

能源生产革命的若干问题研究

黄其励¹, 袁晴棠², 韩涛³

(1. 国家电网公司, 北京 100088; 2. 中国石油化工集团公司, 北京 100728;

3. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025)

摘要: 坚持节约资源和保护环境, 推动能源生产和消费革命, 是实现我国能源工业可持续发展的重要保障。本文在对我国能源生产现状和世界能源发展趋势分析的基础上, 凝练了我国能源生产革命的若干基本判断, 回答了包括绿色煤炭、石油产量稳定并有增长、天然气产量较大幅度增长、大比例可再生能源、核能、CO₂ 捕集利用与封存 (CCS/CCUS) 和新能源汽车等在内的能源生产革命的内涵和战略思路, 提出了近期、中期、远期的战略目标、重点任务、政策支撑和若干重大建议。

关键词: 能源生产革命; 基本判断; 战略思路; 重点任务; 政策建议

中图分类号: T0 文献标识码: A

Study on Several Issues of Energy Production Revolution

Huang Qili¹, Yuan Qingtang², Han Tao³

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100088, China; 2. China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China; 3. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China)

Abstract: The policies of the resources conservation and environmental protection, as well as the energy production and consumption revolution, are important guarantees for sustainable development of the energy industry. Based on the analysis of China's energy production situation and the world's energy development trend, this paper states the foundation of the energy production revolution, explains the meaning and strategic thinking of energy production revolution, including the green coal, the amount multiplication of petroleum and gas, the renewable energy with large proportion, the nuclear power, CO₂ capture utilization and storage (CCS/CCUS), and the new-energy vehicles. Also, the strategic objectives in the near, medium and long terms, the key tasks, the supporting policies and the major proposals for the energy production revolution have been proposed.

Key words: energy production revolution; basic judgment; strategic objective; key task; policy proposal

一、前言

改革开放以来, 我国能源产业体系不断完善, 供应能力明显提高, 为经济、社会发展提供了可靠支撑。但粗放的经济增长方式和“需求导向”的能源供应模式, 引发了能源安全、生态环境及气候变

化等一系列问题^[1-3]。在国际能源领域处于大调整、大变革和能源经济转型期的形势下, 中国共产党第十八次全国代表大会报告指出, 要坚持节约资源和保护环境的基本国策, 推动能源生产和消费革命, 控制能源消费总量。中央财经领导小组第六次会议也明确提出了“能源消费革命”“能源供给革命”“能

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-11-19

作者简介: 黄其励, 国家电网公司, 顾问, 教授, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事燃煤清洁高效发电、可再生能源发电、节能环保和能源发展战略等研究; E-mail: huangqilispnec@sina.com

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“推动能源生产和消费革命战略研究”(2013-ZD-14)

本刊网址: www.enginsci.cn

源技术革命”“能源体制革命”和“加强国际合作”的能源安全发展战略思想，标志着我国进入了能源生产和消费革命的新时代。本文在分析国际能源发展趋势的基础上，凝练了我国能源生产革命的若干基本判断，提出了能源生产革命的战略思路、战略目标和政策建议，为我国能源工业的可持续发展提供了支撑。

二、能源生产革命方向

（一）国际能源变革与科技创新方向

世界主要发达国家的能源变革总体上朝着清洁、高效、低碳、可持续的方向发展。美国围绕“能源独立”，大力发展非常规能源和可再生能源，保障能源供给和能源安全；欧盟以低碳化为核心实现能源转型，发展低碳经济；日本则大力发展清洁能源技术，提高能源利用效率，优化能源消费结构。

技术创新推动全球能源格局从“化石能源”进入“多元化能源”时代。就生产端而言，非常规油气和可再生能源技术逐步实现大规模应用，全球能源结构加速调整，能源格局向多元化演进；需求侧的电动汽车、输送环节的智能电网和用电侧的电力市场处在市场导入期，可燃冰开发、碳捕集封存等技术有望取得新突破。

