

# 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究

“能源领域咨询研究”综合组

**摘要:** 为全面提高煤炭可持续发展能力,实现煤炭开发利用与社会、经济、资源、环境协调发展,2011年中国工程院组织开展“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”重大咨询项目,从煤炭资源、开采、提质、运输、燃烧、发电、多联产、转化、节能、减排的全产业链进行研究。研究论述了煤炭的战略地位与作用,总结分析了煤炭大规模开发利用带来的安全、生态、温室气体排放等一系列严峻问题,提出了我国煤炭清洁高效可持续开发利用战略的思路和目标。明确了我国煤炭“科学开发、全面提质、先进发电、转化升级、输配优化、节能减排、科技创新”的战略举措,为我国研究制订煤炭和能源相关规划和政策提供了科学支撑。

**关键词:** 资源禀赋; 可持续发展; 能源安全; 科学产能; 洁配度; 节能减排; 战略举措

**中图分类号:** TK01      **文献标识码:** A

## Strategic Research on Clean, Efficient, Sustainable Exploitation and Utilization of Coal in China

The Comprehensive Research Group for *Energy Consulting and Research*

**Abstract:** For the purpose of improving the overall sustainable development capacity of coal and realizing the harmonious development on coal utilization, and society, economy, resource and environment, The Chinese Academy of Engineering organized a major consulting project called “Strategic study on clean, efficient, sustainable exploitation and utilization of coal in China” in 2011, which studied the whole coal industrial chain including resource, exploitation, upgrading, transport, combustion, electricity generation, poly-generation, conversion, energy conservation and emission reduction. This paper discusses the strategic position and function of coal, analyzes and summarizes serious problems like security, ecology, greenhouse gas emission caused by massive coal utilization, and proposes the strategic thinking and objectives of clean, efficient, sustainable utilization of coal in China. It also defines strategic measures of “scientific development, overall upgrading, advanced electricity generation, distribution optimization, energy conservation and emission reduction, technical innovation”, which provide scientific support for making plan and policy about coal and energy in China.

**Key words:** resource endowment; sustainable development; energy security; scientific capacity; clean and adaptation digress; energy conservation and emission reduction; strategic measure

### 一、前言

煤炭是我国的主体能源,我国相对富煤缺油少

气,资源禀赋决定了我国只能以煤为主,度过以高耗能为特征的工业化阶段。但煤炭大规模开发利用也带来了安全、生态、温室气体排放等一系列严峻

收稿日期:2015-11-04; 修回日期:2015-11-15

基金项目:中国工程院重大咨询项目“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”(2011-ZD-7); 项目负责人:谢克昌

本文由《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究·综合卷》改写

本刊网址:www.engsci.cn

问题,迫切需要开辟出一条清洁、高效、可持续开发利用煤炭的新道路。

2011年,中国工程院启动了“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”重大咨询项目,根据煤炭行业发展中的重大问题,设立了包括资源、开采、提质、运输、燃烧、发电、多联产、转化、节能、减排10个课题,组织了30位院士、400多位专家进行了全面、深入研究,取得了一些重大研究成果。

## 二、煤炭开发利用面临的形势与挑战

### (一) 煤炭的战略地位与作用

煤炭是我国储量最丰富的化石燃料,占化石能源资源的96%,煤炭生产和消费在一次能源结构中的比例始终保持在70%左右<sup>[1]</sup>,在能源发展中长期居于主体地位。近年来,我国经济快速发展,能源需求持续增加,煤炭生产的快速增长保障了能源供应,为国民经济持续发展和社会正常运转做出了巨大贡献。未来我国能源安全,特别是石油、天然气安全问题日益突出。煤炭不仅可转化为清洁的电力,还可以生产出清洁的气、液体燃料和化学品,符合我国多元化石油替代战略,煤炭的开发利用将继续为国家能源安全提供重要保障。从资源量和开发利用条件等方面综合来看,在未来相当长时期内,煤炭仍将是我国最稳定、最可靠的基础能源。

