



清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF CLEAN ENERGY

国际清洁能源 发展报告 (2015)

国际清洁能源论坛(澳门)

主编/苏树辉 袁国林 李玉崙

副主编/周杰 施鹏飞 毕亚雄

ANNUAL REPORT ON DEVELOPMENT
OF INTERNATIONAL CLEAN ENERGY (2015)



社会科学文献出版社
SOCIAL SCIENCES ACADEMIC PRESS (CHINA)

2015
版

清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF
CLEAN ENERGY



国际清洁能源发展报告 (2015)

ANNUAL REPORT ON DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL
CLEAN ENERGY (2015)

国际清洁能源论坛（澳门）

主 编 / 苏树辉 袁国林 李玉崙

副主编 / 周 杰 施鹏飞 毕亚雄



社会科学文献出版社
SOCIAL SCIENCES ACADEMIC PRESS (CHINA)

图书在版编目(CIP)数据

国际清洁能源发展报告. 2015/苏树辉, 袁国林, 李玉崙主编.
—北京: 社会科学文献出版社, 2016. 1
(清洁能源蓝皮书)
ISBN 978-7-5097-8573-7

I. ①国… II. ①苏… ②袁… ③李… III. ①无污染能源-能源
发展-研究报告-世界-2015 IV. ①F416.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 312987 号

清洁能源蓝皮书

国际清洁能源发展报告 (2015)

主 编 / 苏树辉 袁国林 李玉崙

副 主 编 / 周 杰 施鹏飞 毕亚雄

出 版 人 / 谢寿光

项目统筹 / 王晓卿

责任编辑 / 王晓卿 杜 敏 王 莉

出 版 / 社会科学文献出版社·当代世界出版分社 (010) 59367004

地址: 北京市北三环中路甲 29 号院华龙大厦 邮编: 100029

网址: www.ssap.com.cn

发 行 / 市场营销中心 (010) 59367081 59367090

读者服务中心 (010) 59367028

印 装 / 北京季蜂印刷有限公司

规 格 / 开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 21.75 字 数: 399 千字

版 次 / 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978-7-5097-8573-7

定 价 / 98.00 元

皮书序列号 / B-2013-314

本书如有破损、缺页、装订错误, 请与本社读者服务中心联系更换

 版权所有 翻印必究

《清洁能源蓝皮书》编委会

主 编 苏树辉 袁国林 李玉崙

副主编 周 杰 施鹏飞 毕亚雄

编 委 苏树辉 国际清洁能源论坛（澳门）理事长，澳门博彩控股有限公司行政总裁

袁国林 国际清洁能源论坛（澳门）常务副理事长，中国长江三峡集团公司原副总经理

李玉崙 国际清洁能源论坛（澳门）副理事长，原中国核工业总公司（核工业部）副总经理（副部长）

毕亚雄 国际清洁能源论坛（澳门）副理事长，中国长江三峡集团公司副总经理

周 杰 国际清洁能源论坛（澳门）秘书长，中国经济社会理事会理事

黄 珺 国际清洁能源论坛（澳门）副监事长

施鹏飞 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国可再生能源学会风能专业委员会（中国风能协会）名誉主任

张粒子 国际清洁能源论坛（澳门）理事，华北电力大学教授、博士生导师

刘树坤 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国水利水电科学研究院教授

- 桑丽霞 国际清洁能源论坛（澳门）理事，北京工业大学教授
- 刘彦宾 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国质量认证中心副主任
- 刘 强 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国社会科学院数量经济与技术经济研究所能源研究室主任、全球能源安全智库论坛秘书长
- 王 炜 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国社会科学院研究生院国际能源安全研究中心教授
- 张 昕 国际清洁能源论坛（澳门）理事
- 王 达 国际清洁能源论坛（澳门）理事，北京宝策国际投资管理有限公司副总经理
- 张子欣 国际清洁能源论坛（澳门）常设秘书处办公室主任
- 白煜章 全国政协人口资源环境委员会办公室主任，中国经济社会理事会理事
- 王晓涛 中国质量认证中心创新研究部部长
- 吴 克 中国能源学会副会长
- 范 湖 北京宝策国际投资管理有限公司证券投资基金研究总监

