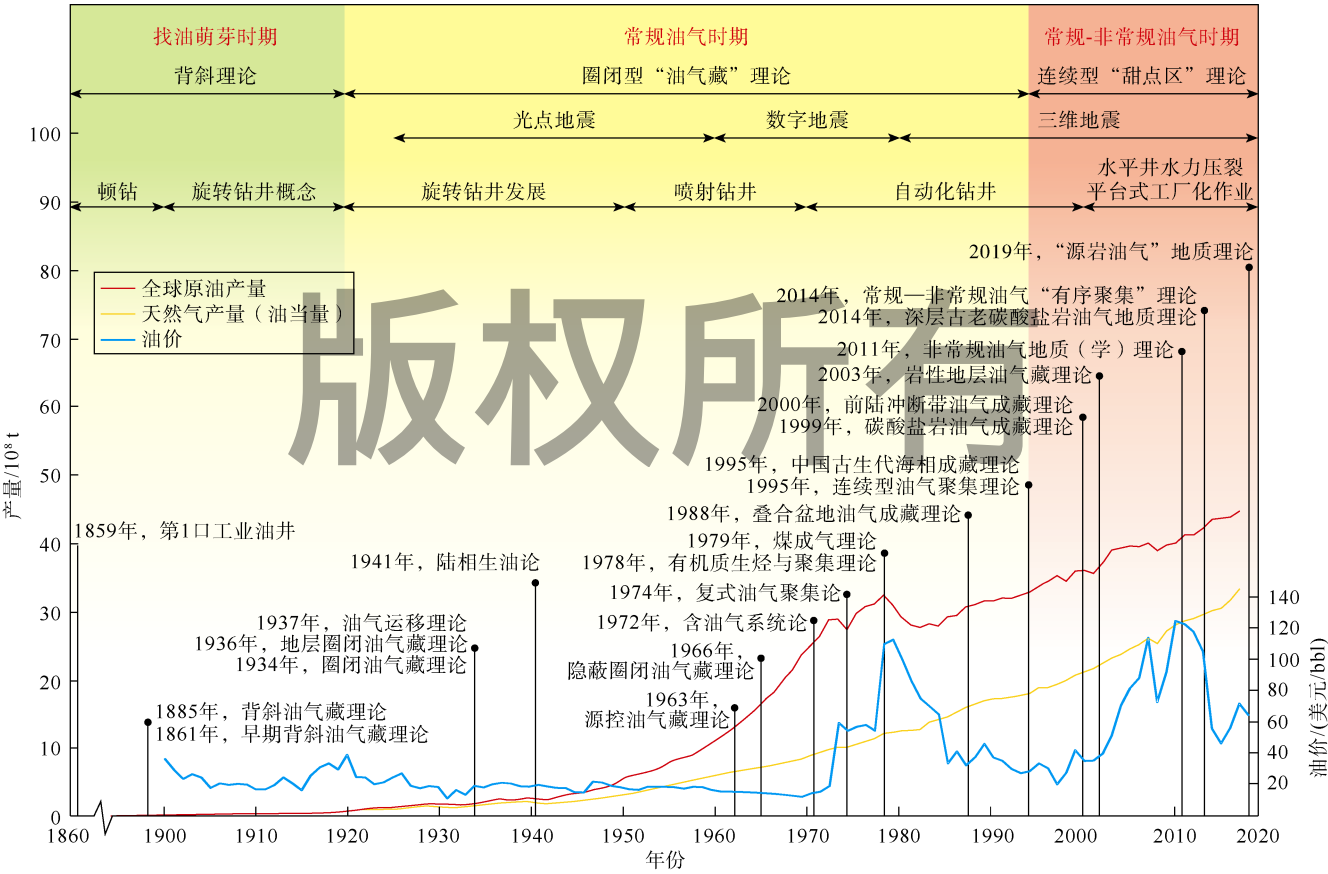


图 2 世界石油工业理论技术创新、油气产量及油价趋势（1900—1944 年使用美国平均价格，1945—1983 年使用阿拉伯 Ras Tanura 报价，2014 年至今使用 Brent 价格，图中价格考虑美国 2018 年通货膨胀^[18]）

含碳不清洁、较高开采成本不经济等严峻挑战,或许等不到化石资源枯竭,“新能源革命”就将提前到来。

2 中国“能源独立”战略命题提出的历史背景

2.1 美国依靠“非常规油气革命”即将实现“能源独立”

1973 年美国首次提出“能源独立”战略,准确定位页岩气等非常规油气资源,在近 50 年的科技引领、财政扶持和法律保障“三位一体”长期持续推动下,2022 年或将实现能源独立,预计 2030 年能源出口将达到 3.1×10^8 t 油当量^[19]。美国通过长期努力持续攻关实现“能源独立”目标,其战略思路和经验值得借鉴。

超前部署是美国布局“能源独立”的战略出发点,通过超前科技攻关、能源部重组法案、实施《原油意外获利法》等 3 大措施,持续不断支持“能源独立”战略。1976 年美国能源部设立非常规天然气研究项目(UGRP),下设东部页岩气项目(EGSP),两个项目至 2005 年结束,运行周期长达 28 年。1976 年通过能源部重组法案,设立天然气研究院,确定持续投入油气科技项目资金超过 50×10^8 美元。落实非常规气开发税收抵免优惠政策,减免幅度 $1.083 \text{ 美元}/10^6 \text{ ft}^3$ (约 $0.26 \text{ 元}/\text{m}^3$),而 1989 年美国天然气价格仅为 $1.75 \text{ 美元}/10^6 \text{ ft}^3$ 。中国应借鉴美国经验,科学研判世界能源发展大势,系统分析资源基本面貌,因地制宜、因情施策制定符合基本国情的“能源独立”战略。

