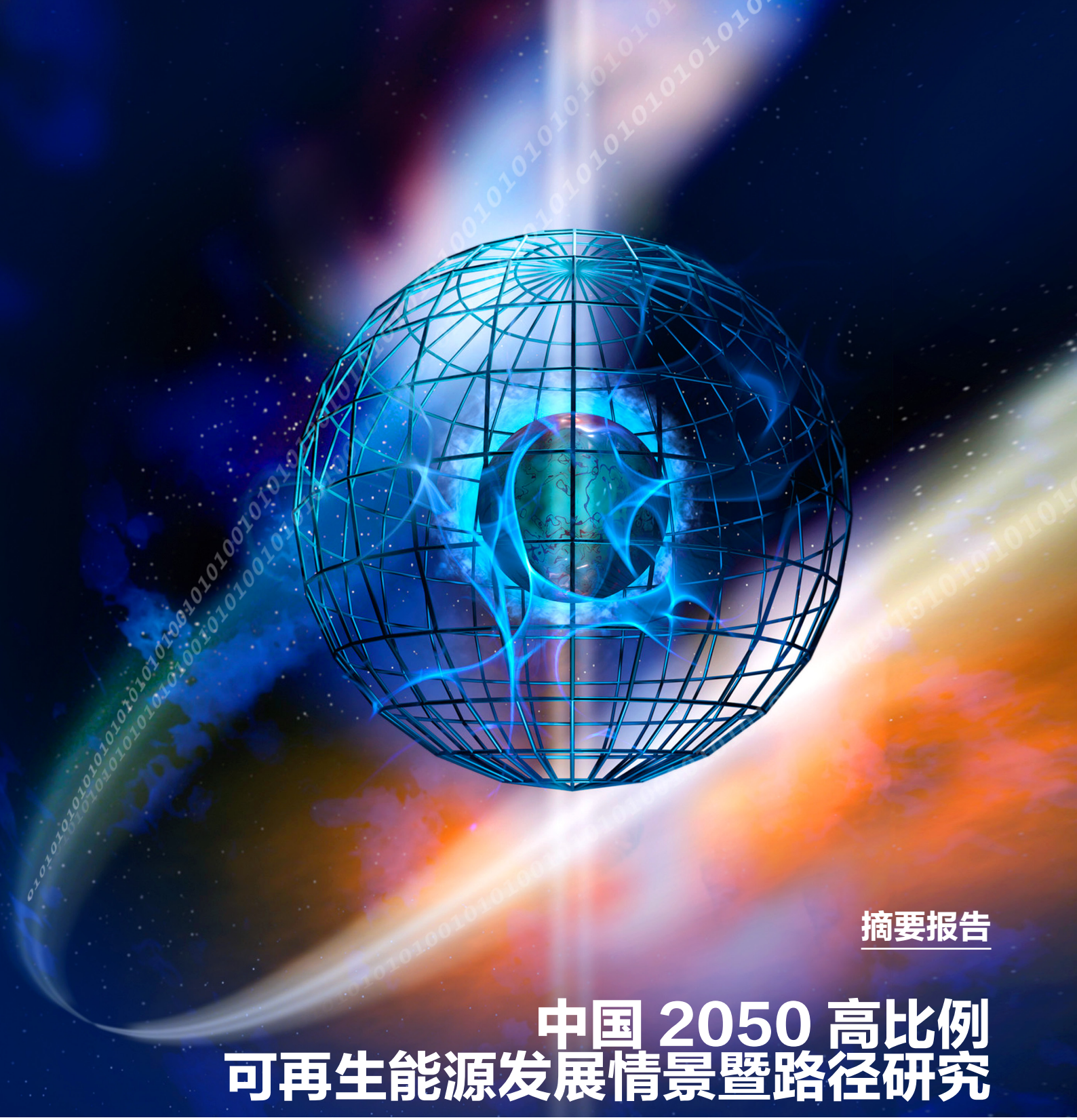


摘要报告

# 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究

# CHINA 2050 HIGH RENEWABLE ENERGY PENETRATION SCENARIO AND ROADMAP STUDY

ENERGY FOUNDATION
能源基金会

国家发展和改革委员会
能源研究所

国家发展和改革委员会能源研究所

2015 年 4 月

# 序

## 以坚定的信心走向未来高比例可再生能源发展之路

2000 多年前，中国汉代的张骞从长安带队出使，开启了探索西域的“凿空之旅”。后续历经数百年亚欧人民不断的艰辛努力，最终探索出数条东方与西方之间经济、政治、文化交流的陆路及海上通道，后人称之为“丝绸之路”。千百年来，丝绸之路的开拓精神薪火相传，推进了人类文明进步，成为世界各国共有的历史文化遗产。而在对能源生产和消费模式的探索征程上，人类也同样在持之以恒、不间断地书写社会螺旋式上升发展的崭新历史篇章。

18 世纪煤炭驱动的蒸汽机代替了人力和畜力，为工业革命大机器生产时代提供了强大动力。19 世纪末及 20 世纪，煤炭、石油、天然气、核能共同驱动了发电机和内燃机，为人类社会创造了便捷、自由的电气化和汽车时代。在这两次能源转型的推动下，发达国家在先后完成了工业化和现代化的同时也形成了化石能源资源高消耗模式。当前包括中国在内的一些发展中国家正在快速步入工业化阶段，能源消费也呈持续增加态势。

但是以传统化石能源为主的能源消费模式导致全球能源资源约束和生态环境不断恶化，化石能源燃烧导致的二氧化碳排放正导致全球气候变化，应对资源环境挑战已成为全球共同面临的重大课题。人类社会至今已经经历了三个能源时期，完成了两次能源变革，能源消费结构逐步向多元化发展。逐步摆脱对化石能源的依赖已经成为人类发展进程中已被证明的不可逆转的前进方向，为了应对全球气候变化的挑战，世界能源发展必须进入以无碳化为核心内容的第三次能源变革时代，实现“高比例可再生能源发展”则是这宏伟变革中的重要标志。“中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究”也正是为探索化石能源，特别是煤炭逐步退出主导中国能源发展所进行的情景及路径研究，为中国探索一条通往未来以可再生能源供应及消费为核心的能源创新之路。