摘要

近年来,国际社会对化石燃料使用所导致的环境污染和气候变化问题越来越重视。2015年6月,中国政府正式向联合国提交“国家自主决定贡献”文件——《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》,文件确定了中国2020年和2030年的行动目标。2020年的行动目标是,单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%,非化石能源占一次能源消费比重达15%左右;2030年的行动目标是,2030年前后二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达到,单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达20%左右。因此,如何实现中国“以煤为主”能源结构的转型,如何加强清洁能源的开发和利用,如何建立全国森林碳汇和碳排放交易市场体系,已成为中国实现减排和能源结构调整所必须要解决的问题。

在此背景下,2015年度的《国际清洁能源发展报告》以“煤炭清洁高效利用,节能减排低碳发展”为主题。报告全面分析国内外煤炭清洁高效利用的现状与发展趋势,对煤炭全产业链的能源效率、资源消耗、环境影响、技术经济等煤炭开发利用和低碳清洁能源以及节能减排若干重大问题进行了深入研究,同时透视国内外清洁能源产业政策与市场状况,分析当前能源结构所面临的问题和挑战,展望未来能源可持续发展的路线图。煤炭清洁高效利用部分进行全产业链的研究,包括煤炭清洁高效利用战略、燃煤减排、燃煤发电、煤炭生产加工、煤化工、工业燃煤锅炉以及国外同行经验和案例等方面。节能减排低碳发展部分则对积极发展可再生能源、水电、核电等清洁能源,降低煤炭消费比重,治理大气污染,建立全国性碳排放交易体系,以及进一步推动能源结构优化等热点问题进行了深入研究。本报告遵循“着眼中国,面向世界”的方针,联合国内外著名专家学者共同编写,对于国家能源战略和政府产业政策制定以及企业技术研发、市场开拓和投资决策都具有借鉴价值。

主题词 煤炭 清洁高效 能源结构 可再生能源 核电

前言：清洁高效 减排减碳

——写在 COP 21 召开前夕

第 21 届联合国巴黎气候变化大会即将召开，该会议将针对世界气候变暖问题在全球范围内达成一项“有目标、有约束力”的协议。为确保巴黎峰会成功，前不久中美元首会晤，第二次发布《中美气候变化联合声明》。中美两国决心再度携手与其他国家一道努力，促使年末的巴黎气候峰会达成一项富有雄心的成果。而世界最大的发展中国家——中国正处于工业化快速发展、能源消耗总量持续增加的阶段，如何能在加快经济发展的同时兑现减排承诺，已成为中国未来必须面对的挑战。

中国政府根据中国的国情、发展阶段、可持续发展战略和国际责任，确定了到 2030 年的自主行动目标：第一，2030 年前后二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰；第二，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60% ~ 65%；第三，非化石能源占一次能源消费比重达到 20% 左右；第四，森林蓄积量比 2005 年增加 45 亿立方米左右。同时，中国计划于 2017 年启动全国碳排放交易体系，针对温室气体排放定出上限与价格，以抑制碳排放速度。作为阶段性目标，《国家应对气候变化规划（2014 - 2020 年）》提出到 2020 年，实现单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40% ~ 45%，非化石能源占一次能源消费的比重达到 15% 左右，森林面积和蓄积量分别比 2005 年增加 4000 万公顷和 13 亿立方米的目标。

中国提出这个明确的碳减排目标，任务艰巨、压力巨大。为实现这一目标，一方面，要节能减排、提高能效、降低能耗；另一方面，传统化石能源的清洁高效综合利用，特别是煤炭资源的清洁高效综合利用，将成为我国能源技术创新的战略选择，也是中国能源结构调整的战略性选择的关键所在。因此，为了推进我国煤炭产业转型升级、提升煤炭行业节能减排科技创新能力，最终促进煤炭清洁高效利用，并实现对环境污染防治的治理改善，由国际清洁能源论坛（澳门）主编的《清洁能源蓝皮书（2015）》以“煤炭清洁高效利用，节能减排低碳发展”为研究主题，组织国内外专家展开了课题研究，本书就是论坛研究团队科研成果的结晶。在