### (二) 煤炭开发利用面临的挑战

我国是世界上最大的煤炭生产国和进口国,2014年煤炭产量占世界总产量的47%<sup>[2]</sup>,煤炭进口量为 $2.86 \times 10^8$  t<sup>[3]</sup>。煤炭长期大规模开发利用带来了一系列问题。一是煤炭资源开发条件变差。我国53%的煤炭资源埋深在1000 m以下,褐煤和低变质程度烟煤占55%,东部地区煤炭开采向深部延伸,优质煤炭资源逐年减少,开发重心逐步向西部转移。二是煤炭开发引发的生态环境问题日益严重,已成为中西部煤炭开发能力的硬约束。水土流失加剧,土地沙漠化蔓延,风沙灾害频繁,采煤区地表塌陷造成的土地破坏总量已达 $4 \times 10^5$  hm<sup>2</sup> (1 hm<sup>2</sup>=10 000 m<sup>2</sup>)以上,煤矸石堆积量超过 $6 \times 10^9$  t,占地70 000 hm<sup>2</sup>以上。三是煤炭输配不合理。煤炭调运形势紧张,低质煤远距离运输规模大,动力煤质量不稳定,部分煤炭达不到

锅炉设计要求。四是煤炭利用效率低。发电及供热平均综合利用效率仅为40%左右,比发达国家低10个百分点;全国 $5.7 \times 10^5$ 台燃煤工业锅炉实际运行热效率在60%左右,比先进国家低15%~20%;煤炭分散直接燃烧量大。五是环境污染问题严峻。在全国污染物排放总量中,燃煤排放的SO<sub>2</sub>占90%、NO<sub>x</sub>占75%、总悬浮颗粒物占60%、CO<sub>2</sub>占75%。六是煤炭科技创新能力亟待提升。煤炭开采还有许多技术难题需要解决,煤炭高效转化与燃烧还有许多核心技术、工程技术方面的问题需要攻关。

### (三) 煤炭清洁高效可持续开发利用的必要性

近几年,全球气候谈判和围绕低碳技术的竞争日趋激烈,美国、欧盟、日本凭借其以油气为主的能源结构,以及领先的煤炭清洁高效利用技术,积极推行“低碳经济”,对发展中国家施加种种压力。在全球能源低碳化发展潮流引领下,页岩气、致密气、煤层气、页岩油、风能、核能、太阳能、生物质能等非常规能源和新能源的开发利用正悄然地改变着世界能源格局。然而,新能源和可再生能源需要与传统能源统筹规划,能源结构升级和能源替代问题需要循序渐进。因此,能源生产和消费革命不能简单理解为“革煤炭的命”,能源革命不只针对煤炭,后煤时代尚早,“去煤化”不可取。在“低碳经济”背景下,我国能源发展方式不能简单模仿国外经验,要从国家战略利益和能源安全方面考虑,加快培育具有核心自主知识产权的煤炭清洁高效技术和产业,赢得发展主动权。

## 三、煤炭清洁高效可持续开发利用的战略思路和目标

### (一) 战略思路

全面实施“科学开发、全面提质、先进发电、转化升级、输配优化、节能减排、科技创新”战略,推进煤炭生产由以需定产向科学开发方式转变,推进煤炭粗放供应向对口消费转变,推进燃煤发电局部领先向整体节能环保转变,推进传统煤化工向现代煤化工转变,推进长距离输煤输电独立发展向协同发展优化输配转变,推进煤炭开发利用向技术、结构、管理综合节能减排方式转变,推进煤炭产业

发展由资金和资源推动向以技术创新驱动为主的方式转变,逐步实现煤炭开发利用方式的清洁化、高效化,全面提高煤炭可持续发展能力,实现煤炭开发利用与社会、经济、资源、环境协调发展,增强我国能源安全保障水平,支撑我国经济社会可持续发展。

## (二) 战略目标

表 1 展示了我国煤炭清洁高效可持续开发利用的战略目标。到 2020 年,煤炭科学开发模式基本形成,清洁高效的煤炭消费模式初步建立,煤炭清洁高效开发利用水平明显提高,与煤炭相关的环境污染问题得到明显控制,煤矿矿区生态环境基本改善,煤炭清洁高效利用技术支撑体系得到明显加强,初步形成煤炭可持续发展的局面。国内煤炭开采量控制在  $4.5 \times 10^9$  t 以内,煤炭科学产能达到  $3.2 \times 10^9$  t,煤炭系统整体效率达到 50%,燃煤  $\text{SO}_2$  排放量控制在  $1.315 \times 10^7$  t 以内,燃煤  $\text{NO}_x$  排放量控制在  $1.065 \times 10^7$  t 以内。

