

# 生态文明背景下我国能源发展与变革分析

杜祥琬<sup>1</sup>, 呼和涛力<sup>2</sup>, 田智宇<sup>3</sup>, 袁浩然<sup>2</sup>, 赵丹丹<sup>2</sup>, 陈勇<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院, 四川绵阳 621900; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 3. 国家发展和改革委员会能源研究所, 北京 100038)

**摘要:** 能源是人类社会文明演进的前提和基础, 能源发展是生态文明建设的重要组成部分, 能源生产利用方式的变革创新是经济社会转型升级的关键。本文阐述了生态文明与能源变革的社会作用, 分析了我国能源发展与发达国家之间的差距及存在问题, 并根据未来国际能源发展总体趋势, 阐述了我国能源发展面临的挑战和机遇。结合能源需求预测分析, 指出我国能源变革的必要性, 为我国生态文明建设与能源发展和变革提供战略决策及参考依据。

**关键词:** 生态文明; 能源变革; 发展模式; 能源技术; 能源战略

**中图分类号:** TK01      **文献标识码:** A

## Analysis of China's Energy Development and Transformation in the Context of Ecological Civilization

Du Xiangwan<sup>1</sup>, Huhetaoli<sup>2</sup>, Tian Zhiyu<sup>3</sup>, Yuan Haoran<sup>2</sup>, Zhao Dandan<sup>2</sup>, Chen Yong<sup>2</sup>

(1. China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Energy Research Institute, National Development and Reform Commission, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Energy is the premise and foundation for the evolution of human society civilization, and its development plays an important role in ecological civilization construction. Meanwhile, the innovation of energy production and utilization modes are also the keys to economic and social transformation and upgrading. This research states the social function of ecological civilization and energy innovation, and analyzes the gap in energy development between China and the developed countries and the problems. Furthermore, the challenges and opportunities faced by China's energy development are summarized on basis of the general developing trend of future world energy. Along with the analysis on energy demand forecast, the necessity of China's energy transformation is clearly stated to provide fundamental references for strategic decision-making in China's ecological civilization construction and energy development and transformation.

**Key words:** ecological civilization; energy transformation; development model; energy technology; energy strategy

**收稿日期:** 2015-08-26; **修回日期:** 2015-08-30

**作者简介:** 杜祥琬, 中国工程物理研究院, 高级科学顾问, 中国工程院院士, 主要从事应用物理与强激光技术和能源研究;

E-mail: duxw@cae.cn

**基金项目:** 中国工程院重大咨询项目“生态文明建设若干战略问题研究”(2013-ZD-11)

**本刊网址:** www.enginsci.cn

## 一、前言

我国经过三十多年的经济高速发展,一方面创造了大量的社会物质财富,另一方面也造成了巨大的资源、能源消耗,以及大气、土壤和水质的污染,导致生态环境问题日趋严重,亟待进行生态文明建设。能源是推动经济和社会持续发展的主要动力,能源生产利用方式的变革创新是经济社会转型升级的关键。生态文明背景下的能源革命可简单归结为:逐步告别“黑色、高碳”,向“绿色、低碳”转变,由“粗放、低效”向“节约、高效”转变。

## 二、生态文明与能源变革的社会作用

### (一) 生态文明建设符合人类社会客观规律

建设生态文明为统筹人与自然和谐发展指明了前进方向。随着社会主义现代化建设实践和认识的不断深化,建设生态文明为实现人与自然和谐、均衡发展指明了路径,在这一战略思想指导下,我国扎实推进节能减排、生态建设和环境保护,全面实施绿化生态工程,单位国内生产总值能耗持续下降,完成污染物减排指标任务,为促进绿色增长、推动可持续发展打下了可靠基础。

推进生态文明建设是党和政府积极主动顺应广大人民群众新时期进行的重大部署。推进生态文明建设是我们党坚持以人为本、执政为民,维护广大人民群众根本利益特别是环境权益的集中体现。随着经济社会的快速发展,人民群众对干净的水、新鲜的空气、安全的食品、优美宜居的环境等方面要求越来越高。建设生态文明,为人民群众创造良好生产生活环境,不仅是改善民生的需要,也是深化我国现代化建设的重要内容。