此，我谨代表论坛和编委会对各单位及各位作者的研究、贡献致以崇高的敬意。

与此同时，在中国经济社会理事会的指导下，在澳门特区政府和澳门基金会的大力支持下，国际清洁能源论坛（澳门）主办的“第四届国际清洁能源论坛”于12月16~17日在澳门举办。本届论坛在第21届联合国巴黎气候变化大会结束之际召开，具有重要的意义。论坛议题非常丰富，包括煤炭清洁高效利用、发展现代煤化工产业、森林碳汇与林业产业、中国能源结构优化、“一带一路”战略与中国能源产业走出去、光伏技术发展与创新、全国碳排放交易体系建立、扩大可再生能源利用等。从先进国家及大型跨国企业应对气候变化的经验来看，节能减排低碳发展将是21世纪开创新商机的重要利基点，上述议题都将成为影响21世纪经济发展与企业经营的要素。在此，我谨代表论坛及其组委会预祝大会圆满成功，对中国能源学会煤化工专业委员会、中国质量认证中心、香港排放权交易所参与联合主办表示热烈欢迎和感谢，对于澳门基金会、澳门特区政府环境保护局、澳门特区政府能源业发展办公室、全球能源安全智库论坛、中国能源研究会节能减排中心、加拿大国际可持续发展研究院参与协办和支持表示衷心的感谢。

为控制煤炭消费总量，实现在2030年前后二氧化碳排放达到峰值的目标，必须综合采取法律、行政、经济等多种手段和解决方案。2015年1月1日起实施的新修订的《环境保护法》加大了对排污的惩治力度。对于拒不改正的排污企业，罚款金额可以“按日连续处罚”，同时赋予环保部门查封扣押等权利。新环保法对以牺牲环境为代价的发展模式从法理上画上了句号，为实现减排目标和生态文明建设确定了法律基础。最新公布的数据显示，2014年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降33.8%，非化石能源占一次能源消费的比重达到11.2%，森林面积比2005年增加2160万公顷，森林蓄积量比2005年增加21.88亿立方米。既定指标在“十二五”期间已完满实现。因此，我们有理由相信：中国一定能走出一条绿色、低碳、可持续发展之路，唯有这条路才能确保既对中国人民负责，又对世界人民负责。

蘇樹輝

国际清洁能源论坛（澳门）理事长

2015年11月吉日

目 录



前言：清洁高效 减排减碳

——写在 COP 21 召开前夕 苏树辉 / 001

Ⅱ I 节能减排低碳发展

Ⅱ.1 能源发展新常态与“十三五”能源转型
..... 韩文科 张有生 苏 铭 / 001

Ⅱ.2 电能替代改善区域空气质量的可行性研究
..... 唐 伟 徐 峻 段 宁 支国瑞 孟 凡 / 018

Ⅱ.3 中国碳交易市场发展现状与潜力分析
..... 张 颖 曹先磊 李栩然 / 035

Ⅱ.4 中国水电与水资源开发
..... 张博庭 / 055

Ⅱ II 煤炭清洁高效利用

Ⅱ.5 煤炭清洁高效利用与中国的碳减排战略
..... 姜耀东 张 博 宋 梅 孙旭东 / 077

Ⅱ.6 中国煤电清洁高效发展现状及展望
..... 王志轩 / 096

Ⅱ.7 日本煤炭清洁利用与高效发电产业国家战略研究
..... 周 杰 周溪峒 / 114



B.8	实现工业锅炉清洁生产 推动能源生产消费革命	中国能源研究会节能减排中心 / 163
B.9	中低阶煤分质梯级利用的发展与创新	肖 磊 / 174
B.10	煤炼制清洁油品及固体燃料系统研究	李初福 姚金松 许 明 门卓武 翁 力 / 195
B.11	煤炭终结：加拿大安大略省的“煤炭淘汰政案”	Melissa Harris, Marisa Beck and Ivetta Gerasimchuk / 202

