

清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF CLEAN ENERGY

温室气体减排与碳市场 发展报告 (2016)

ANNUAL REPORT ON DEVELOPMENT OF GREENHOUSE

GAS EMISSIONS CONTROL AND CARBON MARKET (2016)

国际清洁能源论坛（澳门）

主 编 / 苏树辉 袁国林

副主编 / 周 杰 毕亚雄



世界科学 出版社

清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF
CLEAN ENERGY

温室气体减排与碳市场发展报告 (2016)

ANNUAL REPORT ON DEVELOPMENT OF GREENHOUSE GAS
EMISSIONS CONTROL AND CARBON MARKET (2016)

国际清洁能源论坛（澳门）

主 编 / 苏树辉 袁国林

副主编 / 周 杰 毕亚雄

 世界知识出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温室气体减排与碳市场发展报告. 2016/ 苏树辉, 袁国林主编. —北京: 世界知识出版社, 2016. 10

(清洁能源蓝皮书)

ISBN 978-7-5012-5338-8

I. ①温… II. ①苏… ②袁… III. ①无污染能源—能源发展—研究报告—世界 IV. ①F416.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 248915 号

责任编辑 刘豫徽
责任出版 王勇刚
责任校对 陈可望

书 名 温室气体减排与碳市场发展报告 (2016)
Wenshi Qiti Jianpai yu Tanshichang Fazhan Baogao (2016)
主 编 苏树辉 袁国林
副 主 编 周 杰 毕亚雄

出版发行 世界知识出版社
地址邮编 北京市东城区干面胡同 51 号 (100010)
网 址 www.ishizhi.cn
投稿邮箱 lyhbbs@163.com
电 话 010-65265923 (发行)
010-85119023 (邮购)
经 销 新华书店
印 刷 北京京科印刷有限公司
开本印张 787×1092 毫米 1/16 20 印张
字 数 320 千字
版次印次 2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月第一次印刷
标准书号 ISBN 978-7-5012-5338-8
定 价 99.00 元

版权所有 侵权必究

《温室气体减排与碳市场发展报告(2016)》

编委会名单

- | | | |
|-----|-----|-------------------------------------|
| 主 编 | 苏树辉 | 袁国林 |
| 副主编 | 周 杰 | 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 |
| | 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 |

- 解树江 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国经济发展研究会副秘书长，中央民族大学教授
- 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
- 张丽欣 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国质量认证中心产品六部副经理
- 王红野 国际清洁能源论坛（澳门）理事，中国三峡新能源有限公司市场营销部主任助理
- 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
- 任搏难 国际清洁能源论坛（澳门）常设秘书处项目官员
- 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
- 朱钰华 香港排放权交易所总经理
- 李栩然 香港排放权交易所市场部资深经理
- 黄宗煌 台湾综合研究院副院长
- 李坚明 台北大学自然资源与环境管理研究所副教授

前言：创新激活市场机制 实现减排人人有责

——写在巴黎气候大会之后

2016年9月G20峰会期间，中国向联合国递交了《巴黎协定》的批准文书。明确了“把全球平均气温较工业化前水平升高控制在2摄氏度之内，并把升温控制在1.5摄氏度之内”的总目标。建立全国统一碳市场，通过市场机制，更有效地减少碳排放成为中国政府采取应对措施的重要方面。

节能减排不仅仅是国家和政府的责任，需要全民族的共识，需要全社会的行动。对于我们每个普通公民来说，在全球抑制气候变暖进行“限排”“减排”的大潮中，可以选择低碳生活方式，承担起对赖以生存环境应尽的责任与义务。每个人的生活方式都会直接影响到地球生存。用水、用纸、用电、度假、交通方式、垃圾处理、食物等，这些点点滴滴都与导致全球变暖的元凶——二氧化碳的排放密切相关。碳排放量的多与少决定在每个人。“碳补偿”“碳中和”就是我们普通公民为减缓全球变暖可以有所作为的一种自愿减排方式。通过计算个人生活、工作或某项活动中的二氧化碳排放量，通过自愿购买森林碳汇，或者清洁项目产生的核证减排量，也可以通过义工或者通过特定组织，参与到减碳活动中来，把这些碳排放量抵消掉，以使自己成为气候无害者或对气候的影响是中性的。