## 一、高比例可再生能源之路坚持了市场化选择

在对高比例可再生能源发展路径的比选上，该研究坚持通过市场发现，选择有质量、有效益、可持续的高比例可再生能源发展之路。通过结合技术经济评价、能源系统优化、政策措施及社会经济评价、能源外部性分析和系统理论等方法进行决策分析，对包括能源替代、环境影响、经济拉动、社会效益等方面的各种效益和发展可再生能源的直接和间接成本投入等进行了测算。并以此为基础，从地理分布、时间分布和电力系统运营等方面，在不同情景下优化部署 2015 年 –2050 年间电力系统发展途径，并提出相应的实施路径方案。

## 二、高比例可再生能源之路践行了经济可承受

与电力系统大规模变革的其他清洁能源发电情景类似，高比例可再生能源发电情景成本分析，研究了传统发电技术占主导地位的系统变革产生的直接增量成本构成，其中燃料成本大幅下降，容量成本和输电成本上升。容量成本、储能设备和输电线路建设是实现高比例可再生能源需要支出的额外成本。这些相关增量资本投资，绝大部分都可以通过节约化石燃料的燃料成本而抵消。因此，通过可再生能源技术不断进化和完善，可以在较小成本或无增量成本的前提下，实现可再生能源发电比基年水平大幅增加。

## 三、高比例可再生能源之路强化了技术及制度支撑

要实现高比例可再生能源，我们的电力系统规划与运行还面临着很多技术和制度上的挑战。包括低需求阶段的管理，以及削减过剩发电量等。同时需要采取一系列技术与制度措施，降低弃风、弃光、弃水幅度。为了适应可再生能源发电水平的提高，需要配置更加灵活的系统。额外的远距离电力输送能力也是未来高比例可再生能源情景的一个重要特征。为了应对这些问题，该研究也从技术和制度层面进行了周密的设计研究。包括采用充足的灵活发电容量，使用储能装置和需求侧响应技术，扩展传输基础设施，提高常规发电厂调节灵活性，包括增加火力发电机组的灵活性，以及电力市场的建立，可以对与高比例风力发电和太阳能发电相关的波动性和不确定性进行适应性管理。

## 四、高比例可再生能源之路兼顾了未来与当前发展需求

为适应中国未来的能源转型形势，研究将实现高比例可再生能源发展作为国家能源战略的重要组成部分，在制定国家能源战略的过程中，应将高比例可再生能源作为实现国家 2020 年和 2030 年非化石能源发展目标和实现能源生产和消费革命的核心手段。在今后出台的所有与能源相关的发展规划中，实现高比例可再生能源发展目标都需要切实得到具体体现。按照战略规划确定的方向、重点、目标和任务，将总目标分解成不同发展阶段的具体目标，明确在不同发展阶段实现高比例可再生能源的基本条件、主要障碍、重点领域和工作重点。

## 五、高比例可再生能源之路实现了全社会受益

实现高比例可再生能源发展具备十分可观的宏观经济和环境效益。风电、太阳能、电动汽车等新兴产业成为新的经济增长点，对经济增长产生显著的拉动作用。由可再生能源发展所需的装备制造、电子仪器、气象预测预报、信息通讯等技术和产业发展需求，对

机械制造业、电子产品制造业、研发产业和服务业都有显著拉动作用。高比例可再生能源发展创造了可再生能源行业及相关产业就业人数超过共 1200 万人。可再生能源发展所需的电子、研发、电力等支持行业主要为新兴产业，高比例可再生能源发展促进我国就业人口从传统制造业向高业态产业的发展，优化了我国整体就业结构。

高比例可再生能源发展还显著替代了煤炭消耗，通过可再生能源高比例发展，将保障大气主要污染物（$SO_2$ 和 NOx）排放总量持续降低的力度和速度，并在 2050 年分别控制在 250 万吨和 270 万吨左右，主要污染物（包括重金属汞等）的排放量与 1980 年的排放水平持平，中国大地将重现上个世纪八十年代的碧水蓝天。

目前，以根本解决资源环境挑战、从根本上实现能源可持续发展为目标的新一轮全球能源转型已经启动，国际社会普遍认为可再生能源技术是实现低碳能源转型的关键，没有可再生能源的发展就无法解决气候危机，而且发展可再生能源还能实现加强能源供应和提高竞争力等多重发展目标。我们要顺应这一历史潮流，加快我国能源生产和消费革命的步伐，通过我们所有人共同的不懈努力，为全人类可持续能源的创造和开拓，贡献出自己的一份重要力量。

刘琦
国家能源局副局长
国家可再生能源中心指导委员会主任
二〇一五年四月

# 目录

CONTENTS

01
实现高比例可再生能源发展的共识及愿景

06
实践高比例可再生能源发展的未来之路

28
实施高比例可再生能源发展的行动计划

永远不要认为我们可以逃避，我们的每一步都决定着最后的结局，我们的脚步正在走向我们自己选定的终点。

— 米兰 · 昆德拉

Do not ever think about that we can escape, our every each step determine the final outcome, our foot steps are moving towards the end of own chosen target.