B III 特别报告

B.12	世界核能产业报告（2015）	Mytle Schneider et al. / 227
B.13	后记	周 杰 / 322
Abstract		/ 326
Contents		/ 328

皮书数据库阅读使用指南

节能减排低碳发展



Energy Conservation and Emission Reduction to Low-carbon
Development

B. 1

能源发展新常态与“十三五”能源转型*

韩文科 张有生 苏铭**

摘要: 随着经济发展进入新常态,我国能源发展也进入了“三低三严”新常态,能源发展呈现出“低增速、低增量、低碳化”态势,与此同时,能源发展面临的资源安全供应、生态环境保护、温室气体减排约束不断趋严。源于此,“十三五”能源将聚焦于转型发展,重点包括强化高碳化石能源总量控制、加大安全高效绿色矿山投资改造、打造石油行业发展新动力、加快天然气管网和储气基础设施建设、大力发展非化石能源及其装备制造、构建安全高效智能灵活的电力新系统。进一步,亟待建立健全能源法制体系,深化能源价格形成机制改革,完善能源绿色财税金融政策,建立资源型城市转型扶持政策,保障能

* 国家发展和改革委员会宏观经济研究院2014年度重点课题“生态文明建设背景下能源发展转型研究”部分研究成果。

** 韩文科,研究员,国家发展和改革委员会能源研究所所长。张有生,博士,研究员,国家发展和改革委员会能源研究所能源经济和发展战略研究中心主任。苏铭,博士,助理研究员,国家发展和改革委员会能源研究所能源经济和发展战略研究中心工作人员。



源转型发展。

关键词： 经济发展新常态 十三五 能源转型发展 三低三严

一 引言

1978 年以来我国实施了改革开放战略，经济发展从此进入持续稳定的快车道，30 多年来年均增速高达 9.8%，工业化水平大幅提升，城镇水平化稳步提高，服务业发展不断提升，深入融入世界经济格局当中，使我国经济达到了一个前所未有的高度，已成为世界第二经济大国（参见图 1）。到 2014 年，按当年价计算，我国 GDP 总量已达 63.6 万亿元；人均 GDP 增至 46629 元，已超过 7000 美元。

“十二五”以来，随着我国进入中等收入国家行列，经济增速开始下台阶，2012~2014 年 GDP 增速均低于 8%。从国际经验看，许多追赶型发达国家或地区都经历过一个快速的经济增长阶段，在达到上中等收入水平之后，经济增速逐步趋缓。从国内各区域看，东南沿海的经济大省，包括广东、江苏、浙江、上海、山东、北京等省市，多已迈入高收入水平行列，增长速度持续低于全国平均增长速度。这表明，“十三五”及未来较长时期，我国经济将由 10% 的高速增长期转为中高速增长期，迈入经济发展新常态。