表 1 我国煤炭清洁高效可持续开发利用的战略目标

目标	数量指标	2020 年	2030 年
清洁	燃煤 $\text{SO}_2$ 排放量/ $\times 10^4$ t	<1 315	<960
	燃煤 $\text{NO}_x$ 排放量/ $\times 10^4$ t	<1 065	<760
	燃煤烟尘排放量/ $\times 10^4$ t	<465	<360
	燃煤 Hg 排放量/t	<229	<159
高效	平均供电煤耗/ $\text{gce} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	<320	<310
	煤炭开发利用综合能效/%	>50	>52
可持续	煤炭消费量控制目标/ $\times 10^8$ t	<49	<50
	煤炭开发量控制目标/ $\times 10^8$ t	<45	<45
	科学产能/ $\times 10^8$ t	>32	>39
	科学产能比重/%	>70	>85

注:煤炭开发利用综合能效是指综合国内煤炭平均开采提质能效(不考虑回采率)、煤炭平均输送能效(主要考虑平均铁路输煤能效)和煤炭平均利用能效(考虑煤炭利用各行业消费比例和行业平均生产能效的加权平均能效)的折算能效。

到 2030 年,全面形成煤炭科学开发模式和清洁高效的煤炭消费模式,煤炭清洁高效利用技术达到国际先进水平,形成中国特色的煤炭清洁高效利用体系,全面形成煤炭可持续发展的局面。国内煤炭开采量控制在  $4.5 \times 10^9$  t 以内,煤炭科学产能达到  $3.9 \times 10^9$  t,煤炭系统整体效率达到 52%,燃煤  $\text{SO}_2$  排放量控制在  $9.6 \times 10^6$  t 以内,燃煤  $\text{NO}_x$  排放量控制在  $7.6 \times 10^6$  t 以内。

## 四、煤炭清洁高效可持续开发利用的战略措施

### (一) 科学开发

近年来,受地质条件、技术装备、开发投入等因素制约,我国煤炭开发的安全、效率、环境问题比较突出。项目组以生产安全度、生产绿色度和机械化程度为主要指标,研究评价了我国煤炭科学产能,结果表明,2010 年我国科学产能  $1.08 \times 10^9$  t,仅占煤炭总产能的 1/3 左右。其中,晋陕蒙宁地区、华东地区、东北地区、华南地区和新青区分别为  $6.48 \times 10^8$  t、 $3.3 \times 10^8$  t、 $0.55 \times 10^8$  t、 $0.2 \times 10^8$  t 和  $0.25 \times 10^8$  t,占各区现有产能的 35%、51%、28%、4% 和 25%。通过加大投入、强化政策和采用新技术新装备,到 2030 年,我国煤炭科学产能可达  $3.3 \times 10^9$  t 左右,其中,晋陕蒙宁地区、华东地区、东北地区、华南地区和新青区分别为  $1.99 \times 10^9$  t、 $3.1 \times 10^8$  t、 $1.3 \times 10^8$  t、 $0.5 \times 10^8$  t 和  $8.5 \times 10^8$  t。

大力推进煤炭科学开发,应建立科学产能综合评价指标体系,全面推进以煤炭安全、绿色、高效开采为目标,提升科学产能比例。按照“符合标准准予开采,新建矿井达标建设,不达标升级改造,不可改造强制退出”的思路,煤炭开发总量控制在  $4.5 \times 10^9$  t 以内。保持现有 1/3 达到科学产能标准的矿井,改造 1/3 未达标矿井,逐步淘汰 1/3 落后和不可改造产能。到 2020 年,科学产能达到  $3.2 \times 10^9$  t,比重达到 70%。到 2030 年,科学产能达到  $3.9 \times 10^9$  t,比重达到 85%。按照“保护与减轻东部,稳定开发中部,加快开发西部”原则,大幅增加晋陕蒙宁甘地区科学产能,推进新青区煤炭科学开发,加快东北地区中小煤矿整合改造,推进华南地区煤炭安全开发。坚持煤炭丰富地区优先发展的原则,统筹考虑煤炭资源、水资源、环境条件、煤炭需求、区域经济发展等因素,加强煤炭产业基地建设。在宁夏宁东、内蒙古鄂尔多斯和陕西榆林能源“金三角”地区,稳步推进大型煤炭基地、火电基地和煤化工产业基地建设。在新疆地区,加快煤炭科学开发,优先发展以煤制油、煤制天然气、煤制烯烃等高载能产品为目标的煤炭深加工。在西南地区,大力推进煤炭安全开发,实施保护性限采措施,控制新建煤化工项目,推进基地化发展。