2.2 中国能源发展与生产态势

1949 年新中国成立时,全国能源生产总量仅有 0.2×10^8 t 标准煤。其中,原煤产量 0.3×10^8 t、原油产量 12.0×10^4 t、天然气产量 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,发电量 $43.0 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。2018 年全国能源生产总量达 26×10^8 t 油当量,其中原煤产量 36.8×10^8 t、原油产量 1.9×10^8 t、天然气产量 $1602.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,发电量达 $71117.7 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

70 年来,中国能源科技实现全面自主创新,形成中国特色的陆相成油、海相成气地质理论和微纳米孔产油气的非常规油气等理论技术,支撑油气规模生产。太阳能、风能、水电与核电等技术支撑新能源跨越发展,煤炭清洁化应用技术实现突破,中国已成为能源科技强国和利用大国,已经远超美国成为世界最大能源生产国、最大能源消费国、最大能源进口国。

从能源消费结构来看,目前世界一次能源消费中油气占 57.5%,处在油气为主的时代,而中国煤炭消费占 58.4%,仍处在煤炭为主的时代。若以煤炭消费比例为参考标准,1965 年煤炭在世界一次能源消费中占比

37%,预计中国在 2050 年前后才可达到,能源结构演进滞后世界水平约 85 年。

2.3 中国“能源独立”战略命题实施的历史机遇

传统化石能源未来短期内仍将发挥稳定供给、服务社会的重要作用,但不能单独依靠化石资源完成“能源独立”目标。大力发展新能源,与化石能源形成合力,是中国实现“能源独立”的唯一途径和必须选择。

2.3.1 依靠“洁煤稳油增气、大力发展新能源”有望实现能源独立

中国和美国非常规油气地下与地上条件截然不同,环保要求又限制煤炭长期“一支独大”,资源禀赋制约油气大规模上产,非常规能源快速发展但增长有限。这些条件决定中国不能像美国单一依靠非常规油气解决能源供需矛盾。在化石能源储量和新能源潜力上,中国具备资源基础条件和发展潜力,在新科技与工业革命大背景下,依靠“洁煤稳油增气、大力发展新能源”是实现“能源独立”的历史机遇。

应推动能源生产和消费革命,依托国家重大战略规划带动能源转型。在“洁煤”上实施“地下煤制气生产革命”,推动煤炭集中清洁化利用;在“稳油增气”上加强国内生产并借势“一带一路”战略布局扩大海外合作权益油气增加,坚持“水合物生产试验”,拓展天然气供应领域;在“大力发展新能源”上实施“氢能生产革命”,加快与油气基础建设融合;在“新能源技术革命”上以储能电池、纳米超材料、石墨烯、磁约束聚变等颠覆性技术为重点,推动能源利用向无碳化、互联化、大数据、智慧化转型。

2.3.2 生态环境问题突出决定能源清洁化发展成为必然选择

以煤、石油等为代表的高碳化石能源燃烧排放物是造成大气污染的主要来源,也是中国大部分城市雾霾形成的重要原因^[20-21]。随着环境保护日益重要和建设“美丽中国”的提出,从 2013 至 2018 年,污染物中 PM10、PM2.5、二氧化硫和氮氧化物等指标下降了 35%~45%,大气臭氧含量从 $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升到 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。能源清洁化发展成为生态环境保护的必然要求。2019 年北京及周边地区通过大力实施“煤改气”等,大气质量指标 PM2.5 浓度较快降低,从 2013 年的年均 $89.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 2019 年的 $42.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.3.3 中国原油需求达峰时间成为能源结构变革的机遇期

世界多数发达国家石油消费呈现双驼峰特征,1973 年和 1979 年石油危机重创发达国家经济,影响石油消费,形成第 1 个消费峰值(见图 3)。根据各国一

次能源消费构成不同和资源禀赋差异,多数发达国家第 2 次消费达峰略有差异,例如日本和美国分别在 1996 年和 2005 年达到第 2 次消费峰值。中国原油消费仍在增

长,在基准情景、强化政策情景和温控情景下^[22],预测在 2025 年或 2040 年消费达峰。中国能源需求,尤其是原油消费达峰时间将是能源结构变革的重要机遇期。