— Milan Kundera

# 第一章

# 实现高比例可再生能源发展的共识及愿景

人类永远在持之以恒、不间断地书写社会螺旋式上升发展的崭新历史篇章。而逐步摆脱对化石能源的依赖是人类发展进程中已被证明的不可逆转的前进方向，实现“高比例可再生能源发展”则是这宏伟征程中的重要标志。“中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究”正是为探索在中国如何使化石能源——特别是煤炭——逐步退出主导中国能源发展、使低碳绿色电力拥有未来所进行的情景及路径研究。

# 发展共识

## 强化环境倒逼约束

面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势，必须通过环境约束倒逼能源发展思路与战略转折时间点。必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念，把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。要实现这一宏伟目标，首先就要大幅度消减污染物排放量，逐步改变环境污染状况，使之能恢复到上世纪 70、80 年代水平。为此各种大气、重金属等污染物排放必须大幅削减，对煤炭消费、石油消费形成倒逼机制。另外强化能源部门温室排放空间约束，情景设定 2050 年全国能源部门和电力部门 CO2 排放空间分别为 35 亿和 15 亿吨。

## 优化比选发展路径

在广泛征询专家意见，学习总结国际先进研究内容及方法学基础上，确认并建立我国可再生能源高比例发展目标的决策思路，即结合技术经济评价、能源系统优化、政策措施及社会经济评价、能源外部性分析和系统理论等方法进行决策分析。

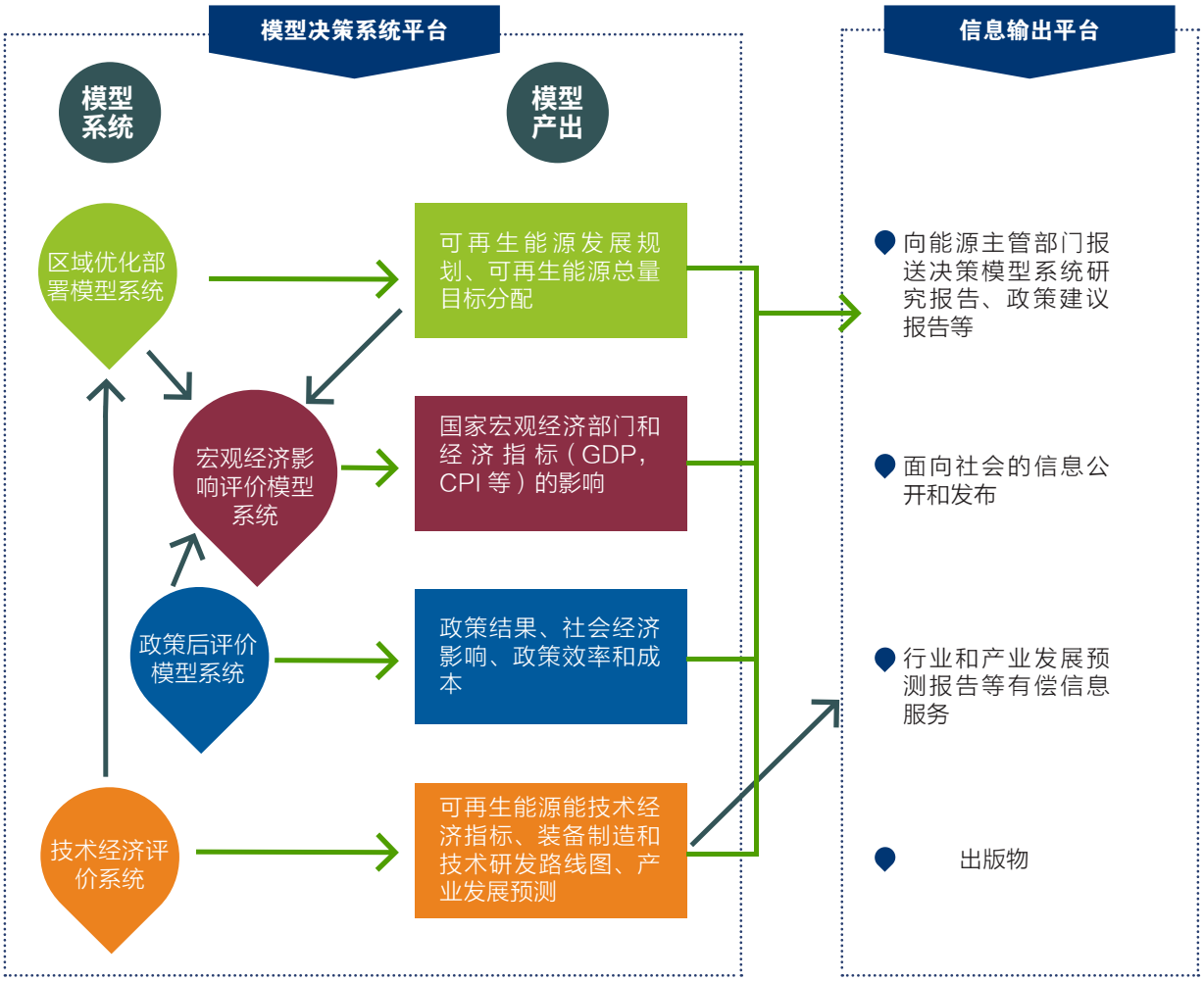



**图 1 模型簇**

本研究基于情景假设，以高比例可再生能源发展为目标，设定 2050 年全社会电力消费需求，能源资源约束，温室气体排放约束和大气污染物等环境容量约束，电力技术经济技术特性等情景信息，利用发电技术升级、电力系统运营限制，能源资源价格，以及电力需求等一系列假设条件。采用电力系统优化模型作为研究手段，以 2010 年为基准年，分析电力系统多情景下（参考、高比例）2050 年满足各项约束条件的电力系统最优经济性运行拓展方案。包括能源替代、环境影响、经济拉动、社会效益等方面的各种效益，对发展可再生能源的直接和间接成本投入等进行测算。并以此为基础，从地理分布、时间分布和电力系统运营等方面，在不同情景下优化部署 2015 年 –2050 年间电力系统发展途径，针对不同途径代价，提出可供选择的经济技术可行情景，并提出相应的实施路径方案。同时开展相关电力系统技术展望和运行管理支撑体系的研究工作。