走出一条中国特色生态文明建设道路符合人类社会发展的客观规律。深刻反思传统工业文明发展模式的不足,认真总结落实科学发展、转变经济发展方式的实践经验,从经济、政治、文化、社会、科技等领域全方位审视和应对人类社会面临的资源、环境方面的严峻挑战,致力于在更高层次上实现人与自然、环境与经济、人与社会的和谐,为增强我国可持续发展能力提供了更科学的理念和方法论,也符合当今世界发展新趋向。

### (二) 能源变革促进社会发展

图1显示美国能源消费模式发展和世界人均国内生产总值的发展历程。在美国成立之时,传统的美国家庭通常使用木材作为主要的能源来源,早期的工业动力来源于水利。到19世纪后期煤炭逐渐成为主要的能源来源,此时世界的人均国内生产总值开始腾飞,能源消费的增加推动经济社会得到了高速发展。到20世纪中期,石油的使用量超过了煤炭,与此同时天然气作为能源使用量迅速增加。自20世纪后期以来,核能发展迅速,同时在火电快速发展带动下,煤炭的使用量再次增加。经历了20世纪70年代的消费低谷后,美国的石油和天然气消费量恢复增长,直到20世纪末期美国的能源消费模式一直保持稳定的格局。纵观美国的能源发展历史,其能源总量和结构不断发生变化,促进了经济社会的发展和结构的不断升级。

## 三、我国能源发展存在的问题

### (一) 人均资源相对不足

我国是世界上人口最多的国家,2011年达到13.5亿,占全世界总人口的19.3%<sup>[2]</sup>。人口数量众多,

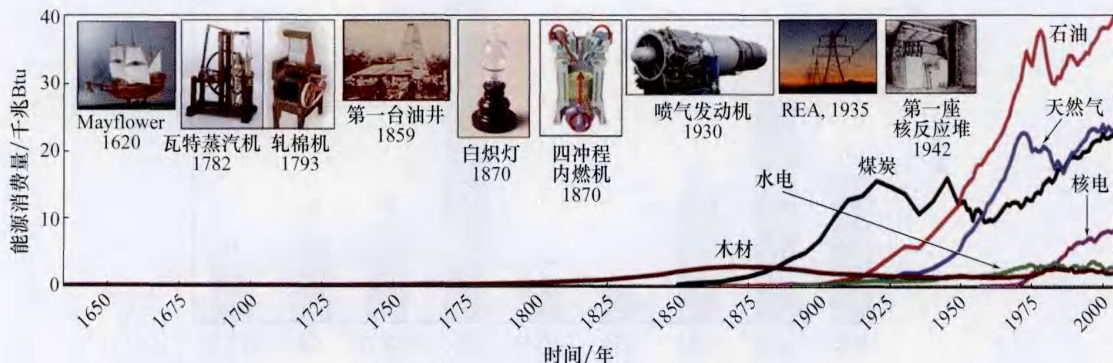


图1 美国能源消费情况<sup>[1]</sup> (1 Btu=1.06 kJ)

既是推动我国经济发展、社会进步的重要因素，也对资源保障、生态环境带来了较大压力。从主要资源人均保有量看（见图 2），2011 年，我国人均淡水、耕地保有量分别只有世界平均水平的 28%、43%；煤炭剩余探明可采储量总量虽然居世界第三位，但人均水平只有全球平均水平的 63%；石油、天然气等优质化石能源储量较低，已探明可供采储量仅占世界的 1.1% 和 1.9%，人均水平分别只有全球平均水平的 7.7% 和 7.1%；铁矿石、铜、铝土矿等重要资源产品人均保有量也都远远低于全球平均水平<sup>[2,3]</sup>。

今后相当长一段时期，我国人口还将维持缓慢增长态势。根据联合国报告预测结果<sup>[4]</sup>，我国人口 2020 年将达到 14.33 亿，2030 年将达到人口峰值，为 14.53 亿。2030 年之后，我国人口将出现缓慢下降趋势，但 2040 年和 2050 年仍分别高达 14.35 亿和 13.85 亿。近期，伴随我国逐步放开计划生育政策，未来人口峰值可能超过 15 亿。在人口缓慢增长进程中，我国人口结构逐渐发生重大变化，2012 年劳动年龄人口数量首次出现下降，“人口红利”优势或将很快消失，面临“未富先老”的风险。未来，随着收入水平的普遍提升，十几亿规模的人口一旦开始增加能源消费，资源稀缺性将逐渐显现。