纵观国际能源发展，世界能源发展趋势可归纳为：

（1）世界未来能源发展方向是多元化、清洁化、低碳化的；

（2）未来20年化石能源仍将是世界能源的主体（仍将占一次能源的80%左右），实现高碳能源低碳化高效利用是化石能源发展的方向；

（3）石油在全球能源消费结构中的比例将持续下降，天然气比例略有上升，页岩气、致密油等非常规能源将有较大发展，风能、核能等新能源技术将进入快速工业化阶段，低碳、洁净的新能源在全球能源消费结构中的比例将逐步提高。

（二）我国能源生产革命的方向

结合世界能源发展方向，我国能源生产革命的方向为“能源资源保障多元化和安全化、能源生产绿色化和高效化、能源系统信息化和智能化”^[4,5]。

1. 能源资源保障多元化和安全化是中国能源生产革命的基本出发点

面对新的国际能源形势和格局变化，中国应该立足国情，对内推行节能增效，加大油气勘探开发力度，大力发展新能源和可再生能源，建立石油战略储备等政策，建立稳定的国内能源供应体系；对外推行合作与多元化政策，建立可靠的国外能源供应体系，维护国家能源安全，保证我国能源的可持续发展。

2. 能源生产绿色化和高效化是中国能源革命的必由之路

“以煤为主”的能源结构决定了我国能源生产革命必须解决好煤炭的科学开发、清洁低碳利用与转化问题，充分利用好煤炭的能源、资源双功能，发展煤炭分级转化综合利用技术，达到与利用天然气的燃气轮机发电相当的污染物排放标准，大幅提高煤炭用于发电和热电联供的比例，下大力气解决工业锅炉的燃煤效率提升和污染物减排问题，提高煤炭规模化、集约化利用和污染物减排技术水平，实现煤炭工业的绿色发展。大力发展油气开发与炼制对地下水系统、地表生态、大气环境影响的控制技术；大力发展核能、风能、太阳能、水能、地热和生物质能、海洋能等开发利用的环境保护技术。

3. 能源系统信息化和智能化是能源生产革命的核心

能源系统智能化的重点是实现化石能源与非化石能源耦合协调智能化。我国多元化能源供应体系的安全高效运行，需要发展能源开发、输送、分配和利用一体化的智能技术，为能源系统特别是电力的灵活、安全、互补、高效的生产和消费提供技术支撑。智能化是未来能源系统高效协同运行的关键，而储能技术是智能能源系统发展的基础。在能源生产领域，重点是开发智能化发电设备，实现电力生产和并网运行智能化。在能源输送、分配和应用方面，重点是发展智能电网和科学用能，为电力调度、输电、电网和用电安全运行提供支撑。

三、能源生产革命的若干基本判断

从新能源开发利用水平和能源发展潜力来看，我国已基本具备能源生产革命的基础条件。

(一) 煤炭工业可以实现绿色发展

我国 3 000 m 以浅远景预测煤炭资源总量 $1.033\ 40 \times 10^{13}$ t (其中 1 000 m 以浅 $1.438\ 1 \times 10^{12}$ t)。按照目前煤炭开发规模,可以持续稳定地开发 200 年以上,为我国能源稳定供应提供基础保障。通过以安全、绿色、高效、智能开发为核心的技术变革,能够实现科学开采。依靠科技创新,实现燃煤发电达到燃气发电排放标准,大幅提高煤炭用于发电的比例,配合碳捕集技术,降低碳排放量。

(二) 石油稳产并有增长,天然气依靠常规和非常规并重发展,产量有较大幅度增长

我国在石油产量长期保持 2×10^8 t 水平的基础上,可借助全球非常规天然气和页岩气开发的经验,加快我国油气资源的开发利用;发挥“两种资源、两个市场”的作用,到 2050 年实现石油稳产并有增长,天然气产量有较大幅度增长,提高我国能源安全保障能力。

(三) 可再生能源的规模化开发和经济化利用是改变能源结构的决定因素

我国可再生能源资源总量丰富,制造产业发展迅速,可再生能源开发利用成本明显下降,具备大规模开发利用的条件,在保证能源安全、解决环境问题和可持续发展方面具有不可替代的作用,将成为未来的主导能源。