## 实行发展目标导向

全面推动中国能源生产和消费方式重大变革，到 2050 年基本实现能源生产和消费革命。以打造清洁、低碳、安全、可靠的能源系统为目标，考虑传统能源系统锁定效应，提前统筹规划未来能源体系，提早布局能源的生产和应用模式，使化石能源在整个能源系统的比例降到最低，甚至退出历史舞台，使可再生能源在能源消费中的比重大幅提高，逐步形成以可再生能源为主导的多元、低碳、安全能源供应体系，实现能源节约、清洁能源替代、利用可再生能源充分结合的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式。

在终端能源消费和能源转换环节（电力热力生产）中大幅削减化石能源消费，使高碳化石能源比例降到最低，化石能源总消费量不超过 10 亿吨。在终端能源和能源转换环节大幅发展可再生能源，使清洁低碳能源比重显著上升并占据主导地位，到 2050 年形成可再生能源为主的能源体系，可再生能源在能源消费中的比例达到 60%以上、占总发电量的比例达到 85%以上。

# 二 发展愿景

## 社会经济——达到中等发达国家发展水平

对于本世纪中叶我国发展战略目标已经具备了清晰的定位和阐述，即人均国民生产总值达到届时中等发达国家水平、基本实现现代化、建成美丽中国，最终建成富强民主文明的社会主义国家，实现中华民族的伟大复兴。这是我国在经历多年的经验和教训后凝结成的科学共识。

2050 年，中国人口将保持在 13.8 亿人的水平，GDP 将实现 282 万亿人民币（2010 年人民币价），相当于 2010 年 GDP 的 7 倍。届时，人均 GDP 将达到 3 万美元（2005 年美元价，按当年价，人均为 5~6 万美元），中国的 GDP 将占全球的三分之一以上（2011 年，OECD 人口 12.41 亿人，GDP 总量占世界 73%；同年，中国人口 13.41 亿人，GDP 仅占世界的 10%。），中国将成为名副其实地世界第一大经济实体。

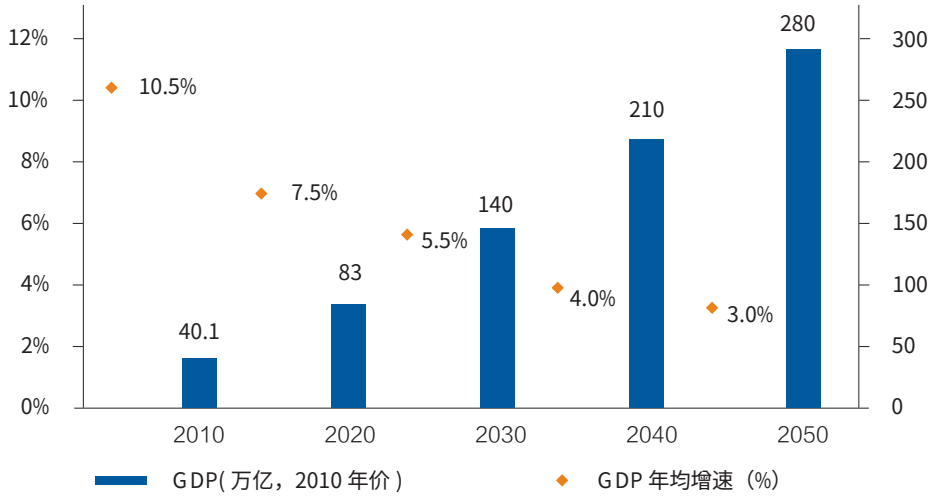



图 2 2010–2050 年 GDP 增速

## 生态环境——再现碧水蓝天的“美丽中国”

“美丽中国”的发展目标是一个具有丰富含义的战略目标，根本是要实现人与自然、人与人、人与社会的和谐。美丽中国首先是要打造一个生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的天蓝地绿水净的美好家园，

这是一切美丽的基石。实现美丽中国的行动主要体现在以下三个方面：

第一、资源集约节约利用水平大幅提高，各种资源得到全面节约。未来我国需进一步提高资源利用效率，推动资源利用方式转变，加强全过程节约管理，大力发展循环经济，大幅降低能源、水、土地消耗强度，到 2050 年能源、水、土地消耗强度应较目前下降 60~70% 甚至更高。

第二、污染物排放得以全面削减，环境大幅改善。尽管受地理、气候、扩散条件等因素影响，各时期、各国对污染物排放的环境承载力不同，但毫无疑问，我国各种大气污染物排放至少要较目前削减 50% 以上，达到发达国家当前水平或者回到上世纪 80 年代初水平。

第三、自然生态系统得到全面修复，人与自然生物和谐相处。努力构建科学合理的城市化格局、农业发展格局、生态安全格局，在生态功能区保护和建设、国家公园建设、水土流失和土地荒漠化综合治理、生物多样性保护等方面开展全方位工作，并取得切实成效。

## 能源发展——低碳绿色电力拥有未来

如果以 OECD 国家 2010 年的经济社会发展水平为参考基准线，设定中国未来能源发展的参考路径，则将会形成以煤炭为主转向油气及非化石能源，形成 2050 年煤炭、油气和非化石能源各占三分之一的一次能源供应的参考方案。2050 年需要一次能源供应量为 70 亿吨标准煤（化石能源按转换效率折成一次能源，非化石能源按热当量折成一次能源）。

根据课题研究的结果，到 2050 年，中国需要 32 亿吨标准煤的终端能源需求量，由于终端能源需求 60% 以上为电力的高比例的可再生能源发展情景，仅需要 34 亿吨标准煤的一次能源供应量，就可以满足 13.8 亿人口的生产生活需求和经济发展，2050 年的能源系统是一个高效率的系统，届时达到发达国家的平均能源效率水平。

坚持终端能源供应转型为引领，使终端能源消费的电气化程度到 50% 以上，电力总消费量提升到 13.5~15 万亿千瓦时，人均电力消费 10000~11000 千瓦时。将电力居于实现高比例可再生能源发展的中心地位，客观上是由电力特性、资源禀赋和能源发展规律所决定的。无论从电力与其他能源品种之间的关系来看，还是从保障能源安全、优化能源结构、促进生态文明建设及和谐社会建设等方面来看，电力的作用都十分重要。