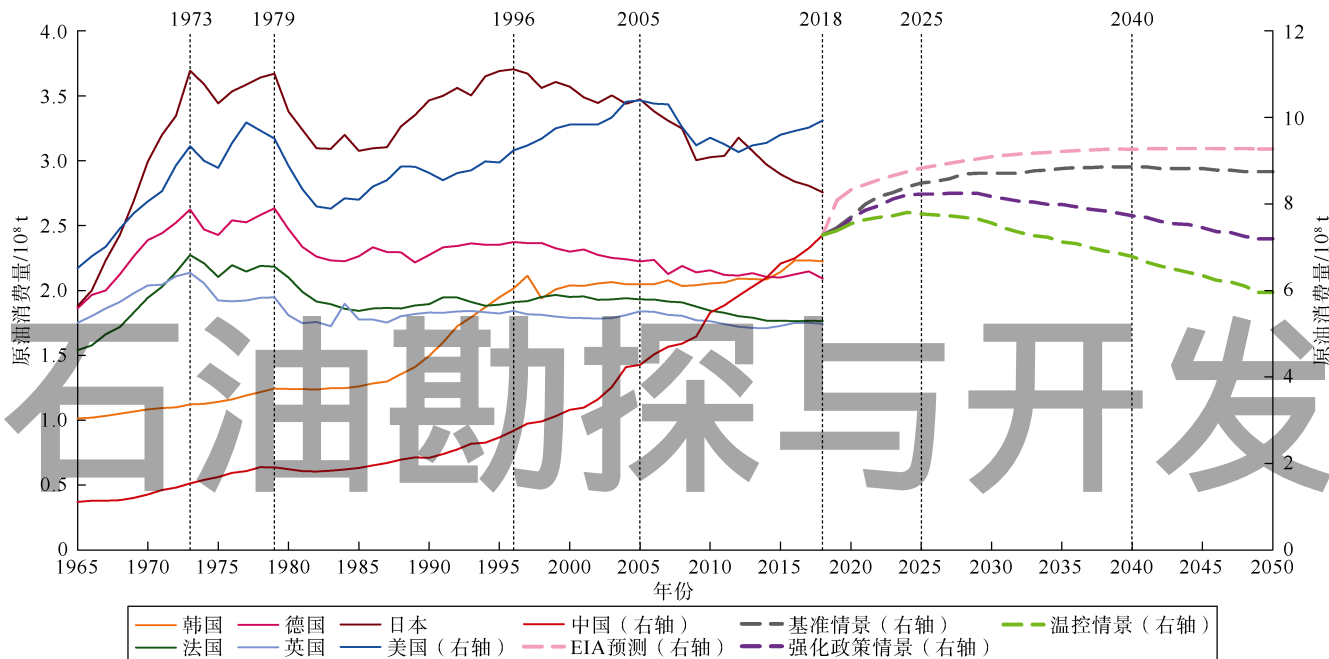


图3 各国石油消费达峰模式及中国未来石油消费预测(1965—2018年各国石油消费数据来源于文献[18],2018—2050年中国石油消费EIA预测来源于文献[23],其他预测来源于文献[22])

2.3.4 新能源颠覆性科技创新为“能源独立”提供技术支撑

随着新能源技术向规模化、低廉化、大众化发展,以氢能、储能电池、纳米超材料、石墨烯、磁约束聚变等颠覆性技术为亮点的未来能源超乎想象。在氢能领域谋划高效电解水制氢等技术,核能领域谋划磁约束聚变等技术,储能领域谋划新材料石墨烯、纳米电池等技术,使新技术能源利用向智慧化、互联化、大数据化转型,日趋明朗的新技术序列为“能源独立”创造了必要的技术条件。科技爆炸和技术迭代必将推动新能源产业迅速发展,新能源时代或将提前到来。

3 中国能源发展面临 4 大挑战

中国能源发展目前面临消费总量大、结构不清洁、供给不安全、复制美国模式不现实等 4 大挑战,决定了实现“能源独立”战略的长久性和系统性,不可一蹴而成。

3.1 人口基数和经济发展规模决定中国能源消费体量“总量大”

中国是世界人口第 1 大国、汽车保有量第 1 大国、第 2 大经济体,人口基数和经济体量决定我国能源消费居世界第 1。2019 年末中国大陆人口基数突破 14×10^8 人,位居世界第 1^[24],比上年末增加 467×10^4 人,人口

自然增长率为 3.34‰。全国机动车保有量达 3.48×10^8 辆,其中汽车保有量 2.6×10^8 辆,同比增长 8.8%,全国 66 个城市汽车保有量超过 100×10^4 辆,30 个城市超 200×10^4 辆^[25]。中国国民生产总值(GDP)约 14.36×10^{12} 美元,增速 6.1%,位居世界第 2 大经济体^[26]。

3.2 “富煤但油气不足”的资源面貌决定中国能源结构“不清洁”

中国煤炭资源丰富但油气相对不足的先天禀赋条件决定了特殊的资源构成、生产和消费比例。截至 2018 年底,中国煤炭探明可采储量 1388×10^8 t,占全球储量 13.2%;石油探明可采储量 35×10^8 t,仅占全球储量 1.5%;天然气探明可采储量 6.1×10^{12} m³,仅占全球储量 3.1%。

2018 年,国内一次能源消费结构中煤炭占 58.4%、石油占 19.6%、天然气占 7.4%、新能源占 14.7%,同生产结构一样形成煤炭占比大、其他能源占比小的“一大三小”消费结构。相比世界能源消费“四分天下”格局,富煤少油气的“不清洁”能源结构严重制约美丽中国建设,以煤炭为主的能源时代决定了中国“不清洁”的能源结构需要低碳化发展。

3.3 持续攀升的油气对外依存度决定中国能源供应“不安全”

2018 年,全国一次能源消费 32×10^8 t 油当量,缺口 6×10^8 t 油当量,综合对外依存度 19%,主要缺油缺

气。2010年以来,国内原油产量徘徊在 2×10^8 t附近,远无法满足消费需求,对外依存度从2010年的55%大幅攀升至2018年的71%,已超过国家能源安全70%超危警戒线;天然气消费量从2010年的 $1\ 089\times 10^8$ m³增长到2018年的 $2\ 830\times 10^8$ m³,增幅160%^[18],对外依存度从11%攀升至43%。中国能源消费格局整体呈现“油稳气增”态势。