## （二）能源资源禀赋较差

受资源禀赋、发展水平等因素影响，长期以来，我国基本形成了“以煤为主”的能源生产和利用结构，煤炭在能源消费总量和增量中占绝对地位，与发达国家存在显著差距。1990—2012 年，我国煤炭消费增长  $1.95 \times 10^9$  tce (tce 为吨标准煤)，占全球煤

炭消费增量的 89.8%<sup>[5,6]</sup>。2012 年，煤炭在我国一次能源消费中的比重高达 66.6%<sup>[2]</sup>，不仅明显高于美国、日本、欧洲联盟等发达国家水平，也高于印度、巴西、墨西哥等发展中国家水平（见图 3）。煤炭消费总量过大、比重过高、增长过快，是造成我国能源利用效率低下、环境污染加剧、温室气体排放数量攀升、生态破坏和安全生产压力突出的重要原因。虽然“十一五”以来，我国加快了清洁、低碳能源发展力度，但截至 2012 年，水电、核电、风电在我国一次能源消费中的比重仅有 9.4%，仍远低于发达国家水平。

能源消费持续过快增长，对我国能源和经济安全带来严峻挑战。由于我国石油、天然气等优质化石能源储量有限，新增需求主要依靠进口满足，面临的能源安全挑战不断加剧。2012 年，我国进口石油  $2.8 \times 10^8$  t，对外依存度达 58.7%；进口煤炭  $2.9 \times 10^8$  t，已经是世界第一煤炭进口大国；进口天然气大量增加，对外依存度超过 31%。随着美国等发达国家石油消费进入高位趋稳和缓慢下降阶段，我国很快将成为世界第一石油进口大国，在全球石油市场震荡起伏的背景下，我国面临的经济安全、金融风险更加严峻。

## （三）环境容量非常有限

受长期粗放型增长方式驱动，我国主要污染物排放量迅速增长，远远超过环境容量，环境污染呈明显的结构型、压缩型、复合型特点，各类型污染事故频发，已经进入环境问题集中爆发阶段。大气质量方面，空气污染呈现由局地向区域蔓延、细颗粒物和臭氧等新型污染物影响显现、酸雨污染加重