电力驱动数字信息技术和通信技术为支持经济可持续发展提供着至关重要的基础作用。电力已成为信息时代的重要“血脉”。作为能源载体，电能通过输电网络和储电装置几乎覆盖了整个人类所能触及的任何地域。电力的使用标志着人类文明的进步，电能的使用率也是衡量一个国家经济发展水平的尺度。正是因为电力的重要性和普遍存在性，电力注定会在实现高比例可再生能源发展过程中成为交通、建筑、工业领域变革的重要推动力量。要实现高比例可再生能源发展就必须将电力居于中心地位，加速电力系统的变革，成为具有可再生性、多元化、分散性、灵活性以及以消费者为导向的系统，并从物质层面、操作层面、决策层面提高灵活性。

# 第二章

# 实践高比例可再生能源发展的未来之路

# 1 2050 年可再生能源能够供应 60% 以上一次能源

中国拥有种类繁多的、储量丰富的可再生能源，这有助于其在未来几十年提高可再生能源利用水平。本研究高比例可再生能源发展情景中，2050 年中国终端能源消费量为 32 亿吨标准煤，电力占整个终端能源消费的比例为 62%，同比 2010 年，终端电气化比例提高了 36 个百分点；在终端能源中，直接消费的化石能源为 9 亿吨标准煤，终端非化石能源占比达到了 66%；在终端电力供应中，非化石能源发电量占比 91%， 2050 年的一次能源供应量为 34 亿吨标准煤，可再生能源占比达到 62%，单位 GDP 能耗为 0.12tce/ 每万元，能源效率比 2010 年提高 90%。

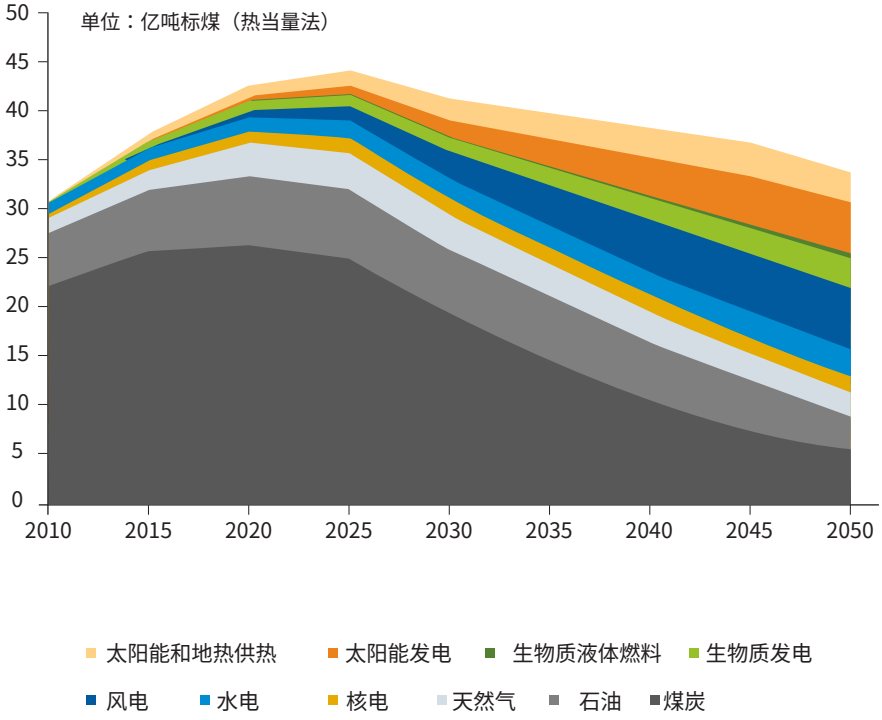



图 3 中国一次能源消费

2050 年的能源系统有两大特点：一是以高比例电气化为标志的电力为主的能源供应系统，使能源使用效率大幅度提高，各种污染物和 CO2 的排放大幅度降低；二是电力供应中，非化石能源发电量占比 91%，可再生能源发电量占比 86%，在满足同样的经济发展目标约束下，高比例可再生能源发展情景的一次能源供应量要比三分之二化石能源情景下的一次能源供应量降低 51%，即一次能源供应量从以化石能源为主的 70 亿吨标准煤降低到以可再生能源为主 34 亿吨标准煤，进而保证了 2050 年的各种污染物排放量不高于 1980 年的排放水平，碳排放强度也与 2050 年的中国经济总量和人口水平相适应。