预计到2030年国内原油产量 $(1.6\sim 1.8)\times 10^8$ t,消费量达 $(6.5\sim 7.0)\times 10^8$ t,天然气产量 $(1\ 800\sim 2\ 200)\times 10^8$ m³,消费量达 $(5\ 500\sim 6\ 500)\times 10^8$ m³,油气对外依存度都可能超过70%。国内供需矛盾加剧,供给侧自主力削弱,油气“短板”更加明显,安全供给不稳定因素进一步增加。中国油气进口数量过大,进口来源集中,主要进口通道单一,能源供应不稳定,能源进口劣势突显,油气供应安全存在较大风险。

3.4 资源条件决定复制美国模式近中期实现能源独立“不现实”

美国非常规油气资源以海相盆地为主,资源量大,分布面积广,埋藏浅,地表平坦,页岩油气产量可以爆发式增长。但中国陆相盆地非常规油气资源规模相对较小,致密油和页岩油分布面积有限,有机质成熟度偏低,要形成 $(3\sim 5)\times 10^8$ t非常规油年产量,目前不具备资源与技术条件。中国非常规气主要是陆相致密气、煤层气以及海相页岩气。而海相页岩气主要分布于四川盆地及周缘,深浅不一、地表复杂,要形成年产几千亿立方米非常规气不具备资源基础。2018年美国页岩气产量 $6\ 072\times 10^8$ m³、致密油页岩油产量 3.1×10^8 t,中国要达到美国非常规油气产量规模,目前看难度极大。

中国复杂的地质条件不能支撑非常规油气产量大规模快速提升,不能满足近中期消费需求。当前新能源发展规模不足以弥补持续攀升的消费缺口,巨大的能源消费需求基数决定中国不能简单复制美国模式。中国能源需求体量大、油气资源相对缺少、新能源技术尚未规模突破,决定中国“能源独立”战略在中短期内面临很大挑战。

4 中国“能源独立”战略命题的内涵与意义

4.1 中国“能源独立”战略的基本内涵

中国“能源独立”战略是指通过能源战略制定、科技攻关、政策引导和科学布局,有序实现国内生产与海外权益产量总体达到与消费基本平衡,自主生产与消费能力基本相当,确保国家在重大事件时期国内生产基本满足消费。“有序实现”是指从现阶段国内生

产为主、国外权益补充的生产模式,力争转变为全部国内生产满足消费需求的供求关系。

中国“能源独立”的重要标志:①国内生产量占消费量90%以上、清洁能源生产量占消费量70%以上;②能源供应实现“长久安全”和“自主可控”。中国“能源独立”满足两种情景:①常态下,国内能源生产与海外权益产量基本满足国内能源消费量,实现能源供应“长久安全”,其中,国内生产至少90%,战略储备满足3~6个月应对极端重大事件时急需;②应急时,国内能源生产量与战略储备量基本满足国内能源消费量,保障短期极端情况下能源供应“自主可控”。

中国“能源独立”战略是契合我国社会主义现代化强国的奋斗目标,全面服务社会主义现代化强国建设。通过能源消费革命控制“天花板”,加强保障能源供应,大力促进新能源等绿色清洁能源发展,加快迈向煤炭40%、油气30%、新能源30%“三足鼎立”消费新格局,力争利用国内生产、国外权益模式保障能源生产与消费平衡,有望实现“能源自主”。不断调整优化能源结构,大力提升新能源生产和消费占比,预计当新能源消费占主体地位(占70%)、化石能源占30%构成“一大一小”能源消费格局时,有望实现“能源独立”。

4.2 中国“能源独立”战略的资源内涵

实现中国“能源独立”战略,提升中国能源技术创新能力,洁煤、稳油、增气、大力发展新能源是基础需要,积极综合协调煤炭、油气和新能源“3大领域”。

4.2.1 煤炭领域加快清洁化利用、提升煤化工规模、推动集中利用

煤地下气化是煤炭清洁利用的一种途径,可从根本上改变煤炭开采利用模式,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煤炭资源气化动用,预估可产甲烷、氢气等气体 $(272\sim 332)\times 10^{12}$ m³^[4]。

地面煤制油等煤化工是煤炭清洁利用的另一途径。利用煤化工与石化产业关联提升煤化工规模,实现煤化工副产物向炼厂供氢、向油田供CO₂驱替采油。打造“煤化厂-石化厂-油气田”产业链,实现煤炭高效、清洁利用和CO₂封存。2018年全国煤制油已建成产能 $1\ 138\times 10^4$ t,煤制烯烃产能 $1\ 112\times 10^4$ t,煤制乙二醇产能 363×10^4 t^[27]。

煤炭集中利用模式有助于提高煤炭燃烧效率、降低污染排放。中国是世界最大的燃煤火力发电国,年发电量 $4\ 732\times 10^{12}$ kW·h,占世界火力发电的47%^[18]。低功率工业锅炉较低负荷运行会造成烟温不能满足脱硝装置技术要求,导致氮氧化物排放超标。推动燃煤锅炉全负荷集中利用可实现燃煤高效清洁。

4.2.2 油气领域常-非并举，推动海域和海外，提升氢能产业与油气工业融合发展

提升陆上深层油气和非常规油气规模开发。中国塔里木、四川和准噶尔等3大含油气盆地均有深层油气重大发现。其中，塔里木盆地海相和陆相油气藏开发深度已突破8000 m，顺北油田产油层平均深度达到7632 m。塔北-塔中奥陶系地质资源量近 60×10^8 t油当量，2018年累计探明 26.5×10^8 t油当量，形成 $1\,005 \times 10^4$ t大油气区，中国正在世界上进行一场“深层油气革命”。中国“非常规油气革命”已进入战略突破期，储、产量持续增长是我国保障能源安全的现实方向。2018年非常规油气产量 $6\,365 \times 10^4$ t油当量，占油气总产量的22%。