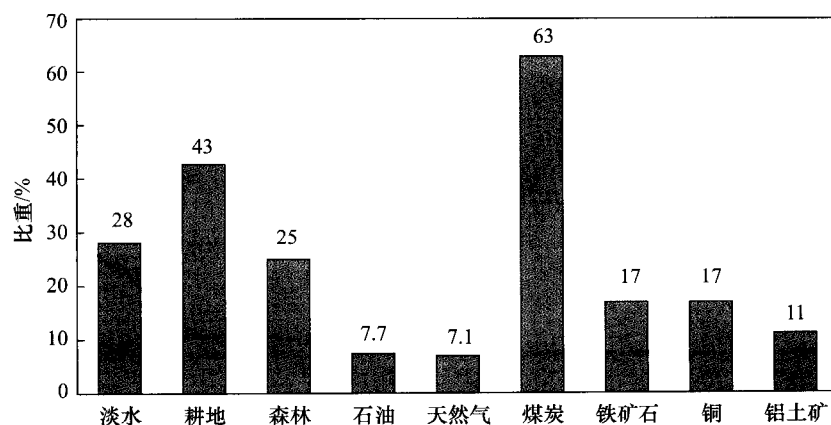


图 2 我国主要资源人均保有量占世界平均水平比重<sup>[2,3]</sup>



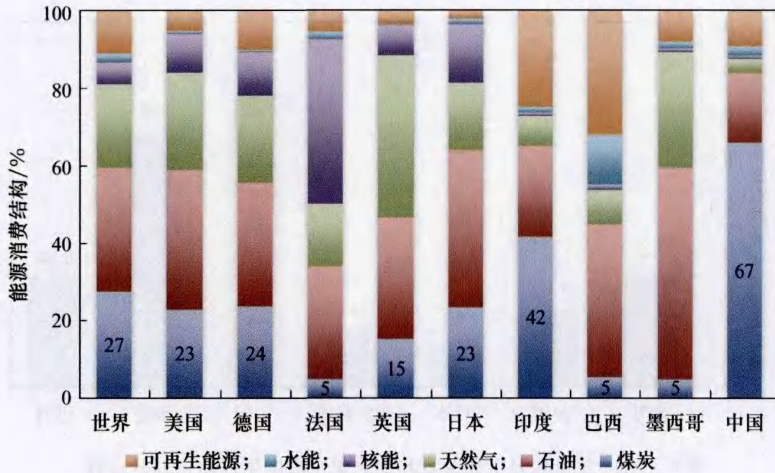


图3 世界主要国家一次能源消费结构比较<sup>[5,6]</sup>

蔓延、有毒有害废气治理滞后等特点，区域环境空气质量不断恶化。水环境方面，全国地表水整体为轻度污染，地下水处于较差、极差级别的过半。生态环境方面，全国水土流失面积占国土总面积的37%，荒漠化土地面积占国土总面积的27%，全国90%的草原出现退化。

与发达国家相比，我国人口相对密集、能源特别是煤炭消费强度过大，进一步限制了未来能源消费的增长空间。2011年，我国煤炭消费总量达 $2.776 \times 10^9$  tce，占全世界的50.5%，分别是美国、欧洲联盟、日本的4倍、7倍、18倍<sup>[7]</sup>。从单位国土面积煤炭消费量看，我国煤炭消费强度分别是美国、欧洲联盟的4.0倍、3.1倍（见图4）。

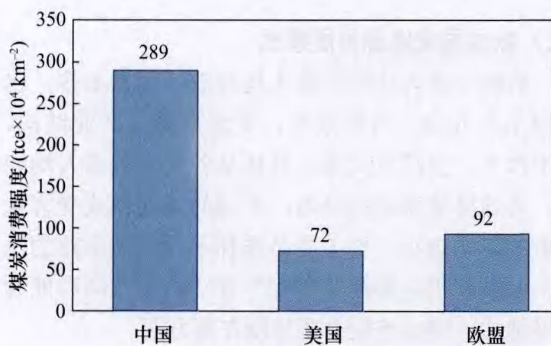


图4 世界主要国家和地区煤炭消费强度比较

在大力治理雾霾、加快生态文明建设背景下，我国面临的生态环境约束更加严峻，实际的煤炭消费增长空间非常有限。

#### （四）能源利用效率低下

受产业结构不合理、技术水平落后等因素影响，我国整体能源利用水平明显偏低。“十一五”时期，通过强化节能减排政策，我国单位国内生产总值能耗累计下降了19.1%，降幅在全球居于前列，但与发达国家甚至部分发展中国家的差距依然明显。按照市场汇率计算<sup>[5,6]</sup>，2011年，我国单位国内生产总值能耗水平是世界平均水平的2.5倍，是发达国家水平的3~7倍，还远高于印度、巴西等发展中国家水平（见图5）。

单位国内生产总值能耗水平过高是我国当前经济发展方式粗放、资源环境代价过大的集中体现。如果延续目前粗放型发展方式，我国将会面临能源供应难以支撑的严峻挑战。研究表明<sup>[8]</sup>，我国满足安全高效生产条件的煤炭“科学产能”能力目前只有十几吨，未来上限只有约 $2.9 \times 10^9$  tce，中长期国内石油稳定产量仅有 $2 \times 10^8$  t左右，常规天然气合理开发上限规模仅 $2.5 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>，水能、风能、太阳能等可再生能源普遍存在资源条件、市场竞争力、系统消纳能力等多方面制约，各种能源供应能力大规模扩张的空间都非常有限。加之受生态环境、全球气候变化、能源安全等因素制约，我国继续依靠规模扩张的传统能源和经济发展道路亟待加快转变。