注：2012 年之后中国为情景分析数据，美国为趋势预测数据 单位：亿吨

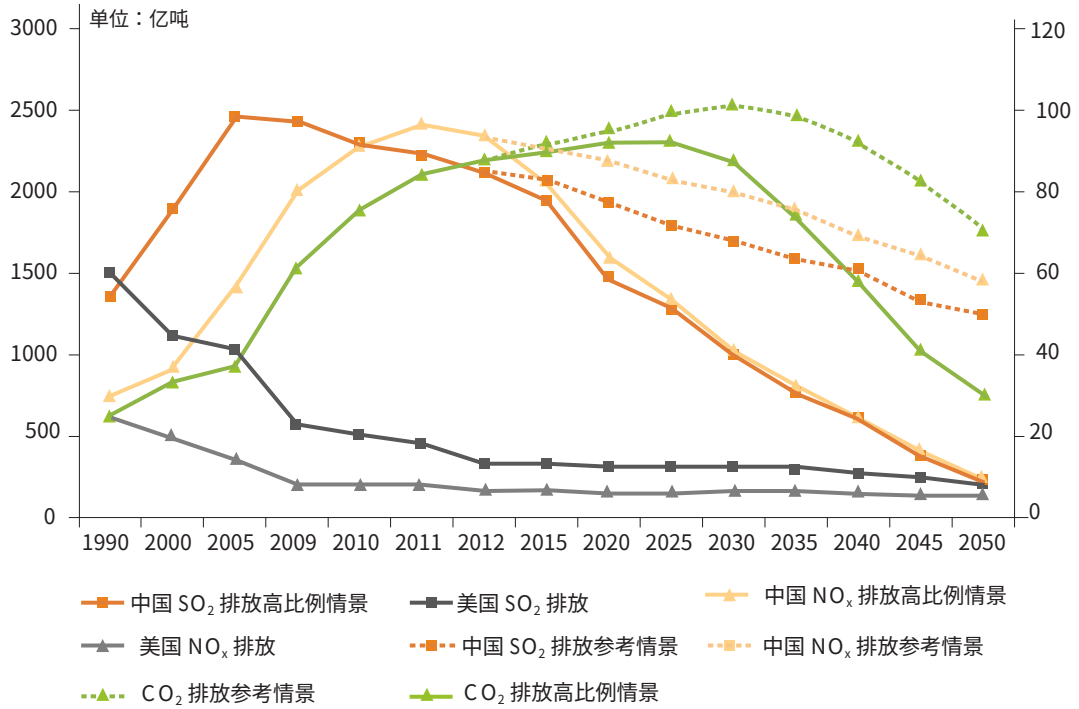



图 4 主要空气污染物排放（高比例情景与参考情景比较）

# 2 高比例可再生能源推动 2025 年前实现化石能源消费和碳排放峰值

高比例可再生能源发展情景下，煤炭消费得到有效控制，煤炭消耗峰值在 2020 年左右即可达到，进而化石能源消费峰值在 2025 年左右实现。可再生能源发电对燃煤发电进行全面替代，最大限度的降低了煤炭用量。电力、炼焦（钢铁）、制造业是中国煤炭消耗最大的三个部门，高比例情景下，可再生能源发电替代燃煤发电，使电力结构中可再生能源发电占到 86%，大大降低了煤炭用量，煤电用煤在 2020 年达到高峰 14.5 亿吨标煤，随后逐年降低，到 2050 年用于发电的煤炭仅 2.8 亿吨标煤。同时，通过废旧钢铁炼钢的电炉替代传统炼钢高炉等措施减少了焦炭用煤量，2050 年炼焦用煤降到 1.2 亿吨标煤。因此，煤炭消耗在 2020 年前达到峰值 26.5 亿吨标煤，到 2050 年降至 5.8 亿吨，在一次能源总量中占 17%。虽然石油和天然气消费还将有所增加，但化石能源消费在 2020 年至 2025 年间达到峰值，为 37 亿吨标准煤左右。

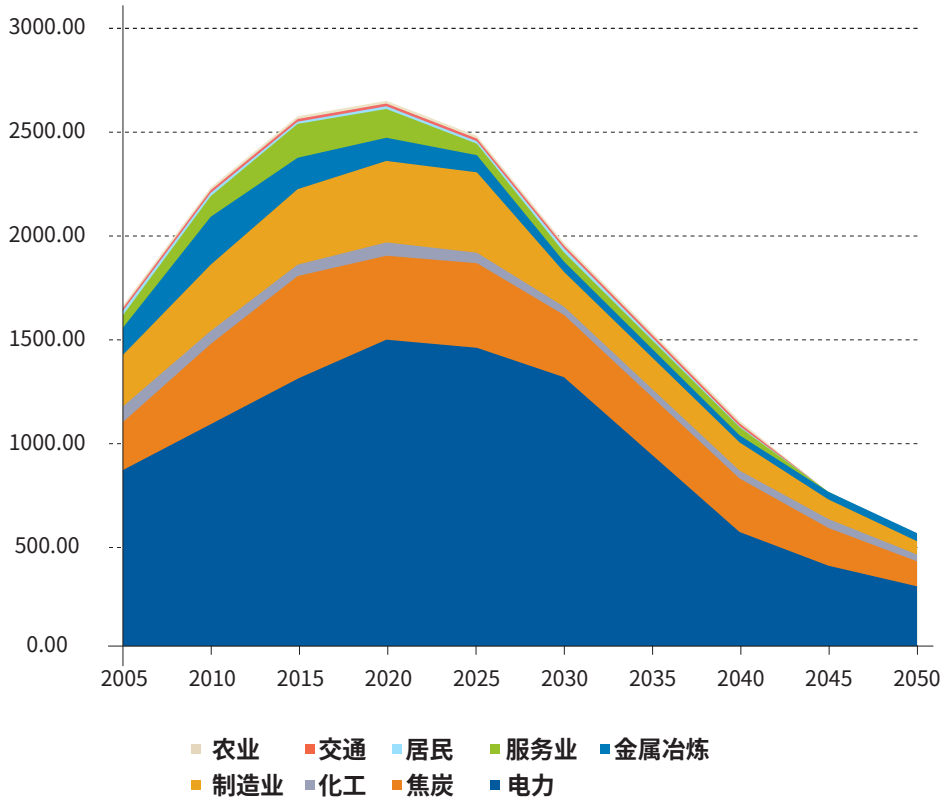



图 5 高比例情景下中国煤炭消耗分部门情况（百万吨标准煤）

中国提出在 2030 年前实现二氧化碳排放峰值，通过高比例发展可再生能源，将煤炭使用和碳排放降到更低，有助于更早实现碳排放峰值。与参考情景相比，实现碳排放峰值更低，在 2025 年左右达到 92.3 亿吨，并不断降低，2050 年二氧化碳排放量降至 30 亿吨，占全球排放量从 1/3 降到 20% 以下。