突破海洋深水油气勘探和水合物资源开发利用，拓展海外油气权益。中国海域油气资源丰富，石油探明储量 64.7×10^8 t、天然气 6.7×10^{12} m³。中国已建成亚太、中亚俄罗斯、中东、非洲、美洲等5大海外油气合作区，2018年中国海外油气权益产量达 2×10^8 t油当量，较2017年增长3.7%。“一带一路”沿线应是油气合作的重点地区。

发展化石能源制氢，打通氢能产业链体系。目前化石燃料热化学重整制氢是全球主要氢能源，占96%以上^[28]，平均成本1.9美元/kg。中国已成为世界第一制氢大国，2018年工业氢气产量约为 $2\,100 \times 10^4$ t，占全球制氢总量的30%^[29]。加快推进氢能工业化发展，深入融合油气工业与氢能工业，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现有油气公司先天优势，实现“加油站、加气站、加氢站、加电站”四站合一发展，推进氢工业体系高质量发展。

4.2.3 加快新能源低成本、规模化生产，突破新材料新技术

加快太阳能、风能、水能、核能、地热能、生物质能等新能源低成本、规模化生产。2018年，中国新能源消费总量为 4.8×10^8 t油当量，占全国一次能源消费14.7%，同比增长11.8%，占全球新能源消费总量的22.7%。水能消费 2.7×10^8 t油当量，同比增长3.2%；核能消费 0.7×10^8 t油当量，同比增长18.7%；风能消费 0.8×10^8 t油当量，同比增长24.0%；太阳能消费 0.4×10^8 t油当量，同比增长50.6%；生物质能和其他消费 0.2×10^8 t油当量。新能源投资增加，生产成本下降接近化石能源。

加快突破除化石资源外的绿色制氢工艺技术，实现氢工业大规模发展。除化石燃料热化学重整、化工副产物制氢外，生物质制氢和太阳能制氢是制氢途径关键技术。生物质重整制氢分为直接利用热物理化学原理制氢和利用生物途径间接转换制氢两类。太阳能

制氢可能是未来大规模绿色制氢的主要方式，具有可再生、零碳排放的优点。

突破新材料新技术，需要在多领域技术取得革命性进展。例如，氢能领域绿色高效光能制氢与低成本燃料电池；核能领域快堆技术、磁约束聚变与微型电站；光伏领域新型钙钛矿、叠层结构发电；生物质能领域蓝藻乙醇等；储能领域液态金属电池、纳米电池和超级电容器；新材料领域高性能二维材料石墨烯、黑磷等。科技发展来看，大数据、云计算、人工智能、物联网等深度融合，催生智能化“能源管理革命”。

4.3 中国“能源独立”的战略意义

加快中国能源结构转型革命、实现“能源独立”的最终目标，必须构建新时代现代化能源体系。“能源独立”核心战略意义：一是保障国家能源供应安全，二是带动新能源革命相关产业大发展，三是实现“智能源”管理变革，四是落实能源零碳化环保目标。预测2030年中国能源消费量将达到峰值 44×10^8 t油当量，从中国地下资源禀赋客观实际出发，探寻一条低能耗可持续发展之路。

中国“能源独立”战略要求建立“智能源”高效管理体系。“智能源”不是某一特定能源类型，而是指利用人工智能、大数据、信息技术等实现互联和智能调配的所有能源类型总和。“智能源”将电网、油网、气网、管网、煤网等多网融合，实现多种能源互补、上中下游互联、生产消费互通，提高能源利用率、压缩能源损耗、避免能源浪费，形成多能协同、智能互补、高效利用的智慧能源管理体系。

中国“能源独立”战略不能依靠单一能源，要以“洁煤稳油增气、大力发展新能源”为总方针，分“三步走”实现多种能源互补。在摸清资源家底的基础上，不大规模盲目减煤、不过分夸大油气。要高度重视新能源，唯有依靠但不单靠新能源才能实现独立，力争到2100年实现化石能源与新能源生产二者地位转换，使新能源成为我国能源结构的主体。新能源成为主体能源，不是因为化石资源的枯竭，而是能源去碳化、低成本、环境保护的必然趋势。

4.4 实现“能源独立”的保障措施

应借鉴美国经验，从国家层面在两大领域超前部署：①政策领域，制定国家中长期“能源独立”行动计划，部署政策、法律、财税全方位支持；②科技领域，制定国家“能源独立”科技支撑计划，聚焦若干颠覆性技术，解决前瞻性重大科技问题。

从供给、消费、技术、体制方面开展“4大革命、1个合作”：①加快常规-非常规油和气^[30]、地下“页岩

油改质”与“煤炭气化”两个革命,加快煤炭清洁化利用,加快太阳能、风能等新能源低成本生产;②调整能源消费结构,提高能源利用率,降低损耗,设置能源消费“天花板”和“警戒线”;③突破一系列颠覆性技术,综合协调发展煤炭、油气、新能源“3大战略领域”;④做好产业结构顶层设计,引导前瞻性基础研究,支持新能源人才储备,建造超前尖端新能源实验室;⑤加强油气、新能源等国际合作,要以全球视野布局能源战略,加大技术创新促进国外权益能源生产。