(四) 核电具备规模化发展的基础

目前核电发展处于战略机遇期,基本不存在核资源的制约因素,在安全、科技、装备、运营、厂址、后处理及废物处置方面具备规模化发展的条件。

(五) 新能源汽车发展前景光明

在大力发展新能源汽车的前提下,我国车用能源消耗和污染物排放将在 2030 年将出现拐点;电动汽车发展的关键在于突破动力电池技术,影响新能源汽车推广的三大主要因素是产品、基础设施和商业模式。

(六) CO₂ 捕集利用与封存 (CCS/CCUS) 技术发展空间广阔

目前 CO₂ 捕集利用与封存技术处于研发和示范

阶段,相关技术尚不成熟,能耗和成本较高。我国应立足国情,加快大规模捕集、封存以及 CO₂ 驱油、驱煤层气、化工利用等技术的开发与示范应用,在经济技术条件成熟后推广应用,努力发展具有中国特色的 CO₂ 捕集利用与封存技术。

四、能源生产革命的战略思路和目标

(一) 能源生产革命“两步走”战略

第一步:2030 年前以化石能源的清洁高效利用为主,大力推进绿色煤炭技术变革和油气倍增计划,提高利用效率和清洁度,积极发展新能源与可再生能源并培育相关市场,逐步降低煤炭在能源结构中的占比,改善终端能源结构,有效地提升全社会能源清洁化程度,提高我国能源安全保障程度。2020 年初步构建、2030 年基本形成安全、绿色、智能的能源系统。

第二步:在第一步发展的基础上,依靠科技创新与突破,大规模开发利用新能源与可再生能源,发展储能技术、分布式能源技术和化石能源与非化石能源耦合协同互补的智能技术,大幅度提高非化石能源在能源结构中的比例。同时,持续改进和优化传统化石能源的利用方式和利用技术,全面实现能源安全化、绿色化和智能化,形成煤、油、气、核、可再生能源五足鼎立的多元化能源供应体系^[6]。

(二) 能源生产革命的战略目标

综合考虑合理控制能源消费总量和调整能源结构,基于现有可预期的政策及技术条件,本研究对 2020、2030 和 2050 年我国一次能源生产总量和结构目标进行了预测(见表 1)。

2020 年一次能源供应能力 4.8×10^9 tce (tce 为吨标准煤),其中煤炭产量 2.74×10^9 tce;石油产量 2.2×10^8 toe (折合 3.1×10^8 tce),石油对外依存度控制在 61% 左右;天然气产量约 2.35×10^{11} m³ (折合 3.1×10^8 tce),天然气对外依存度控制在 36% 左右;非化石能源产量 7.9×10^8 tce,占一次能源供应总量的 16.5%。

2030 年一次能源供应能力 5.6×10^9 tce,其中煤炭产量 2.55×10^9 tce;石油产量 2.2×10^8 toe (折合 3.1×10^8 tce),石油对外依存度控制在 63% 左右;天然气产量约 3.5×10^{11} m³ (折合 4.7×10^8 tce),天

表 1 我国能源生产总量和结构目标

能源	2020 年		2030 年		2050 年			
	产量 / $\times 10^8$ tce	比例 /%	产量 / $\times 10^8$ tce	比例 /%	情景 1		情景 2	
					产量 / $\times 10^8$ tce	比例 /%	产量 / $\times 10^8$ tce	比例 /%
国内生产								
煤炭	27.4	57.1	25.5	45.5	20.9	34.8	17.3	28.8
石油	3.1	6.5	3.1	5.5	3.1	5.2	3.1	5.2
天然气	3.1	6.5	4.7	8.4	5.7	9.5	5.7	9.5
核能	1.4	2.9	4.6	8.2	8.8	14.7	8.8	14.7
商品化可再生能源	6.5	13.5	9	16.1	14.3	23.8	17.9	29.8
进口能源	6.5	13.5	9.1	16.3	7.2	12	7.2	12
一次能源供应总量	48	100	56	100	60	100	60	100