## （二）全面提质

我国煤炭对口配送方式相对粗放，严重影响煤炭综合效率。把煤炭全面提质、按质使用相结合，以最简单的方式、最少的投入、最有效的措施提高煤炭利用效率，减少无效运输，减少污染物排放。项目组研究提出的煤炭洁配度由洁净化度和适配度构成，是表征煤炭提质与减排的综合评价指标，反映了通过煤炭洗选、配煤等提质加工技术，去除杂质，提升和稳定煤炭质量、满足用煤设备煤质要求的程度。从煤炭质量控制角度引入煤炭洁配度，设置煤炭洁配度标准，实现煤炭的分质、分级利用，有利于促进煤炭清洁高效利用。研究表明：每亿吨标准煤洁配度提高1个百分点，年可节约能量 $1.7 \times 10^5$  tce (tce为吨标准煤)，减排 $\text{SO}_2$ 约 $1.1 \times 10^4$  t，减排 $\text{CO}_2$ 约 $3.8 \times 10^5$  t。

全面提高煤炭供应质量，应建立煤炭洁配度指标体系，制订煤炭产品准入标准，规范煤炭生产、输配、转化和利用过程中的商品煤质量，积极发展先进适用的煤炭提质加工技术，推进煤炭提质与配煤由低提质率、粗放式配煤向全面提质、对口消费方式转变。推进就近利用褐煤的干燥提质技术应用，突破褐煤低温热解技术，形成褐煤热解、半焦利用、煤焦油深度加工、煤气利用的一体化工程技术，解决褐煤热解提质后大规模跨区运输和综合利用难题。全面提升煤炭洁配度水平，推进煤炭的分质、分级利用，最大限度提高煤炭利用效率，减少煤炭生产和利用过程中的环境污染。力争到2020年原煤入洗率达到70%，电力用煤比例达到55%以上，洁配度达到42%；2030年，原煤入洗率达到80%，电力用煤比例达到60%以上，洁配度达到54%。

## （三）先进发电

近年来，随着大型电力设备制造水平的快速提升以及上大压小政策的落实，火电机组可靠性和效率显著提高。随着火电行业高参数、大型化发展，我国600 MW及以上机组所占比例快速增加，已达36.8%，火电年运行平均供电煤耗由2005年的 $370 \text{ gce} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 下降到2014年的 $318 \text{ gce} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ <sup>[3]</sup>。目前，我国已拥有世界上装机最多、技术最先进的百万千瓦火电机组，有的机组供电煤耗指标已经达到世界最高水平，但整体而言，低容量、低参数锅炉比例仍然偏高，还应进一步优化火电结

构，建设高参数、大容量机组。从能量转换效率、环境影响和投资成本等方面分析，超超临界、循环流化床、整体煤气化联合循环（IGCC）和分级转化等发电技术各具优势，要因地制宜、统筹发展。

整体提升煤炭发电水平，应继续加大超超临界燃煤机组比重，积极推广超临界循环流化床锅炉，积极推广热电联产，科学规划和建设大容量热电机组，逐步淘汰亚临界以下低参数小机组。大力推进清洁高效煤炭发电技术研发和工程示范，积极开发二次再热和700℃超超临界机组。加快发展煤炭发电污染控制技术和温室气体减排技术，积极推进资源化环保技术和多种污染物联合处理新技术的研发和应用，不断降低 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、细颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）和重金属等污染物排放量。到2020年，超超临界燃机组比重超过40%，燃煤火电机组平均供电煤耗 $300 \text{ gce} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。到2030年，超超临界燃机组比重达到60%，平均供电煤耗 $290 \text{ gce} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

## （四）转化升级

我国已拥有和掌握了一批自主知识产权的现代煤化工核心技术，通过煤直接液化、煤间接液化、煤制烯烃、煤制乙二醇和煤制天然气示范工程建设和运行，使我国现代煤化工步入国际领先水平。随着几个大型示范项目相继投入商业化运行，证明以生产高附加值产品为目标的现代煤化工，能源效率高于常规煤直接燃烧，可实现低污染物排放，有相当的经济竞争力。无论从能源安全的角度、还是从油气和化工品的需求，都需要发展现代煤化工。煤基多联产技术是在现代煤化工和整体煤气化联合循环发电等单产技术发展的基础上，通过有机耦合煤化工和联合循环发电流程，实现电力、洁净燃料和化工产品经济、高效、清洁联合生产。多联产技术为煤炭高效、清洁、低碳及多用途利用提供了重要途径，应作为我国煤炭利用技术的重点发展方向。

有序推进煤炭转化升级，应按照“自主创新，重点突破，合理布局，多元发展”原则，稳步推动煤炭转化产业发展重点由生产低附加值的传统煤化工产品向以生产石油替代产品为主的现代煤化工方向转变，满足国内日益增长的对石油和化工产品的需求，多元化缓解国内石油供需矛盾。积极推进以煤炭清洁高效转化利用为目标的现代煤化工技术和多联产系统的研发和示范，合理规划煤化工产业发