5 中国“能源独立”战略3步走技术路线图

“3步走”战略技术路线图是从中国能源基本国情出发,在科学预判未来能源发展总体形势的基础上,紧密结合社会主义现代化强国建设目标,力争实现中国“能源独立”。

5.1 第1步(2020—2035年),化石能源为主并提速新能源

该阶段实施“洁煤稳油增气、大力提高新能源”路径,设置适合中国国情的能源消费“天花板”。目标是全力保障国内能源供给安全的同时兼顾环境保护。该阶段工作重点是“定方向、破瓶颈、制战略、保安全”。主体依靠化石资源保障能源供应,把握新能源技术革命方向,突破新能源快速发展瓶颈。明确未来能源主体依靠新能源才能实现“能源独立”的战略,保障该阶段中国“供给安全”。

该阶段应关注的现实领域包括传统化石能源清洁利用、产量持续增长,氢工业关键技术突破,储能和新材料技术低廉化大众化,“智能源”高效管理体系基本建立。布局煤清洁化利用与现有石油工业深度融合形成产业链。加快石油提高采收率与天然气“控水开发”技术突破,加强页岩油气、水合物等非常规油气工业性试验与工业化开采。基本实现制氢、运氢、储氢、加氢与用氢产业链突破,同时在太阳能、风能、水能、核能等开发及储能和新材料方面实现规模化低成本利用。打通多种能源应用融合,实现生产、消费智能调配,大幅提高能源利用率、降低能耗,基本建成“智能源”管理体系。

按照目前中国能源发展形势,预计一次能源消费或将在2035年前后达到峰值 40×10^8 t油当量,能源供给形势日趋严峻(见图4)。这一阶段煤炭消费总量保持在约 20×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由目前60%降低至2035年50%,仍将是我国能源消费的主体。原油消费量保持总体稳定,控制在 $(6.0\sim 6.5)\times 10^8$ t,

在一次能源中的占比由目前18%降低至2035年15%。天然气作为化石能源向新能源的过渡能源,消费总量将由2018年的 2.5×10^8 t油当量上升至 5.0×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由8%上升至2035年13%。新能源进入快速发展阶段,消费量将由 4.8×10^8 t油当量上升至 9.0×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由15%上升至2035年22%,成为满足能源消费增长的主力。

5.2 第2步(2035—2050年),化石能源与新能源并重发展

该阶段实施“降煤炭、稳油气、增新能源”路径,能源利用效率提高、消费总量下降,降低煤炭、稳定油气和提升新能源供给能力。目标是加快新能源对煤炭的替代,形成煤炭、油气、新能源各占三分之一的“三足鼎立”能源格局,争取实现“能源自主”。该阶段工作重点是“调结构、建氢能、争自主”,加快调整使一次能源消费结构趋于合理,建成绿色“氢能中国”社会,依靠“国内生产+海外权益”模式实现“生产自主”。

该阶段应关注的现实领域包括化石能源革命性突破,氢能源全面工业化,颠覆性技术爆发,“智能源”体系全面建成。煤炭大规模清洁化利用,地下“页岩油改质”与地下“煤炭气化”实现革命与规模化生产。全面完成加油、加气、加氢与充电“四站”一体化布局,参照石油工业模式建成我国“氢工业”体系,形成绿色“氢能中国”社会。在新材料储能、可控核聚变等方面取得颠覆性突破或规模化利用。利用“新能源+智能源”模式,分别侧重能源类型多样化和能源互联智能化,补足化石能源与消费总量之间的缺口,实现生产与消费平衡。

2035年中国一次能源消费达到峰值后,总体或将呈现下降趋势,预计在2050年一次能源消费量将降至 36×10^8 t油当量,为新能源加快对煤炭的替代提供发展机遇(见图4)。这一阶段煤炭消费总量由2035年的 20×10^8 t油当量降至2050年的 13×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由50%降低至2050年的36%,煤炭能源的主体地位将彻底改变。原油消费量继续保持稳定,2050年消费量约 6.5×10^8 t,在一次能源中的占比由15%提高至2035年的18%;天然气消费量总体稳定,2050年消费量 5.5×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由13%上升至2050年的15%。新能源加快发展,消费量将由 9×10^8 t油当量上升至 11×10^8 t油当量,在一次能源中的占比由22%上升至2050年的31%,加快对煤炭消费的替代,成为除煤炭之外的另一主体消费类型。

5.3 第3步(2050—2100年),新能源生产消费占主体地位

该阶段实施“氢能社会、新能源主导、颠覆性技术实现”路径,国内能源需求持续降低并逐步趋于稳

定。煤炭和油气等化石能源消费实现全面降低，产量规模和低廉成本支撑新能源成为能源消费主体。目标是实现能源全部国内生产，力争形成新能源占 70%、化石能源占 30%的“一大一小”能源格局，努力完成“能源独立”。该阶段工作重点是“稳结构、新能源、争独立”，稳固“一大一小”能源消费结构，力争全面实现新能源生产和消费主导地位，依靠“新能源+智能源”在“能源自主”基础之上争取实现“能源独立”。

该阶段应关注的现实领域包括多种类型新能源全面实现低廉规模化应用。太阳能、风能、水能、核能、地热能、生物质能等新能源实现低成本生产，尤其是氢能、可控核聚变、新材料储能等新能源大规模利用。到 2100 年前后，实现化石能源与新能源生产二者地位历史性转换，使新能源成为我国能源结构的主体，力