澳门特区政府高度重视环境保护问题，确定了构建低碳城市，推动环保事业的可持续发展目标。节能环保是可持续发展的必然方向，减少生活中碳的排放，建设“天更蓝、水更清、路更畅、城更美”的绿色家园和宜居城市，每个市民应当责无旁贷地行动起来，参与到低碳生活中来。从个人做起，节约能源和资源，减少垃圾和排放，倡导绿色消费，绿色出行。“碳补偿”“碳中和”对澳门市民参与低碳行动，推动环保进步来说无疑是多了一种选择。

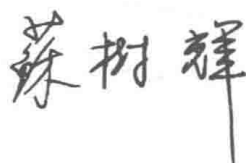
清洁能源蓝皮书：

温室气体减排与碳市场发展报告（2016）

当然“碳中和”本身是一种非常美好的愿望。从现实来看，个人参与碳中和减排交易市场的发展并不乐观。因此，碳中和市场机制本身也需要创新。如果将个人碳排放交易中引入竞争机制，即允许个人将其购买的碳减排量可以在市场流转，那么利用这种环保方式的个人参与度和积极性将会越来越高。若能与博彩、金融、保险等行业交易制度互动配套，“碳中和”市场将会激发出更大的活力。一年一度国际清洁能源论坛大会的相逢相聚就是官产学各界有识之士，共同来研讨当前应对气候变化，实现节能减排，普及清洁能源所面临的问题及其解决方案，通过凝聚社会共识和采取行动，共同为实现巴黎协定的国家自主贡献而努力。

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“第五届国际清洁能源论坛”将于2016年11月28日至30日在澳门举行。2016年是联合国2030年可持续发展议程的开局之年，论坛召开之际，又恰逢9月杭州二十国集团领导人峰会结束，会上各国承诺积极落实2030年可持续发展议程并制定了行动计划。中国政府明确表示推动可持续发展，要以务实行动应对当前的挑战，积极变革和改造我们的世界。《温室气体减排与碳市场发展报告（2016）》作为推动可持续发展中的重要一环，旨在响应中国建设全国碳市场的规划以及为碳市场建设建言献策，其出版和问世具有重要意义。

国际清洁能源论坛（澳门）理事长



2016年11月吉日

目 录

前 言	苏树辉 / 003
▣ 1 基于综合资源战略规划模型的中国中长期发电碳排放趋势研究	郑雅楠 任东明 姚明涛 胡兆光 / 001
▣ 2 欧美日韩及中国碳排放交易体系下的监测、报告和核查机制对比	张丽欣 王 峰 王振阳 曾 桢 / 025
▣ 3 国际碳市场的发展：经验和启示	段红霞 / 058
▣ 4 日本企业温室气体自愿减排的机制、成效与问题	周 杰 / 079
▣ 5 碳交易制度最佳设计分析与台湾排放总量制定规划	李坚明 / 114
▣ 6 中国试点地区碳交易研究报告	吴宏杰 李一玉 / 143
▣ 7 新一轮电力体制改革环境下的全国统一碳市场	李栩然 蒋 慧 黄 杰 / 164

清洁能源蓝皮书：

温室气体减排与碳市场发展报告（2016）

图 8	基于碳交易实践的 CCER 项目投融资模式分析 ——以三峡集团 CCER 项目融资模式为例 王红野 区美瑜 马 婧 / 192
图 9	碳普惠制的创新及应用 聂 兵 史颖颖 任 捷 陈 颖 / 227
图 10	中国自愿减排量的开发及其发展潜力的经济学研究 张 颖 曹先磊 / 259
图 11	中国的排污权交易试验：市场化改革面临的体制挑战 Huw Slater / 280
图 12	结语..... 周 杰 / 299
Contents / 302