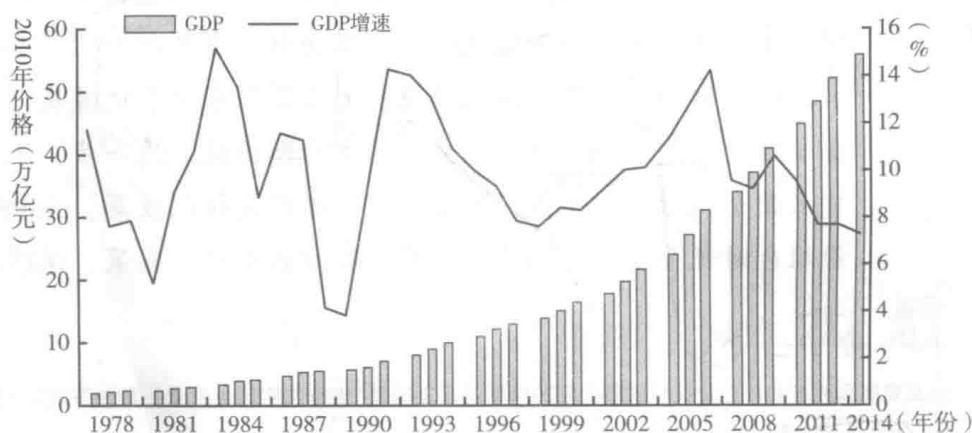


图 1 改革开放以来历年中国 GDP 变化情况

资料来源：《中国统计年鉴 2014》《中国统计公报 2015》。

二 我国能源发展进入“三低三严”新常态

改革开放特别是 21 世纪以来,我国能源生产和消费持续快速增长,能源生产和消费总量均已高居世界第一位,这为保障国民经济长期平稳较快发展和人民生活水平持续提高做出了重要贡献,但也产生了严重的生态环境问题。近期,随着我国经济发展进入新常态,能源发展也进入了“三低三严”新常态,一方面,能源发展呈现“低增速、低增量”态势,并加速“低碳化”,另一方面,能源发展面临的资源安全供应、生态环境保护、温室气体减排约束不断趋紧。

(一) 能源消费总量呈“低增速、低增量”态势

随着我国经济发展进入新常态,再加上能源消费总量基数不断扩大,近三年来能源消费增速下降十分显著。2003~2011 年,我国能源消费总量年均增速达 8.1%,个别年份增速甚至超过 16%。2012~2014 年,我国能源消费总量年均增速降至 3.2%,而且呈逐步下降态势;2014 年较 2013 年仅增长 2.2%(参见图 2)。能源消费增速已降至不足之前的一半。

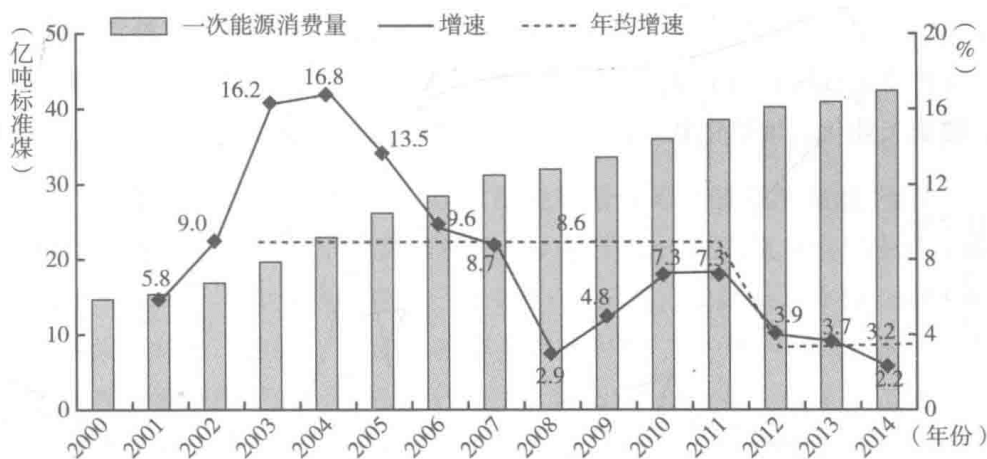


图 2 2000 年以来我国能源消费总量及增速变化

资料来源:《中国能源统计年鉴 2014》《中国统计公报 2014》。

我国能源消费年增量也随之显著走低。2003~2011 年,我国能源消费年增量平均达 2.4 亿吨标准煤,该增量就已接近英国的能源消费总量水平;个别年份增量甚至超过 3 亿吨标准煤。2012~2014 年,我国能源消费年增量平均已降至