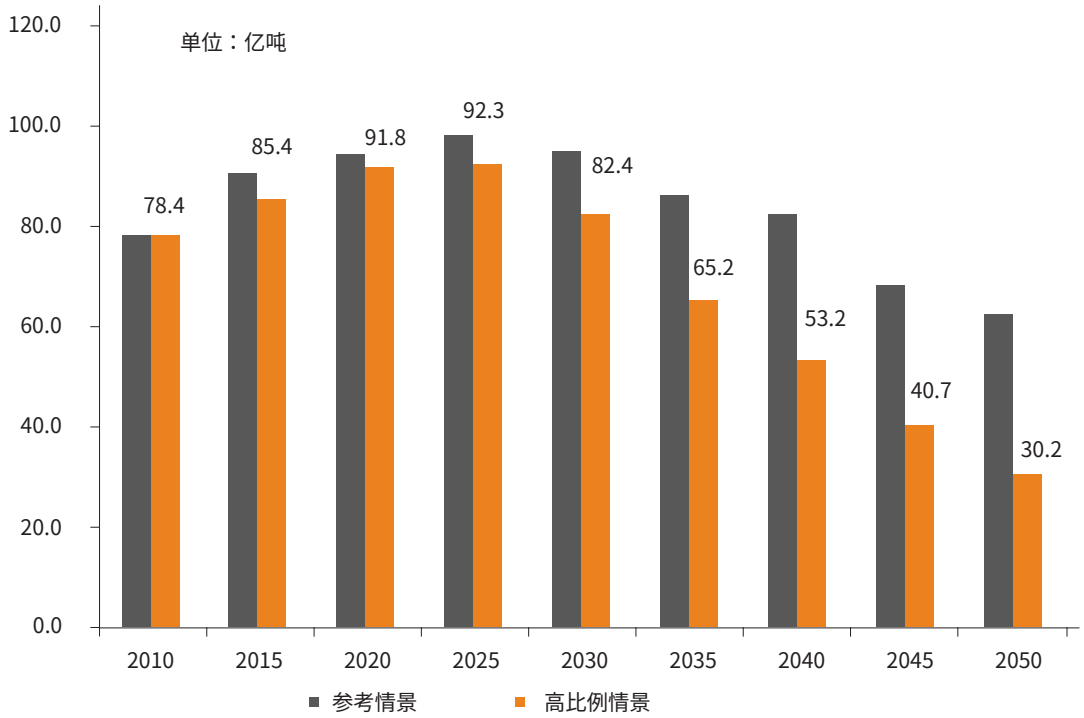



图 6 中国二氧化碳排放情况

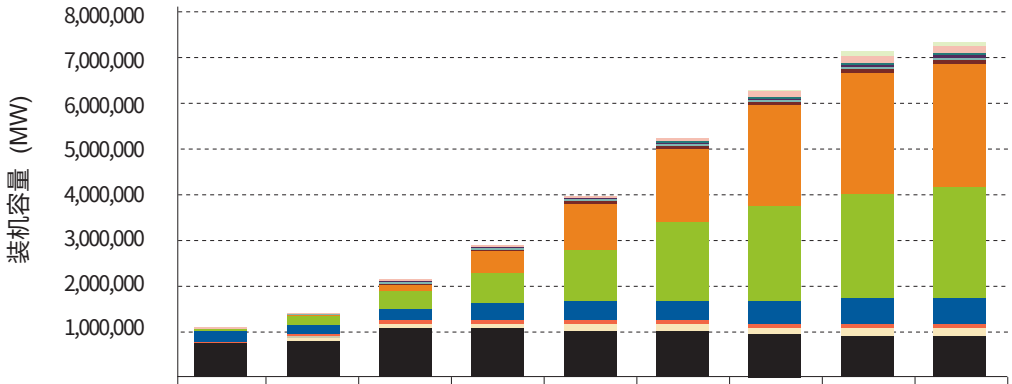
# 3 可再生能源电力是实现替代化石能源的根本途径

本研究探讨了在既定的经济社会发展目标下的可再生能源电力发展情景，其中高比例可再生能源电力发展情景也可作为未来中国电力发展的现实路径。

高比例可再生能源情景一方面考虑了强化技术进步和环境约束。通过技术经济优化决选在满足资源环境生态约束下的电力系统拓展路径，在实施既定经济社会发展目标前提下，能源终端利用的电气化转变受到重视。该情景综合考虑了经济社会的可持续发展、能源安全、国内环境和低碳之路的要求，是在强化技术进步、改变经济发展模式、改变消费方式、实现低能耗、低温室气体排放方面做出重大努力的电力需求与供应情景。该情景设想经济发展方式、电源结构优化、节能减排技术乃至生活方式引导方面均有重大改观，经济社会发展与能源、环境之间达到较和谐的发展水平。主要依靠国内能源资源，尽力争取可以实现的高比例可再生能源电力发展情景。

另一方面高比例可再生能源情景考虑了在全球一致推进可再生能源发展，降低化石能源消费的共同愿景，中国依靠自身资源潜力，最大限度的开发利用可再生能源电力的情景。中国加强对可再生能源经济投入，更好地利用可再生能源发展提供的机会促进经济社会发展。中国国内可再生能源资源潜力得到充分发挥，同时中国在一些可再生能源领域的技术开发方面世界领先，如海上风电技术、低风速风电技术、分布式太阳能发电技术、太阳能热发电技术（CSP）。

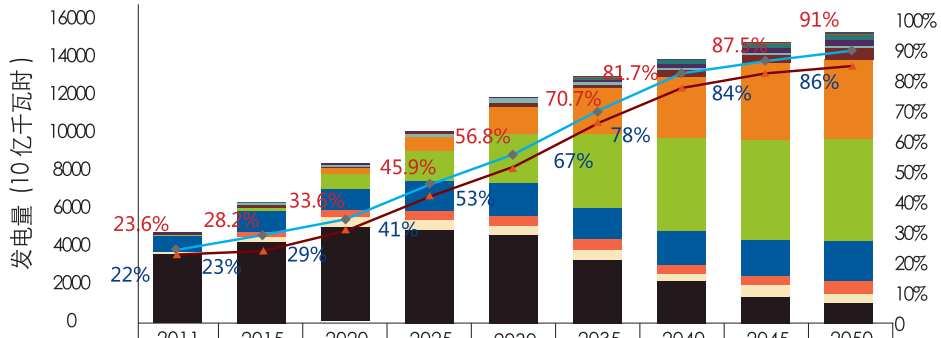
通过已实现商业化的发电技术，非化石能源发电比重大幅度提高，至2050 年可再生能源发电比重从参考情景的 46% 上升到高比例可再生能源情景的 85% 以上，非化石能源发电量占到全国总发电量 91%，煤电发电量占比从基年的占比 75% 下降到高比例情景中的 7% 以下，同时满足全国每小时的用电需求。全国总装机容量达到 71 亿千瓦，其中煤电 8.8 亿千瓦、天然气发电 2.2 亿千瓦时、核电 1 亿千瓦、水电 5.5 亿千瓦、风电 24 亿千瓦、太阳能发电 27 亿千瓦、生物质能发电 2.1 亿千瓦、抽水蓄能 1.4 亿千瓦、化学储能 1.6 亿千瓦。风电、太阳能发电成为实现高比例可再生能源情景的支柱性技术。