注：1. 按 2010 年可比价格计算，国内生产总值（GDP）增速：当前到 2017 年为 6.8%；2018—2020 年为 6.2%；2020—2025 年为 5.5%；2025—2030 年为 5%；2030—2040 年为 4%，2040—2050 年为 3%；2. 按 2010 年可比价格计算，单位国内生产总值能耗：当前到 2017 年为 4.5%；2018—2020 年为 4%；2020—2025 年为 3.7%；2026—2030 年每年下降 3.3%；2030—2040 年为 3.1%；2041—2050 年每年下降 3%；3. 年均发电煤耗：2020 年为 295 gce·(kW·h)⁻¹；2030 年为 290 gce·(kW·h)⁻¹；2050 年为 275 gce·(kW·h)⁻¹。

然气对外依存度控制在 45% 左右；非化石能源 1.36×10⁹ tce，占一次能源供应总量的 24.3%。

2050 年一次能源供应能力 6×10⁹ tce，其中煤炭产量 1.73×10⁹~2.09×10⁹ tce；石油产量 2.2×10⁸ toe（折合 3.1×10⁸ tce），由于生物质制液体燃料和基于可再生能源的新能源汽车的发展，石油对外依存度下降到 52% 左右；考虑海陆过渡相和陆相页岩气、天然气水合物实现重大突破，2050 年天然气产量有望达到 4.3×10¹¹ m³（折合 5.7×10⁸ tce），天然气对外依存度下降到 40% 左右；非化石能源 2.31×10⁹~2.67×10⁹ tce，占一次能源供应总量的 38.5%~44.5%。在可再生能源技术出现重大突破和相关政策配套完善的情况下，2050 年非化石能源有望达到一次能源的半壁江山。

五、能源生产革命的战略重点任务

（一）实施以安全、绿色、高效、智能为核心的煤炭科学开发战略，大力提高煤炭科学产能水平

关闭淘汰一批地质条件极差、煤质品位低、技术落后且极易发生地质灾害和安全事故的矿井；对具备一定基础的中小型矿井进行技术改造，使其符合安全绿色矿井标准，形成科学产能；对于新建矿井，一律采用高标准建设，形成煤炭科学产能。

控制东部、稳定中部、发展西部，实现煤炭开发战略西移：东部地区新井建设控制在 1 000 m 以浅，生产规模下降；中部地区建设接续型新井，淘

汰落后小煤矿，稳定生产规模；西部地区建设与水资源、生态环境容量相适应的煤炭、煤电和煤炭深加工基地。

（二）常规和非常规油气资源开发并重，强化技术攻关与应用，实现石油稳产并有增长、天然气产量较大幅度增长

坚持“油气并重、陆海并重、浅深并重、常规与非常规并重”的原则，加强新区油田勘探开发、大幅度地提高老区油田采收率、加快非常规天然气发展、加速推进海域深水油气勘探开发，依托油气生产技术与生产方式革命，努力实现石油稳产并有增长，天然气产量较大幅度增长。

（三）加快燃煤污染物（包括 PM_{2.5}）综合脱除与资源化利用技术，实现超低排放

加快工业锅炉节能减排改造，大力发展适合我国国情的污染物高效脱除与协同控制技术，发展烟气污染物资源化回收技术，实现燃煤电厂超低排放达到燃气标准和烟气污染物内硫、氮等的资源化回收。

（四）充分利用煤炭能源、资源双功能，实施煤炭高效率、高效益发电和分级、综合利用

以电力生产为核心，煤炭气化为龙头，分级提取利用煤中相应组分及污染物废弃物，生产高附加值产品，大幅降低污染物排放，显著提升煤炭单位

产值综合经济社会效益。

(五) 以占一次能源 30 %~40 % 及以上贡献率为目标, 大比例开发利用可再生能源

根据可再生能源的资源条件和发展潜力, 兼顾生态环境影响, 在综合进行技术、经济和环境论证的基础上, 明确发展战略重点, 积极开发水电, 大力发展风电, 加快发展太阳能发电, 积极发展地热能、生物质能和海洋能。