### 四、我国能源发展面临的国际形势

#### （一）能源资源竞争日趋激烈

发达国家能源消费基本饱和，新兴发展中国家

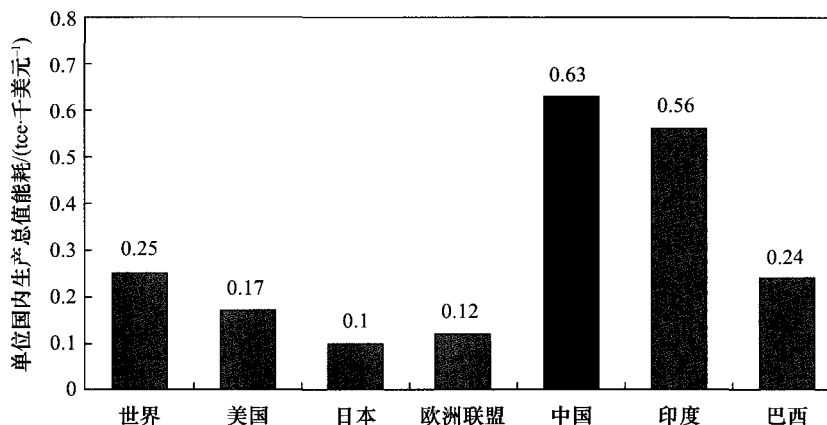


图 5 2011 年世界及主要国家和地区单位国内生产总值能耗比较

成为能源消费增长的主体。1990—2011 年，全球一次能源需求增长  $4.17 \times 10^9$  toe，其中，经济合作与发展组织国家（OECD）占 21.5%，非经济合作与发展组织国家占 78.5%，中国占全球能源消费增长的 46.8%。2000—2011 年，全球一次能源需求增长  $2.92 \times 10^9$  toe (1 toe=41.87 MT)，其中，非经济合作与发展组织国家占 96.8%，中国占全球能源消费增长的 54.9%<sup>[9]</sup>。未来相当长时期，伴随金融危机后发达国家需求出现收缩型调整，以及各国加大应对气候变化的努力，发达国家整体能源需求将趋于稳定甚至出现下降趋势，中国、印度等发展中国家在全球能源消费增长中的地位更加突出，各国趋向于能源结构的优化，加快低碳、清洁能源发展。发达国家积极发展天然气、风能、太阳能等低碳、清洁能源，推行碳排放交易，推动能源结构显著优化，强化其经济竞争优势。欧洲联盟制定了 2020 年能源战略，启动战略性能源技术计划，着力发展可再生能源，减少对化石能源的依赖。1990—2011 年，经济合作与发展组织国家风能、太阳能等非水可再生能源消费量增长了 501%<sup>[9]</sup>，成为满足新增能源需求的主要来源。2011 年，核能、水能、可再生能源占经济合作与发展组织国家能源消费的比重已经达 17.2%，非经济合作与发展组织国家仅为 9.4%，中国仅为 7.4%<sup>[10]</sup>。此外，在美国“页岩气革命”推动下，天然气利用规模显著增长，进一步推动发达国家能源结构显著优化。2012 年，天然气在经济合作与发展组织国家一次能源供应中的比重达 25.7%，明显高于中国 5.2% 的利用比重<sup>[9]</sup>。

## （二）应对气候变化推动低碳发展总趋势

在全球应对气候变化背景下，我国传统高碳发展方式面临新的外部制约。目前，我国已是世界第一温室气体排放国，2012 年温室气体的排放总量已达  $9.2 \times 10^9$  t，约占世界排放总量的 26.7%。1990—2012 年排放量年均增长 6.3%，高出世界平均增速 1 倍多。人均排放量不断攀升，2012 年达到 6.8 t，超过世界平均水平 37%，已接近欧洲联盟人均排放水平，并且还将进一步增长<sup>[11]</sup>。如果不做重大转变，2015 年我国排放总量将接近美国及欧洲联盟排放总和，2030 年可能超过经济合作与发展组织国家排放总和。在全球积极应对气候变化背景下，我国作为最大的发展中国家，面临经济社会发展、温室气体减排和争夺国际竞争优势等多重挑战和机遇。

## （三）发达国家能源发展模式

影响一国人均能耗和人均排放的因素很多，包括国土与人口、气候条件、资源禀赋、产业结构、技术水平、生活方式等。具体从各发达国家人均能耗、人均排放变化趋势看，不同的发展模式受客观因素的影响较小，更主要是选择不同发展道路的结果。归纳起来主要呈“美加”和“欧日”两种能源发展模式。突出差别主要体现在两方面。