1.3 亿吨标准煤，2014 年较 2013 年仅增长 0.9 亿吨标准煤（参见图 3）。能源消费增速已降至不足之前的一半。

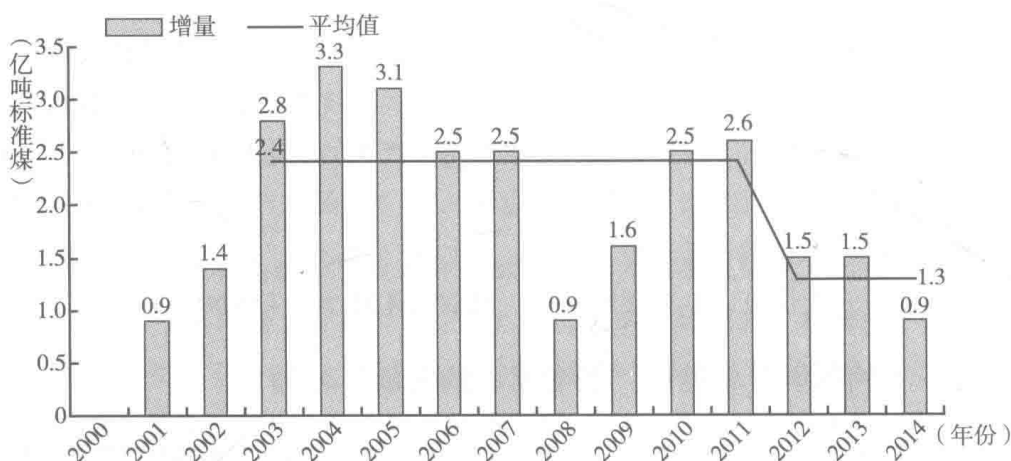


图 3 2000 年以来我国能源消费年增量变化情况

资料来源：《中国能源统计年鉴 2014》《中国统计公报 2015》。

从能源消费弹性系数看，其在经历了 21 世纪前十年的高企（个别年份甚至超过 1）之后，近两三年来开始回落至 0.5 甚至更低水平（参见图 4）。这一变化与发达国家的历程基本相近。主要经济发达国家也普遍经历了能源消费随工业化、城镇化进程快速增长的阶段，不少国家能源消费弹性系数甚至大于 1。然后，随着工业化、城镇化基本完成，能源消费增速逐步放缓，能源消费弹性系数

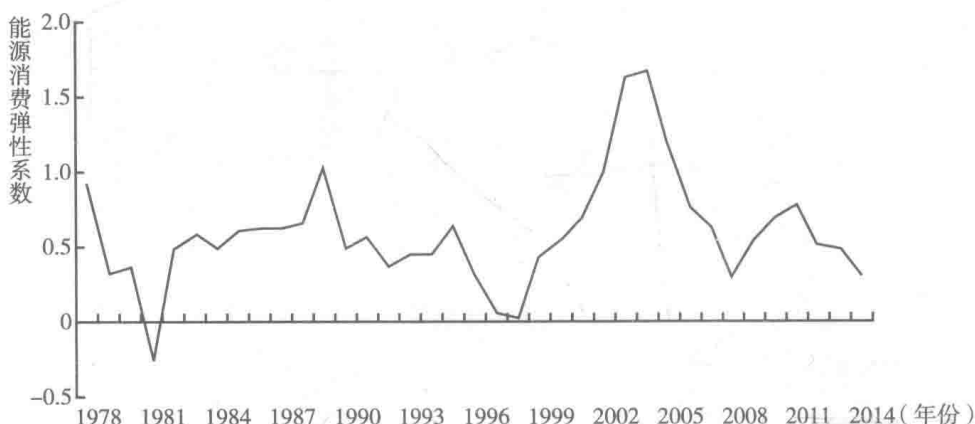


图 4 改革开放以来我国能源消费弹性系数变化情况

资料来源：《中国能源统计年鉴 2014》《中国统计年鉴 2014》《中国统计公报 2015》。

降至 0.5 乃至更低水平，以更低的能源消费增长支撑经济发展。甚至一些国家还实现了能源消费与经济增长逐步脱钩，英国等出现了能源消费负增长局面。

可以预计，“十三五”期间在向全面建设小康社会目标迈进的过程中，尽管经济仍将保持较快增长，但增长方式、增长动力、产业结构均将与之前有较大不同，我国能源消费弹性系数将处于 0.5 甚至更低水平。相应的，我国能源消费将继续保持“低增速、低增量”态势，年均增速有望低于 3%，年均增量也有望低于 1 亿吨标准煤。