基于综合资源战略规划模型的中国中长期发电碳排放趋势研究

郑雅楠 任东明 姚明涛 胡兆光^①

摘 要:

伴随《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》文件的提交,中国制定了明确的行动目标:2020年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到15%左右;二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰,2030年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到20%左右。为实现应对气候变化自主行动目标,“十二五”期间中国已在国家战略、能源体系、碳交易市场等方面持续不断努力,其中电力工业作为碳排放重点行业,在降低火电比重和大力发展风、光等可再生能源方面取得了令世界瞩目的成绩,然后中国节能减排之路仍然崎岖漫长,需要进一步优化发电结构,促进低碳绿色能源的发展,建立长效的电力需求侧管理机制,实现电力工业的可持续发展。因此,本文借助电力综合资源

^① 郑雅楠,博士,高级工程师,国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心工作人员。任东明,博士,研究员,国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心主任。姚明涛,博士,助理研究员,国家发展和改革委员会能源研究所可持续发展研究中心工作人员。胡兆光,博士,教授级高工,中电联电力市场首席专家。

战略规划，研究我国未来中长期各区域化石能源和非化石能源发电的发展趋势，探究发电二氧化碳排放达峰情况，为完成能源生产和消费革命建言献策。

关键词：

气候变化 二氧化碳排放 需求侧管理 综合资源战略规划

1. 引言

全球气候不断变暖，气候变化已经成为 21 世纪人类面临的最复杂、最重大的环境问题，2005 年《京都议定书》的生效、2007 年“巴厘岛路线图”的制定以及 2009 年哥本哈根世界气候大会的召开，在很大程度上敦促了世界各国对碳排放问题的重视，中国作为《京都议定书》里附件 II 中的国家（即发展中国家），在 2008—2012 年间的第一个承诺期内不承担减排任务，然而随着进入第二个承诺期，中国政府向世界承诺“十二五”期间要实现单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低 16% 和 17% 的目标。为此“十二五”期间，中国制定了以推动能源生产和消费革命为主要内容的国家战略，将能源结构调整作为中长期能源发展的战略重点^①。电力工业作为国民经济和社会发展的基础能源产业，“十二五”期间，在发电结构调整和非化石能源发展方面取得了长足进步，但总体而言，仍然存在严重依赖化石能源发电、带来的生态环境恶化形势依然严峻等问题；风电、太阳能等新兴非化石能源发电还处于成长阶段，由于缺乏统一规划引起的无序发展，以及由此产生的“弃水”“弃风”“弃光”问题日趋严重，已成为中国电力工业发展必须面对的一大难题和挑战^②。而节能设备推广、可中断负荷等电力需求侧管理在“十二五”期间取得快速发展，已成为中国另一种不可或缺的电力资源。因此，统筹规划化石能源和非化石能源发电以及需求侧管理，深入研究中国中长期各区域发电二氧化碳排放