一是从生产侧看，发达国家单位国内生产总值能耗存在明显差距。以 2009 年为例，美国单位国内生产总值能耗为  $0.17 \text{ toe} \cdot \text{千美元}^{-1}$ ，而欧洲联盟和日本分别只有  $0.12 \text{ toe} \cdot \text{千美元}^{-1}$  和  $0.1 \text{ toe} \cdot \text{千美元}^{-1}$ ，分别比美国低 29% 和 41%。从经济结构看，发达

国家经济结构主要以第三产业为主，普遍占 70 % 左右，第二产业占比为 20 %~30 %。可以看出，各国产业结构差距并不明显，单位国内生产总值能耗的差距主要来自产业内部结构差异和国际分工中附加值分配的差距。

二是从消费侧看，发达国家生活方式和消费模式存在明显差距。交通方面，2011 年，美国千人汽车保有量达 812 辆，而欧洲联盟和日本分别只有 543 辆和 579 辆，分别只是美国水平的 67 % 和 71 %，人均年行车里程美国达到  $3 \times 10^4$  km，而日本只有  $1.1 \times 10^4$  km。建筑方面，虽然发达国家单位建筑面积能耗水平接近，但由于美国、加拿大人均住房面积明显高于欧洲联盟、日本水平，从人均建筑能耗水平看，“美加模式”明显高于“欧日模式”水平。2006 年，美国人均建筑能耗为 4.69 tce，加拿大人均建筑能耗为 5.76 tce，而欧洲联盟、日本分别只有 1.35 tce 和 1.88 tce，分别只有美国水平的 29 % 和 40 %<sup>[12]</sup>。

## 五、我国能源需求与能源变革

### (一) 能源需求预测

中国要在 2050 年整体实现现代化的目标，仍需要保持一定的经济增长速度，工业化和城镇化建设还要加速发展。2020 年前中国能源需求仍将以一定比例增加，届时的能源需求总量将达到  $4.8 \times 10^9$  tce 左右。非化石能源虽受资源、技术等约束及核安全等因素的影响，预计到 2020 年所占比重约提高到 15 %~18 %（见图 6）。为了缓解能源供需矛盾，应转变经济发展方式，降低能源消费弹性系数，以此摆脱经济发展对能源消费依赖过高的趋势。根据预测，到 2020 年和 2050 年能源消费弹性系数将分别降低至 0.6 和 0.15（见图 7）。