展布局和产品规模建设,推动煤化工规模化、大型化、一体化、基地化建设,确保产业有序发展。力争通过发展煤基石油替代产品,将我国石油对外依存度保持在 60% 左右。

### (五) 输配优化

我国煤炭生产与消费格局决定了必须对煤炭进行大规模、长距离调运,随着煤炭生产重心的进一步西移,产消矛盾将更加突出。煤炭作为一种可以转化的资源,主要有两种调运方式:一是煤炭直接外输;二是煤炭就地转化,以电能等形式外输。从能耗看,1 500~1 800 km 是临界距离,超过临界距离,输煤优于输电。从水资源占用的角度考虑,西部煤炭主产区大多缺水,输煤一般要优于输电。从安全角度看,输电与输煤并举是最佳选择。

统筹优化煤炭输运模式,应坚持输煤输电并举、“低质煤本地消费、优质煤远距离输配”和“提质后输配”的原则,统筹煤炭和电力调运布局,推进煤炭能源运输由长距离输煤、输电独立发展向优化输配方式转变,加快提高煤炭主产区的铁路外运能力,在内蒙古、新疆等区域建设一定容量的燃煤发电、远距离输电外送,新疆地区远期输煤为主,近期加紧发展输电。在条件适宜地区,可以考虑煤就地转化为油气后外输。力争到 2020 年,主产区输煤、输电比重由 2010 年的 7.6:1 调整到 3:1 ~ 5:1。

### (六) 节能减排

近年来,通过实施一系列节能降耗、淘汰高耗能设备等措施,钢铁、建材、化工等主要用煤行业的煤炭利用效率有所提升,但与世界先进水平相比还有较大差距。能效低的传统分散用煤技术与设备依然大量存在。发展先进的煤炭清洁高效利用技术是重点用煤行业节能减排的最佳手段,而节能减排又是各行业发展煤炭清洁高效利用技术的推进剂。

强化煤炭行业节能减排,应树立以节能为本的理念,以加快转变煤炭开发利用方式为主题,从技术、结构和管理三方面深挖重点耗煤行业节能减排潜力。通过“倒逼机制”,控制煤炭消费总量,调整煤炭消费结构,开发高效清洁煤炭开发利用技术,推进重点耗煤行业节能减排。在煤炭消费强度高、大气污染严重的区域,强化区域煤炭消费总量控制。积极推进电力、钢铁、建材、化工、有色金属、造

纸和纺织等高煤耗行业的低成本、低能耗和低排放生产,深挖节能减排潜力。高度重视煤炭利用污染物控制和碳减排问题,加强碳减排技术及其他污染控制技术开发和应用。

### (七) 科技创新

能源科技创新与发展是抢占世界能源领域制高点的重要手段。三十多年的改革开放,我国走过了西方发达国家 200 年的工业化历程,煤炭开发利用技术取得重要进展,在煤炭开发、燃煤发电和煤炭转化等领域取得了一批重大成果。但当前我国技术创新能力仍显不足,燃气轮机等核心技术和关键装备与国外差距较大。

增强煤炭科技创新能力,应加快建立煤炭清洁高效可持续发展科技支撑体系,争取在 10~20 年内使我国煤炭科技自主创新能力和技术装备达到世界先进水平。实施煤炭清洁高效开发利用重大工程,重点突破煤炭资源勘查、安全高效绿色开发、煤炭提质、先进煤炭燃烧技术和气化、现代煤化工、先进输电、煤炭污染控制、节能等一批核心技术,着力突破一批重大成套装备。积极跟踪世界煤炭技术进展,大力加强国际煤炭技术合作交流,促进新技术的集成优化。

## 五、结语

能源资源禀赋特点决定了煤炭在我国国民经济中的战略主导地位,实现煤炭清洁高效可持续开发利用是建成资源节约型和环境友好型社会的必经之路。坚持技术进步,科学控制煤炭开采总量和能源的消耗总量,积极推进煤炭清洁高效可持续开发利用,实现煤炭与其他传统化石能源、可再生能源和清洁能源的协调发展,我国一定能以煤为主体的化石能源为支撑,走上新型工业化道路,建成生产发展、生活富裕、生态文明的现代化国家。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2014 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] BP Company. BP statistical review of world energy June 2015 [EB/OL]. [2015-10-20]. <http://www.bp.com/statisticalreview>.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 2014 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2015-10-20]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799.html).