^① 《十二届全国人民代表大会第二次会议工作报告》，北京：人民出版社 2014 年版。

^② 国家可再生能源中心主编：《2015 中国可再生能源产业发展报告》，北京：中国经济出版社 2015 年版。

趋势，对于应对气候变化、履行国际承诺和破解中国能源转型难题具有重要的理论和实践价值。

随着社会经济的进步，人们对电力的依赖程度越来越高，电力行业已经成为中国节能减排的主力军，其电源规划是否合理不仅涉及化石能源和非化石能源的有效利用，还直接影响中国应对气候变化目标的实现，因此，电力系统电源规划一直以来都是研究的热点问题。传统的电源规划依靠单纯增加电源建设来满足电力需求的增长^①，伴随日益加重的资源短缺和环境压力，20世纪70年代电力需求侧管理（DSM）被提出^②，将需求侧可节约的能源也纳入电力资源中，20世纪80年代美国率先提出了电力综合资源规划（Integrated Resource Program, IRP）的概念^③，它强调了供电和用电协调的重要性，通过综合考量供需双方的资源，以实现社会总成本最小和整体效益最优的目标，从而改变了电力工业一直把用户用电需求作为规划外在因素的做法。随着电力体制改革的推进，垂直一体化的电力经营模式被打破，IRP无法再发挥重要作用，因此，利用国家层面的电力综合资源战略规划（Integrated Resource Strategic Planning, IRSP）取代传统的综合资源规划^④，已成为研究国家电力发展战略的重要选择。综合资源战略规划是根据国家能源电力发展战略，将电力供应侧资源和各种形式的电力需求侧能效电厂（Efficiency Power Plant, EPP）资源进行综合优化，通过经济、法律、行政手段，合理配置和利用各环节的资源，在满足未来经济发展对电力需求的前提下，保证整个规划的社会总投入最小，而产生的效益最大^⑤。它将各类需求侧资源打包成多种EPP，主动纳入电源规划中，实现

① Fawwaz Elkarmi, "Load research as a tool in electric power system planning, operation, and control—The case of Jordan," *Energy Policy*, vol. 36, 2008, pp. 1757–1763. 韩祯祥、黄民翔：《2002年国际大电网会议系列报道——电力系统规划和发展》，《电力系统自动化》2003年第27卷，第10期。

② 杨志荣主编：《需求方管理（DSM）及其应用》，北京：中国电力出版社1999年版。

③ Mark Jaccard, "Social cost calculation and energy planning", *Electric Power Technologic Economics*, 1999, pp. 60–62.

④ Zhaoguang Hu, Xinyang Han, Quan Wen, eds., *Integrated resource strategy planning and demand side management* (New York: Springer, 2013).

⑤ Zhaoguang Hu, Xiandong Tan, Yang Fan, et al., "Integrated resource strategic planning: Case study of energy efficiency in the Chinese power sector", *Energy Policy*, vol. 38, 2010, pp. 6391–6397. Yanan Zheng, Zhaoguang Hu, Jianhui Wang, et al., "IRSP with interconnected smart grids in integrating renewable energy and implementing DSM in China", *Energy*, vol. 76, 2014, pp. 863–874.

供应侧与需求侧资源的统筹规划。不仅有利于降低供应侧的投入，促进节能减排，而且还可以调动需求侧资源的灵活性，保障不确定性非化石能源的有效利用。因此，本文将在分析“十二五”期间中国电力行业发展状况的基础上，探讨未来各类非化石能源发电和需求侧管理的发展趋势，通过引入 IRSP 模型测算，利用不同情景研究中国中长期化石能源和非化石能源发电的变化以及发电二氧化碳排放趋势，并结合当前中国电力领域遇到的突出问题提出相关政策建议。

2. 中国电力行业发展现状^①

进入“十二五”以后，受国际欧债危机持续发酵及国内经济转型升级带来的经济增速回落影响，中国电力供需呈现总体宽松态势。从电力需求来看，全国全社会用电量从 2010 年的 41999 亿千瓦时，增长到 2015 年年底的 55500 亿千瓦时，“十二五”期间用电量年均增速约为 5.7%，并且增速呈现逐年放缓的趋势；而全国最大用电负荷从 2010 年的 58822 万千瓦增长到 2015 年的 79773 万千瓦，“十二五”期间用电负荷的年均增速高于用电量增速，约为 6.3%。