（二）能源结构“低碳化”转型正在加速

资源禀赋特征决定了我国长期以煤为主的能源结构。尽管我国从“九五”期间就提出“优化调整能源结构”的政策方针，但煤炭长期占据能源消费主导地位的局面并没有改变，而且 21 世纪前十年煤炭消费占比不降反升，绝大部分时间在 70% 以上（参见表 1）。这一时期煤炭消费量快速增长、煤炭消费占比不降反升，主要原因在于经济过快增长拉动能源需求快速上升，但石油资源相对贫乏，大型水电建设周期很长，天然气、非化石能源开发利用规模尽管增长迅速但远不能满足新增能源需求，使得煤炭成为能够在短时间内快速增加供给的唯一能源品种，我国不得不多上马煤炭项目。

“十二五”以来，这一趋势得以扭转，能源结构开始加快向“低碳化”转型。一方面，随着非化石能源技术不断进步，开始进入规模化发展快车道。其中，水电装机持续稳步增长，2014 年年底装机容量达到 3 亿千瓦，年发电量首次超过了 1 万亿千瓦时。风电近年连续保持新增和累计装机容量世界第一的位置，到 2014 年年底并网装机容量已经超过 1 亿千瓦；太阳能发电是发展最快的新能源技术，2014 年年底装机容量已达 2800 万千瓦；我国坚持在安全高效的基础上稳步发展核电，2014 年年底装机容量已达 1988 万千瓦。^① 2014 年，非化石能源在一次能源结构中的比重已达 11.2%，较 2000 年增长了近 4 个百分点。另外，天然气开发利用规模不断扩大。21 世纪以来，国内天然气产量年增长平均达 100 亿立方米，2014 年产量已超过 1300 亿立方米；随着中国—中亚天然气管线、中缅管线以及一批沿海 LNG 接收站陆续建成，2014 年进口规模已达 580 亿立方米。^② 2014 年，天然气在一次能源结构中的比重已达 5.7%，较 2000 年增长

① 数据来自国家能源局网站。

② 数据来自国家能源局网站。



了近 3.5 个百分点。相应地，煤炭和石油消费比重均有所降低，特别是煤炭从 2007 年的 72.5% 的高点降至 2014 年的 66.0%（参见表 1）。

“十三五”期间，能源结构“低碳化”转型将不断加速。其中，我国已承诺，到 2020 年将非化石能源在一次能源结构中的比重提高到 15%。随着我国加大非常规天然气开发力度，不断扩大进口来源与规模，促进天然气利用，天然气在一次能源结构中的比重也有望达到 10%。

表 1 2000 年以来我国一次能源结构

单位：%				
年份	煤炭	石油	天然气	非化石能源
2000	68.5	22.0	2.2	7.3
2001	68.0	21.2	2.4	8.4
2002	68.5	21.0	2.3	8.2
2003	70.2	20.1	2.3	7.4
2004	70.2	19.9	2.3	7.6
2005	72.4	17.8	2.4	7.4
2006	72.4	17.5	2.7	7.4
2007	72.5	17.0	3.0	7.5
2008	71.5	16.7	3.4	8.4
2009	71.6	16.4	3.5	8.5
2010	69.2	17.4	4.0	9.4
2011	70.2	16.8	4.6	8.4
2012	68.5	17.0	4.8	9.7
2013	67.4	17.1	5.3	10.2
2014	66.0	17.1	5.7	11.2