争形成新能源 70%、化石能源 30%的格局，实现从“一大三小”到“一大一小”能源结构的革命性转型。

在 2050 年一次能源消费 36×10^8 t 油当量的水平上，或将逐步下降至本世纪末期的 30×10^8 t 油当量左右，新能源成为我国一次能源消费的主体（见图 4）。该阶段煤炭消费总量由 2050 年的 13×10^8 t 油当量最终降至 2100 年的 2×10^8 t 油当量左右，在一次能源中的占比由 2050 年的 37%降低至 2100 年的 7%。原油消费量大幅降低，2100 年消费量约 3×10^8 t，在一次能源中的占比由 18%降至 10%。天然气消费逐步下降，2100 年消费量 4×10^8 t 油当量，在一次能源中的占比由 15%降至 13%。新能源加快发展，消费量将由 11×10^8 t 油当量上升至 21×10^8 t 油当量，力争在一次能源中的占比由 31%上升至 70%，构成我国能源消费的主体。

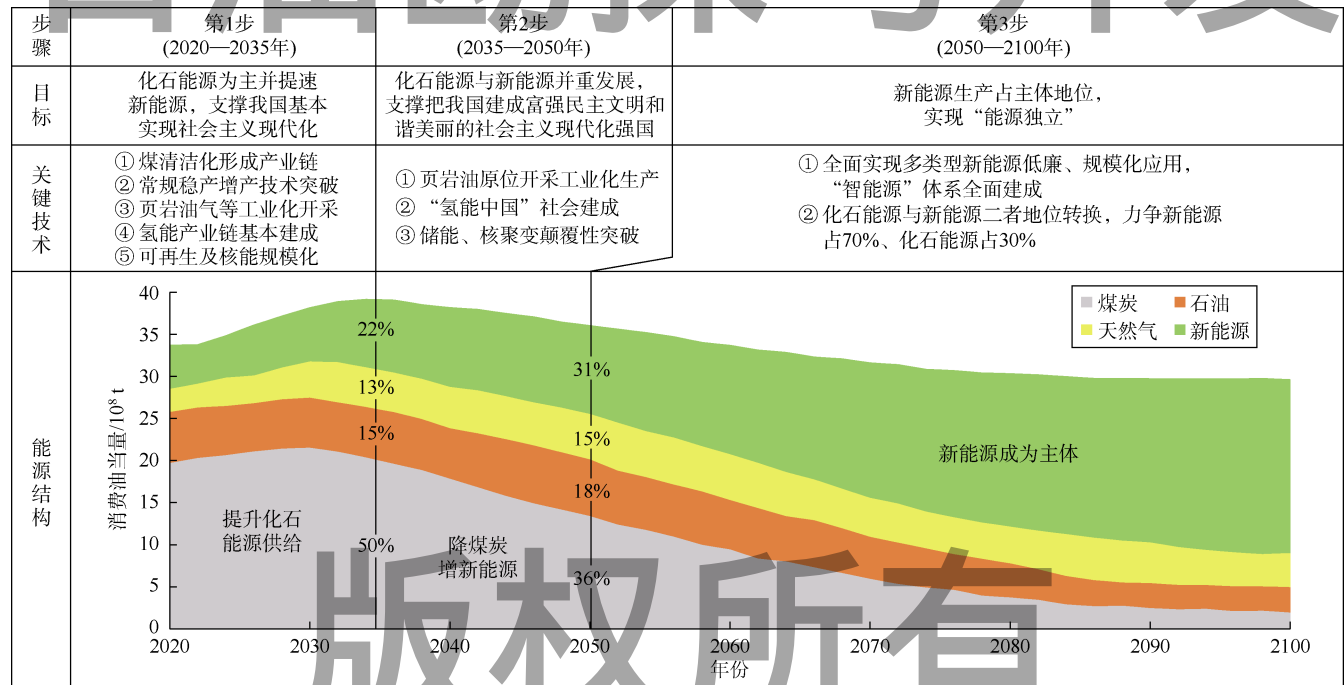


图 4 中国“能源独立”战略路线图及一次能源消费结构预测

6 结论

中国能源发展具有能源消费体量大、资源基础“富煤但油气不足”、油气对外依存度持续攀升的特点，决定了我国能源消费总量大、结构不清洁、供应不安全，不能简单复制美国“能源独立”模式，需因地制宜、因情施策制定符合我国基本国情的“能源独立”战略。

中国能源发展应实施“洁煤稳油增气、大力发展新能源”战略，利用能源需求达峰机遇期调整能源结构，依靠科技、人才、创新推动新能源生产向规模化、低廉化、大众化发展，以“新能源革命”为主导，开启中国“能源独立”长征路，是我国未来能源发展的战略选择。

制定“3 步走”战略：①2020—2035 年，以化石能源为主并提速新能源发展，依靠“洁煤稳油增气、大力提高新能源”实现“供给安全”；②2035—2050 年，实现化石能源与新能源并重发展，依靠“国内生产+海外权益”模式实现“生产自主”；③2050—2100 年，争取以新能源生产消费占主体地位，依靠“新能源+智能源”力争实现“能源独立”。

大力发展新能源有望永久性解决能源安全问题，摆脱能源进口依赖，真正实现国家能源安全和绿色发展，预计到新能源占主体地位时，有望基本实现中国“能源独立”。从传统化石能源向非化石新能源转型是能源发展的必然趋势和必然选择，或许还等不到化石

能源枯竭, 新能源接替就将提前到来。

必须强调指出, 本文提出的中国“能源独立”是个战略命题。应通过在国家层面加强政策规划和科技布局, 用能源科技创新引领和支撑“能源独立”战略。随着国家实力提升, 或许不需要完全自主生产完成形式上的“能源独立”, 也可保障实质上的能源供给安全, 达到“自主可控”与“长治久安”的目标。