### (二) 能源变革分析

生态文明背景下的能源革命可简单归结为，逐步告别“黑色、高碳”，逐步转向“绿色、低碳”，

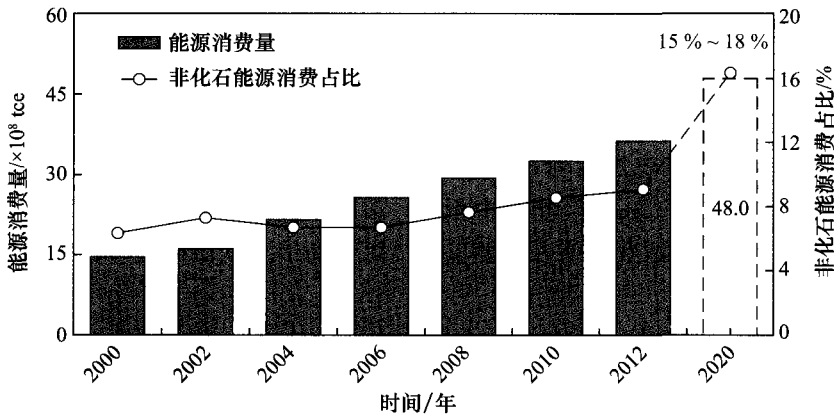


图 6 中国至 2020 年能源需求和非化石能源消费预测<sup>[13]</sup>

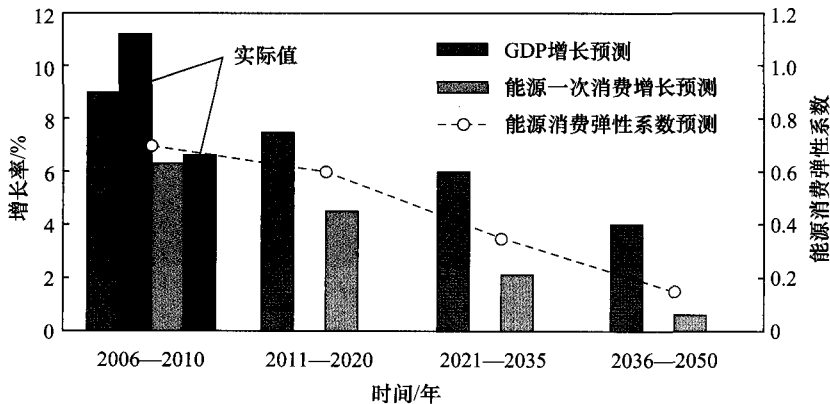


图 7 中国至 2050 年能源消费弹性系数预测<sup>[14]</sup>

由“粗放、低效”转向“节约、高效”。能源革命的这样一个能源体系的变革，需要树立新的能源安全观，并转变能源的供需模式，由“粗放的供给满足增长过快的需求”，转变为“由科学的供给满足合理的需求”，应实施“节能优先、总量控制”战略，并调整能源消费结构，同时大力推进节能技术、新能源技术的科技创新。

1. 节能优先、总量控制

工业化进程不断加快带动了我国能源需求的快速增长，从而导致能源资源供应紧张，这是我国大力提倡节约能源的主要原因之一。但随着工业化进程的不断加快，近年来高耗能产品开始逐渐接近产能峰值，未来工业用能增速将会有所下滑，可同时城镇化会加速，交通、建筑用能将不断增加，对能源需求仍将持续增长。因此，认识到能源需求的同时，要节约集约利用资源能源，推动能源消费、资源利用方式根本转变，加强全过程节约管理，提高利用效率和效益。推动能源变革，控制能源消费总量，加强节能降耗，支持节能低碳产业和新能源、可再生能源发展，确保国家能源安全。

2. 调整能源结构

我国的能源消费结构长期以来以煤为主，即使近年来比例有所下降，2012 年仍然占到 66.6%，属于典型的“高碳”能源结构。“低碳”能源中天然气虽然发展较快，但一次能源消费中所占比例仅

为 5.2%，水电、核电、风电等非化石能源占比也仅为 9.4%。为保障未来中国能源可持续发展，减少因化石能源利用带来的环境污染物的排放，必须调整能源结构，将逐步减小对传统化石能源的依赖，增大可再生能源、核能以及新能源等绿色、低碳能源在总能耗中的比重。研究表明<sup>[7]</sup>，我国至 2050 年化石能源虽然仍为主要能源，但可再生能源和核能等的比重将不断加大（见图 8）。

3. 创新能源技术

开发清洁能源、提高能源效率，促进节约能源，非常规油气资源的勘探开发、风能和太阳能发电、生物燃料产业化、新一代核能技术等重点领域关键技术的研究需要进一步创新，以促进能源结构的变革。

未来能源技术发展的特点为更加注重化石能源的高效和清洁化利用、非常规天然气开采与勘探技术不断推陈出新、核能的安全高效发展、有机废物能的高值化利用、新能源和可再生能源技术持续突破、输配电更加注重高效、智能、坚强等。“十三五”的科技支撑能源技术发展方向如表 1 所示。

六、适合中国国情的能源战略思考

人均资源相对不足、能源资源禀赋较差、生态环境比较脆弱、经济社会发展水平普遍较低的基本国情，决定了中国要在环境容量下发展，把人均能耗不高于“欧日模式”作为我国能源发展长期战略