资料来源：《中国能源统计年鉴 2014》《中国统计公报 2015》。

（三）能源发展越来越受资源环境气候的严格约束

粗放型发展方式消耗了大量能源，再加上长期以煤为主的高碳能源结构，为我国带来严重的资源供应安全问题、严峻的生态环境问题和日益增大的应对温室气体减排国际压力三重约束。

一是资源供应约束不断趋紧。2014 年煤炭、石油、天然气净进口总量合计近 6 亿吨标准煤，能源对外依存度超过 14%。其中，石油对外依存度高达 60%，天然气对外依存度也超过 32%。^① 与之对应的是，占主体地位的煤炭、石油的国

① 数据来自《中国能源统计年鉴 2014》《中国统计公报 2015》以及本文作者测算。

内供应能力已逼近上限。根据中国工程院研究,在生态环境和水资源承载力范围内我国煤炭科学产能不宜突破 38 亿吨,当前产量已超出科学产能范围;我国石油开采规模仅能维持在当前 2.0 亿吨左右水平,难以出现较大幅度增产。其他能源要成为重要支柱能源仍有待时日。受资源、技术、经济制约,我国常规天然气合理开发规模仅为 2300 亿立方米/年,煤层气、页岩气等非常规天然气开发不确定性因素很多。目前,我国水力开发程度已达 75%,进一步开发难度较大。此外,我国铀资源勘探开发程度低,资源条件差,目前更是高度依赖进口。

二是长时间高强度的能源开发利用严重破坏了区域生态环境。我国煤矿采空区累计已超过 100 万公顷,煤炭开发已造成西北地区约 245 平方公里范围的水土流失;石油天然气资源开发是华北地区地下水形成“漏斗”的原因之一;部分地区水能资源高强度开发显著改变江、河、湖、湿地生态;核能开发对周边环境造成长期不可忽视的隐患;铀矿资源的开发造成的废气、废水、废渣等污染也不可忽视。更严重的是,我国大气污染物绝大部分来自化石能源燃烧, SO_2 、 NO_x 、烟粉尘、人为源大气汞排放等长期高居世界首位。中东部地区过高的煤炭消费密度更是雾霾产生的重要原因,煤炭消费对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献很可能在 50% ~ 60%。^① 其中,京津冀、长三角、广东省单位国土面积的煤炭消费量更是分别高达 1794 吨/平方千米、2267 吨/平方千米、981 吨/平方千米,正是大气污染最严重的几个区域(参见图 5)。

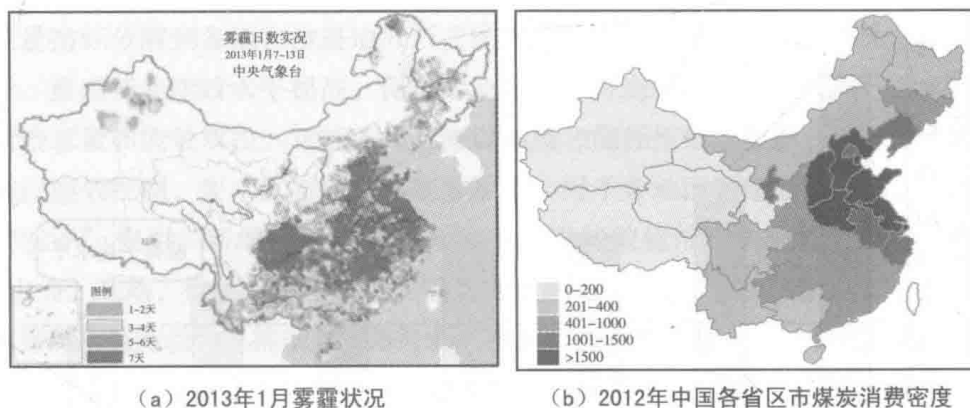


图5 我国雾霾状况与煤炭消费密度高度相关

资料来源:中国气象局以及《中国能源统计年鉴 2014》。

^① 中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目课题组:《煤炭使用对中国大气污染的贡献》, <http://www.nrdc.cn/coalcap/console/Public>, 2014。