从发电侧看，“十二五”期间，随着非化石能源发电装机容量和发电量占比不断提升，中国的发电结构不断得到优化，全国装机容量从 2010 年的 96219 万千瓦增长到 2015 年的 150673 万千瓦，年均增速达到 9.4%；2015 年火电装机容量占总装机容量的比重较 2010 年下降了 7.7 个百分点，水电占比下降 1.0 个百分点，核电上升 0.7 个百分点，风电上升 5.3 个百分点，太阳能上升 2.8 个百分点。而全国发电量截至 2015 年年底达到 56045 亿千瓦时，2011—2015 年年均增速达到 5.8%；火电发电量占总发电量的比重从 2010 年的 80.8% 下降到 2015 年 73.1%，水电发电量占比增长了 3.7 个百分点，核电增长了 1.2 个百分点，风电增长 2.1 个百分点，太阳能增长 0.7 个百分点。

^① 中国电力企业联合会主编：《2011—2015 年中国电力工业统计资料提要》，2016 年。

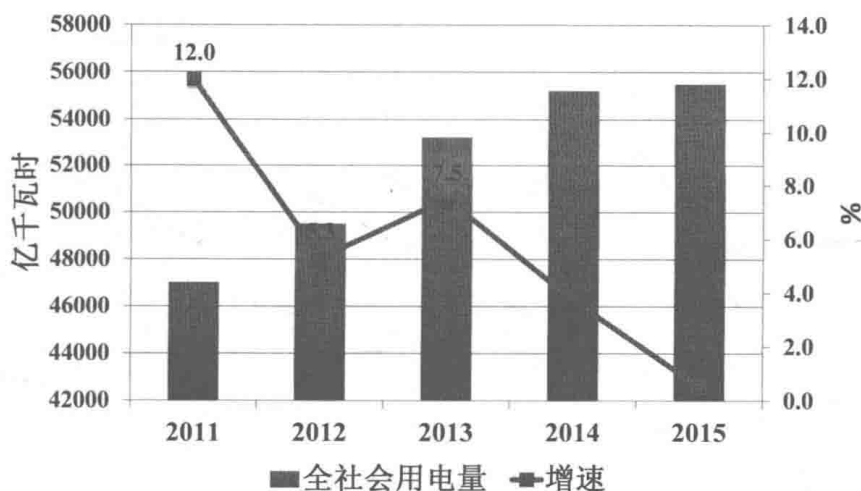


图 1 2011—2015 年中国全社会用电量情况

资料来源：中国电力企业联合会（以下简称中电联）。

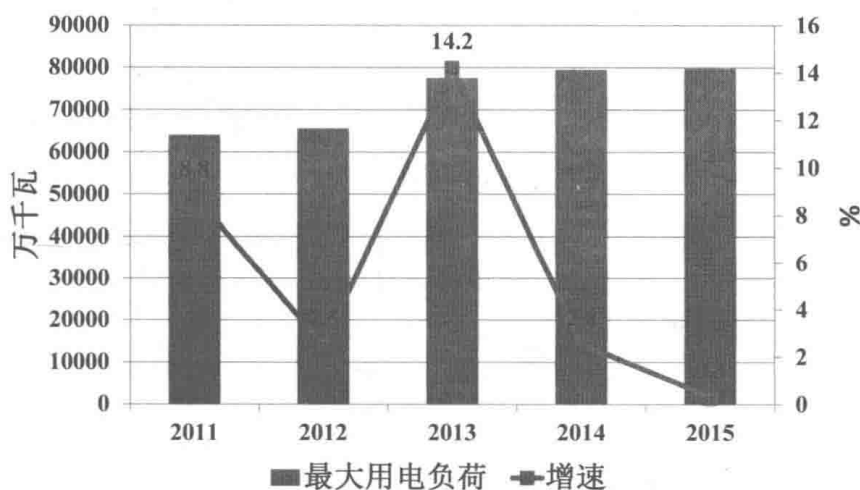


图 2 2011—2015 年中国最大用电负荷情况

资料来源：中电联。

然而与非化石能源发电快速发展相伴的“弃水”“弃风”“弃光”问题不断严重。2015 年全国“弃水”电量达到约 200 亿千瓦时，主要集中在四川和云南两省；弃风电量 328 亿千瓦，平均弃风率为 15%，主要集中在“三北”地区，东北、西北尤为严重；弃光电量 47 亿千瓦时，弃光率为 11%，集中在甘肃、新疆、宁夏和青海四个省区。当前水、风、光非化石能源的消纳问题与