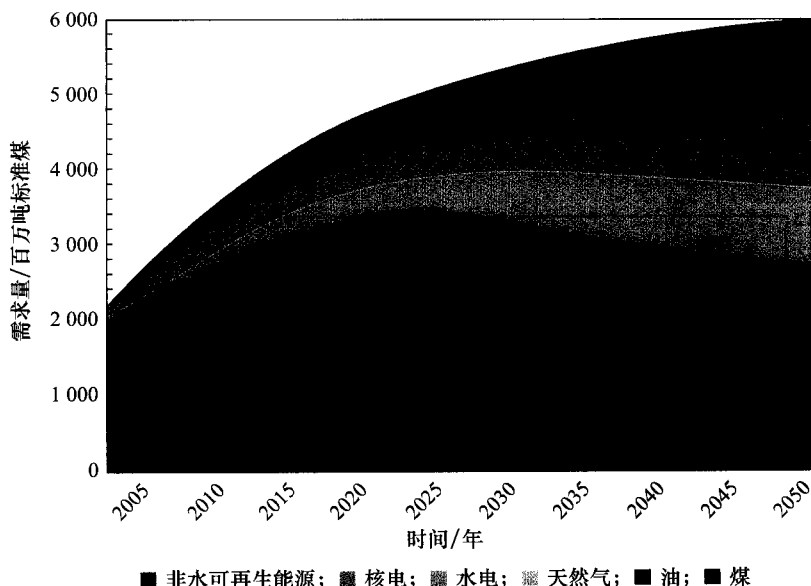


图 8 2050 年前中国能源结构示意图

表1 “十三五”的科技支撑能源技术发展方向

方向	内容
节约能源	采用洁净燃烧技术,提高工业锅炉运行效率;推广燃油燃气锅炉、生物质燃料锅炉等;高效节能电机技术;钢铁行业余热余压回收利用技术等
化石能源高效清洁利用	煤的生态开采、利用系统;低品位煤高值化利用;煤清洁转化制化工产品;集成化、精细化炼油;车用清洁燃料;高效、大口径、网络化的油气管道输送;液化天然气长途输送和储备;地震地质数据四维采集、处理、解释;煤炭生产过程的先进制造、自动控制;油气地球物理勘探技术和装备;成熟盆地的勘探技术;新型油气勘探技术
非常规天然气	加大煤层气、页岩气和致密气勘探开发力度;天然气水合物开发技术
可再生能源	低成本光伏发电;太阳能和地热能规模化热利用;光合作用及“人造叶片”,高效转能的微观机理;高附加值生物质资源利用与多联产;深层地热能利用技术
新型核能系统	核能利用的安全措施与技术;利用快中子引发裂变反应并实现核燃料增殖的核反应堆;加速器驱动核乏料处理
有机废物能的高值化利用	城镇生活废物资源化;畜禽能源与化工;农林废物高值化能源与资源利用
能源输配系统	已有电网技术的完善与升级;新型输电和智能化技术;交流运行模式向直流运行模式过渡的电网结构;超导直流输电的理论体系和关键技术
能源新原理、新技术研究	光电转换新原理;不规则中、低密度动能转换新原理
储能技术	物理储能技术和化学储能技术

参照,推动我国以更低的人均能耗和排放水平,实现全面小康和现代化发展目标。积极发挥后发优势,广泛借鉴世界各国低碳发展的经验和教训,以更低的单位国内生产总值能耗峰值水平,实现工业化、城镇化发展目标。创新经济增长模式和中国特色消费模式,把我国传统的天人合一、勤俭节约的智慧、美德与循环经济、低碳发展要求结合起来,积极推广节能汽车、低碳建筑、高效节能家电,积极推动“城乡矿山”建设,引导节约、适度消费的文化理念,倡导绿色出行,形成绿色、低碳的生活方式和消费模式。

参考文献

[1] BP Global. Annual Energy Review 2004[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2005.  
 [2] 中国国家统计局编. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
 [3] 中华人民共和国国家统计局编. 国外资源、能源和环境统计资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
 [4] The Department of Economic and Social Affairs. World Population

Prospects The 2012 Revision[M]. New York: United Nations, 2013.  
 [5] International Energy Agency. Energy Balance of OECD Countries 2012[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2013.  
 [6] International Energy Agency. Energy Balance of non-OECD Countries 2012[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2012  
 [7] International Energy Agency. World Energy Outlook 2011[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2011.  
 [8] 中国能源中长期发展战略研究项目组编. 中国能源中长期发展战略研究(2030、2050)(综合卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
 [9] International Energy Agency. World Energy Outlook 2013[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2013.  
 [10] BP Global. Annual Energy Review 2012[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2013.  
 [11] BP Global. Annual Energy Review 2014[M]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2015.  
 [12] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2009[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
 [13] 何建坤. 中国的能源发展与应对气候变化[J]. 中国人口·资源与环境, 2011(10): 40-48.  
 [14] 中国科学院能源领域战略研究组编. 中国至2050年能源科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.