(六) 发展更先进、更安全的核电技术和核能的多元化利用

实施“安全高效”发展战略, 坚持“战略必争、确保安全、稳步高效、产业协同”的方针, 加快具有自主知识产权的核电国产化机组批量化建设; 探索核能多用途应用; 探索将核能与风能及水电等多种低碳能源有机耦合, 进一步探索将煤等高含碳资源与核能和可再生能源等低碳资源集成, 构建低碳复合能源系统。

(七) 推进低能耗、低成本、规模化 CO₂ 利用存储技术研发与工程示范

我国减排 CO₂ 首先应立足于强化节能降耗和资源化利用, 大力发展新能源和煤炭清洁高效利用技术。CO₂ 捕集利用与封存技术仍处于研发和示范阶段, 重点是发展低能耗、低成本、规模化的 CO₂ 利用存储技术。

(八) 加大新能源汽车技术创新和规模化推广应用

加快动力电池、驱动电机、电子控制三大关键系统和关键部件的技术开发, 加强新能源汽车规模生产、配套设施建设和运营服务体系的构建, 打造完整的新能源汽车产业链。优先发展高端和小型纯电动汽车, 通过技术积累、商业模式探索和市场培育, 突破电动汽车向中档大规模扩展和向普通家庭普及推广。

(九) 加快智能电网技术创新, 实现发电、电网、用电、信息协调发展, 以及能源与信息的高度融合

重点突破大规模间歇式新能源电源并网与储能、智能配用电、大电网智能调度与控制、智能装备等智能电网核心关键技术, 形成具有自主知识产

权的智能电网技术体系和标准体系, 建立较为完善的智能电网产业链, 基本建成以信息化、自动化、互动化为特征的智能电网, 推动我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越。

(十) 加快发展化石能源与非化石能源耦合协调发展的智能化能源系统

积极探索能源耦合优化技术, 努力构建以煤炭为主体、电力为中心, 油气与新能源和可再生能源为支柱的互补、耦合、协同发展的现代化清洁能源系统。通过各类能源资源的整合与优化, 实现不同能源的优势互补, 提高能源系统的智能化利用水平和整体效率及效益。

(十一) 积极发挥能源绿色转型在协同推进新型工业化、城镇化、信息化、农业现代化和绿色化中的作用

坚持节能优先, 以工业、建筑和交通领域为重点, 创新发展方式, 形成节能型生产, 实施煤电升级改造、工业节能和绿色交通行动计划; 坚持集中与分散供能相结合, 大力发展分布式能源, 科学发展热电联产, 鼓励有条件的地区发展热电冷联供, 发展风能、太阳能、生物质能、地热能供暖, 推动信息化、低碳化与城镇化的深度融合, 建设低碳智能城镇; 因地制宜地发展农村可再生能源, 推动非商品能源的清洁高效利用, 加强农村节能工作。

六、推动能源生产革命的政策建议

(1) 启动绿色煤炭国家重大专项, 在控制煤炭消费总量的基础上, 持续提高煤炭科学产能水平; 实施新疆地区煤炭资源勘探与保障、晋陕蒙宁地区煤炭高效开发与生态保护、中东部地区深部煤炭安全开采与生态矿山建设、东北地区褐煤资源绿色开采与高效利用以及西南地区复杂地质条件煤炭安全开采等重大科技创新工程, 形成东、中、西部地区煤炭安全高效绿色开发产业基地, 建立完善的煤炭科学开采技术体系, 使中国煤炭科技(开采技术、安全生产、职业健康、矿区生态、全生命周期污染物减排)达到世界领先水平, 使我国由煤炭大国发展为煤炭强国, 实现中国“煤炭梦”^[7,8]。

(2) 国家制订“非常规油气中长期发展规划”，将海洋深水油气勘探开发上升为国家战略，开展新型提高油气采收率示范工程、海洋深水“蓝海战略”重大科技攻关工程、非常规油气勘探开发示范工程、常规与非常规油气协同开采试验及地面建设标准化应用示范工程，形成松辽盆地、渤海湾盆地石油生产基地，鄂尔多斯、新疆和南海油气生产基地，以及四川盆地天然气生产基地的油气供应基本布局。