缺乏统筹规划、系统调峰能力有限、外送通道不足等因素密切相关，迫切需要未来的电力系统必须做好各地区非化石能源发电与化石能源发电以及需求侧管理的协调规划。

“十二五”期间，节能减排取得重大进展。2015年全国6000千瓦及以上火电机组供电标准煤耗315克/千瓦时，相比“十一五”末下降18克/千瓦时，继续保持世界先进水平，超额完成国家《节能减排“十二五”规划》确定的2015年325克/千瓦时的规划目标；随着电网建设、运行和管理水平的快速提升，2015年全国综合线损率为6.6%，已接近国际先进水平。2014年，国家发展改革委、环保部、国家能源局联合印发《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020）》，提出全国新建燃煤发电机组平均供电标准煤耗低于300克/千瓦时；到2020年所有现役燃煤发电机组改造后平均供电煤耗低于310克/千瓦时，并进一步要求稳步推进东部地区现役燃煤发电机组实施大气污染物排放浓度基本达到燃机排放限值的环保改造。在这一背景下，部分省份发布了燃煤机组超低排放改造名单，电力企业相继开展超低排放改造工作，2015年全国已完成超低排放改造机组容量约1.4亿千瓦，全国电力烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放量分别约为40万吨、200万吨、180万吨，排放量大幅下降。随着发电结构及火电结构的优化，我国电力碳排放强度也呈现持续下降趋势，2015年，全国每千瓦时火电发电量二氧化碳排放约为850g，比2005年下降18.9%；每千瓦时发电量二氧化碳排放约627g，比2005年下降26.9%。