参考文献:

- [1] WEEKES-SHACKELFORD V, SHACKELFORD T K, WEEKES-SHACKELFORD V A. Encyclopedia of evolutionary psychological science[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016: 1-4.
- [2] GALIK K, SENUT B, PICKFORD M, et al. External and internal morphology of the BAR 1002/00 Orrorin tugenensis Femur[J]. Science, 2004, 305(5689): 1450.
- [3] SENUT B, PICKFORD M, GOMMERY D, et al. First hominid from the Miocene (Lukeino Formation, Kenya)[J]. Earth and Planetary Science, 2001, 332(2): 137-144.
- [4] 邹才能, 潘松圻, 党刘桂. 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.
- [5] ABELSON P H. Energy independence[J]. Science, 1973, 182(4114): 779.
- [6] EIA. Annual energy outlook[R]. Washington D.C.: U.S. Energy Information Administration, 2019.
- [7] 王婧. 《2012年英国能源改革法案》翻译项目[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
WANG Jing. Translation project for 2012 UK Energy Reform Bill[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [8] LUETHI D, FLOCH M, BEREITER B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present[J]. Nature, 2008, 453(7193): 379-382.
- [9] HARTFIELD G, BLUNDEN J, ARNDT D S. State of the climate in 2017[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(8): 310.
- [10] NOAA. Globally averaged marine surface annual mean data[EB/OL]. (2020-02-08)[2020-02-12]. U.S. National Oceanic & Atmospheric Administration. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_data.html.
- [11] RIPPLE W J, WOLF C, NEWSOME T M, et al. World scientists' warning of a climate emergency[J]. BioScience, 2019, 47(3): 23-27.
- [12] ALBRIGHT R, CALDEIRA L, HOSFELT J, et al. Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification[J]. Nature, 2016, 531(7594): 362-365.
- [13] HERNDON E M. Permafrost slowly exhales methane[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 273-274.
- [14] KNOBLAUCH C, BEER C, LIEBNER S, et al. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 309-312.
- [15] ZEMP M, HUSS M, THIBERT E, et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016[J]. Nature, 2019, 568(7752): 382-386.
- [16] MARZEION B, JAROSCH A H, HOFER M. Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers[J]. The Cryosphere, 2012, 6(6): 1295-1322.
- [17] DMI. Greenland ice loss season 2019 starts with a big melt spike[EB/OL]. (2019-06-18)[2020-02-12]. <http://polarportal.dk/en/news/news/greenland-ice-loss-season-2019-starts-with-a-big-melt-spike/>.
- [18] BP. Statistical review of world energy, 68th edition[R]. London: BP, 2019.
- [19] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [20] YAO L, GARMASH O, BIANCHI F, et al. Atmospheric new particle formation from sulfuric acid and amines in a Chinese megacity[J]. Science, 2018, 361(6399): 278.
- [21] HUANG R J, ZHANG Y L, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, 514(7521): 218-222.
- [22] 油控研究项目课题组. 中国石油消费总量达峰与控制方案研究[R]. 北京: 自然资源保护协会, 2019.
Research Group of China Oil Consumption Cap Plan and Policy Project. Research on China's oil consumption peak and cap plan[R]. Beijing: Natural Resources Defense Council, 2019.
- [23] EIA. International energy outlook 2019 with projections to 2050[R]. Washington D.C.: U.S. Energy Information Administration, 2019.
- [24] 国家统计局. 2019年国民经济运行总体情况[EB/OL]. (2020-01-17)[2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723383.html.
National Bureau of Statistics. National economic operation in 2019[EB/OL]. (2020-01-17)[2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723383.html.
- [25] 公安部. 全国私家车保有量首次突破2亿辆[EB/OL]. (2020-01-08)[2020-02-12]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c6852472/content.html>.
Ministry of Public Security. Number of vehicles on hand in China[EB/OL]. (2020-01-08)[2020-02-12]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c6852472/content.html>.
- [26] 国家统计局. 2019年四季度和全年国内生产总值(GDP)初步核算结果[EB/OL]. (2020-01-18)[2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723591.html.
National Bureau of Statistics. Gross domestic product (GDP) for China in 2019[EB/OL]. (2020-01-18)[2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723591.html.
- [27] 中国煤炭工业协会. 2018煤炭行业发展年度报告[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2019.
China National Coal Association. Annual report on coal industry in 2019[R]. Beijing: China National Coal Association, 2019.
- [28] 邹才能. 新能源[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019: 255.
ZOU Caineng. New Energy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 255.
- [29] 中国氢能联盟. 2018年中国氢气行业产业链、供应及需求分析[EB/OL]. (2019-07-17)[2020-02-12]. <https://www.huaon.com/story/447763>.
China Hydrogen Alliance. Analysis on China hydrogen development: Industrial chain, supply and demand[EB/OL]. (2019-07-17)[2020-02-12]. <https://www.huaon.com/story/447763>.
- [30] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 页岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184.
YANG Zhi, ZOU Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 181-193.

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、新能源与能源战略研究等工作。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: 潘松圻 (1986-), 男, 新疆奎屯人, 博士, 中国石油勘探开发研究院工程师, 主要从事非常规油气地质、油气有机地球化学与能源战略方面研究。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: pansongqi@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-02-12 修回日期: 2020-02-18

(编辑 王晖)