(3) 进一步提高煤炭用于大型燃煤发电的比例，大力发展煤炭分级、分质转化和利用技术；以煤炭气化、分级利用为基础，加快工业锅炉技术升级改造；推动煤制天然气技术进步及规模化生产，推进天然气丰富或有条件的地区煤改气，推动全社会污染物协同脱除和资源化回收技术，建设煤炭集中转化与清洁利用重大工程，形成煤炭分级转化、梯级利用与近零排放一体化的重大产业。

(4) 加快推进快堆技术研究和核燃料后处理工程的设计、设备研发，建设大型快堆示范工程和压水堆核电站乏燃料后处理示范工程，形成经济、安全的核能开发与利用重大产业，实现核能规模化和多元化应用。

(5) 建立优先利用可再生能源的体制机制。推进节能发电调度，建立适应可再生能源大规模融入电力系统的新型电力运行机制；建立经济合理的调峰电源辅助服务补偿机制，提高电力系统的整体调节能力；加强电力需求侧管理，在煤炭消费总量控制地区，发展动态可调节负荷管理新模式，与风电等随机性电源相协调。加大可再生能源基础研究和科技创新，加大系列蓄能技术和装备的研发和应用；加快分布式电源的协调发展，加快各级电网建设及智能化，发展分布式微网，大幅度地提高可再生能源在一次能源生产和消费中的比例。

(6) 加大对低能耗、低成本、规模化 CO₂ 利用存储技术的研发，建成百万吨级全流程 CO₂ 利用存储驱油与封存、十万吨级以上 CO₂ 化工利用、CO₂ 养殖微藻生物制油和联产化学品、CO₂ 矿化等示范工程，推进 CO₂ 捕集利用与封存技术与风能、太阳能等新能源的集成耦合，促进相关产业发展。

(7) 引导企业加大新能源汽车研发投入，鼓励建立跨行业的新能源汽车技术发展联盟，大力推进

动力电池技术创新，建设若干国家级整车及零部件研究试验基地和若干具有国际先进水平的工程化平台，构建完善的技术创新基础平台和全产业链技术体系，大幅度地提升产业竞争能力。科学规划新能源汽车和智能电网、基础设施建设，推进新能源汽车运营模式的科学协调发展，真正迎接新能源汽车时代的到来。

(8) 发展以智能电网为核心的能源综合信息网，发挥不同能源发电的优势互补，建立源-荷-网协调、高效发展的大能源体系，提高大能源系统的综合能效和信息化水平。

(9) 加快以降低 PM_{2.5} 为重点的全社会能源生产、输送与消费的技术进步和革命，推进配套工程实施，落实责任体系。

七、结语

未来 20~30 年是我国能源体系的转型期和实现能源生产革命的窗口机遇期。我国能源体系从现在比较粗放、低效、污染、欠安全的能源体系，逐步转型为节约、高效、洁净、多元、安全的现代化能源体系，进入安全、绿色、低碳、智能的能源发展阶段。加强能源体制改革和科技创新，推进能源生产革命，构建国际先进、高效节能、绿色环保、多元互补、安全有保障的智能能源供应体系，是助力我国经济结构转型，确保经济社会长治久安的重要保障。

参考文献

- [1] 任东明, 谢旭轩, 刘坚. 推动我国能源生产和消费革命初析[J]. 专家分析, 2013, 35(10): 6-10.
- [2] 李伟. 我国未来能源发展战略探析[N]. 2014-2-25(第B03版).
- [3] 中国国际经济交流中心课题组. 中国能源生产与消费革命[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.
- [4] 中国能源发展战略研究组. 中国能源发展战略选择(上册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [5] 中国能源发展战略研究组. 中国能源发展战略选择(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [6] 杜祥琬, 周大地. 中国的科学、绿色、低碳能源战略[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 4-10.
- [7] 崔民选. 中国能源发展报告(2011)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2011.
- [8] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011.