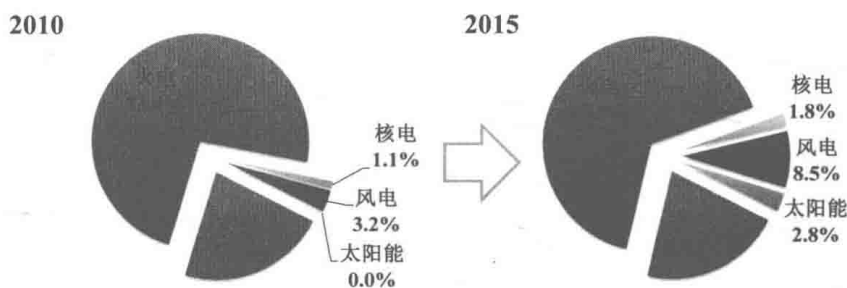


图3 中国发电装机结构变化

资料来源：中电联。

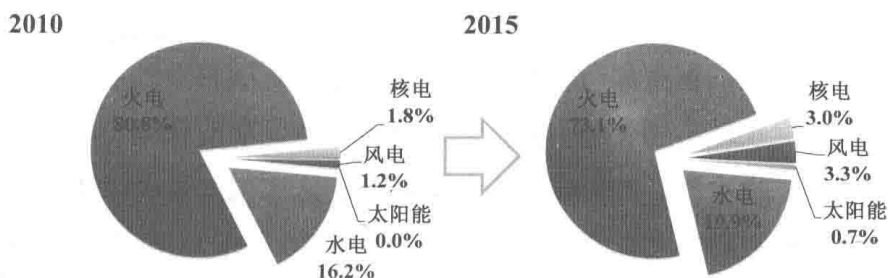


图 4 中国发电量结构变化

资料来源：中电联。

3. 中国电力行业发展趋势

未来 20 年，中国电力需求增长仍然具有一定潜力，其中“十三五”期间，中国经济仍将保持中高速平稳增长，中国将逐步完成工业化^①，电气化水平稳步提高，电力需求也将保持较快增长，年均增速在 5.9% 左右；2020 年后随着中国逐渐进入后工业化阶段，工业增长大幅放缓，电力需求增速也将大幅回落，2021—2025 年年均增速将回落到 3.1% 左右，2026—2030 年继续下降到 2.2% 左右，2031—2035 增速将约为 1.4%。最大负荷与用电量增长趋势一致，“十三五”期间，最大负荷将年均增长 6.9% 左右；随着经济结构不断调整，服务业在国民经济中处于主体地位，电网负荷率和最大负荷利用小时数趋于下降，使得最大负荷的增速将高于全社会用电量的增长，2016—2020 年年均增速将约为 6.9%，2021—2025 年年均增速下降到 4.2%，2026—2030 年为 2.9%，2031—2035 年为 2.2%。

2015 年 12 月，巴黎气候大会成功举办，巴黎气候协议出台，这份协议在一定程度上代表了人类在全球层面上对环境的治理与管理进入了一个新的阶段。《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方一致同意通过的《巴黎协定》将为 2020 年后全球应对气候变化行动做出安排，我国在提交的国家自主贡献文件中向国际社会庄严承诺，将在 2030 年左右碳排放达到峰值并将争取

^① 黄群慧主编：《“一带一路”沿线国家工业化进程报告（2015 版）》，北京：社会科学文献出版社 2015 年版。

尽早达峰。电力行业作为碳排放的重点行业，占我国碳排放总量的40%左右，既是控排工作关注的重点部门，也是带动其他行业低碳转型的重要载体。2017年我国将全面启动碳市场，电力行业已被纳入其中。当前我国发电机组节能指标已处于世界先进水平，随着控排工作的深入，未来电力行业减排将更多依靠电源结构调整的贡献。中国向世界承诺到2020年，非化石能源占一次能源消费总量的比重达到15%左右，到2030年达到20%左右。截至2015年年底，这一比重仅为12%。因此，大力发展非化石能源将成为未来20年的重点任务。分发电技术看，中国水力资源丰富，技术可开发装机容量达到6.61亿千瓦，技术可开发年发电量接近3万亿千瓦时；未来，西部地区的大型水电基地建设将取得长足发展，预计到2020年，中国水电总装机容量达到3.8亿千瓦左右；2020年后，水电装机容量增长逐步放缓，水电发电量占总发电量的比重将有所下降。

风力发电经过十余年的发展，技术已经相对成熟，发展也已经从陆上风机逐步向海上风机迈进，风机单机容量逐步向大型化发展；另外为了更靠近用电负荷中心，低风速风机近年正在快速发展，可以安装于年均风速低于6.5米/秒的地区；同时风能预测和风机控制技术方面也不断改进，通过大数据技术向智能风机发展。

在太阳能发电领域，晶硅太阳能电池仍然占据市场的主导地位，且近年来的市场份额已从80%回升到90%；薄膜电池的主要方向仍在新兴的钙钛矿型电池，实验室内发电效率已接近20%；第三代太阳能电池如聚光式和层叠式光伏电池能量转化效率略有提高，但距离大规模实用化仍较远；另外光热发电由于成本过高，仍然大幅滞后于光伏发电。

半个多世纪以来，中国核能与核技术利用事业稳步发展，目前已经形成较为完整的核工业体系，中国已经充分具备了自主设计、建造、运行二代改进型核电机组的能力和条件；未来将通过消化吸收，不断完善自主研发的第三代核电技术；同时未来20年，中国将建立信息化、专业化、标准化的核电多项目管理体系，核电建设将进入稳定、安全、高效的发展期。

生物质能发电技术已经相对成熟，中国生物质能发电最大的瓶颈是原料分布不集中、燃料供应不足，产业化尚处于起步阶段。未来中国将会在生物质能