| | 2011 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 化学储能 | | | | | | | 47,179 | 106,061 | 158,525 |
| 抽水蓄能 | 29,608 | 38,490 | 50,038 | 65,049 | 81,311 | 93,508 | 107,534 | 123,664 | 142,213 |
| 海洋能发电 | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 地热能发电 | | | | | | 3,750 | 11,250 | 11,250 | 11,250 |
| 木质生物能发电 | | 1,100 | 1,980 | 3,221 | 4,955 | 8,200 | 12,329 | 27,465 | 32,854 |
| 秸秆发电 | 3,402 | 6,738 | 11,250 | 15,573 | 24,431 | 38,345 | 50,110 | 58,084 | 61,047 |
| 沼气发电 | 382 | 16,192 | 39,306 | 39,304 | 39,304 | 39,306 | 33,730 | 34,681 | 39,306 |
| 垃圾发电 | 2,011 | 5,040 | 8,400 | 12,574 | 18,899 | 33,484 | 54,215 | 72,544 | 80,857 |
| 太阳能发电 | 3,763 | 42,025 | 157,025 | 500,235 | 1,048,858 | 1,657,055 | 2,206,333 | 2,678,200 | 2,696,164 |
| 风电 | 48,350 | 114,880 | 317,088 | 632,176 | 1,103,944 | 1,663,348 | 2,092,248 | 2,287,630 | 2,396,591 |
| 水电 | 230,670 | 267,099 | 313,973 | 402,363 | 440,752 | 460,800 | 471,881 | 512,000 | 554,140 |
| 核电 | 12,570 | 42,790 | 50,500 | 64,000 | 66,000 | 69,000 | 78,000 | 85,000 | 100,000 |
| 燃油发电 | 1,224 | 1,166 | 1,139 | 1,098 | 1,012 | 862 | 824 | 824 | 824 |
| 天然气发电 | 32,649 | 94,273 | 110,355 | 125,909 | 130,119 | 156,818 | 173,119 | 191,750 | 219,834 |
| 煤电 | 749,062 | 822,495 | 1,083,388 | 1,079,878 | 1,052,150 | 1,037,588 | 972,299 | 928,534 | 886,691 |

图 7 高比例可再生能源情景发电装机容量

至 2050 年，高比例可再生能源情景下，全国总发电量为 15.2 万亿千瓦时，其中煤电 10380 亿千瓦时、天然气发电 4660 亿千瓦时、核电 6490 亿千瓦时、水电 21870 亿千瓦时、风电 53500 亿千瓦时、太阳能发电 43100 亿千瓦时、生物质能发电 11000 亿千瓦时。可再生能源发电量占总发电量达到 85.8%，非化石能源发电占比达到 91%。




| | 2011 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 海洋能发电 | | | | | | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 地热能发电 | | | | | | 30 | 90 | 90 | 90 |
| 木质生物能发电 | | 6 | 12 | 18 | 28 | 46 | 80 | 180 | 202 |
| 秸秆发电 | 10 | 20 | 59 | 87 | 129 | 187 | 244 | 283 | 297 |
| 沼气发电 | 1 | 63 | 118 | 118 | 118 | 118 | 111 | 126 | 139 |
| 垃圾发电 | 12 | 30 | 50 | 75 | 112 | 197 | 315 | 413 | 462 |
| 太阳能发电 | 5 | 61 | 228 | 718 | 1496 | 2445 | 3400 | 4214 | 4310 |
| 风电 | 97 | 252 | 753 | 1513 | 2595 | 3904 | 4741 | 5130 | 5350 |
| 水电 | 889 | 1031 | 1221 | 1620 | 1794 | 1790 | 1851 | 2014 | 2187 |
| 核电 | 88 | 300 | 354 | 449 | 463 | 484 | 544 | 569 | 649 |
| 燃油发电 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 天然气发电 | 67 | 267 | 522 | 559 | 563 | 553 | 524 | 467 | 466 |
| 煤电 | 3508 | 4223 | 4994 | 4868 | 4566 | 3263 | 2018 | 1387 | 1038 |

图 8 高比例可再生能源情景发电量

在高比例可再生能源情景中，可再生能源规划部署（EDO）模型在不同可再生能源发展水平下，针对已实现商业化的技术进行了不同的优化部署，充分体现了可再生能源地理分布与时间分布的多样性。陆上风电贡献最为显著，而海上风电在实现高比例可再生能源发电过程中的作用日益重要。太阳能技术中，地面光伏电站比分布式太阳能发电（屋顶光伏等）的作用更为显著。在高比例可再生能源情景下，太阳能热发电（CSP）装机增长速度更为迅速，很大程度上是因为配备储热功能的太阳能热发电可以提供更高的可调节性。生物质能发电在可再生能源组合中的占有一席之地，随着可再生能源发电比例的提高以及生物液体燃料的原料需求，将从农林剩余物发电厂向市政垃圾电厂转变。由于资源与技术经济约束，地热与海洋能比其他可再生能源的贡献相对较小，尤其是在高比例可再生能源情境下。但即便受到限制的地热与海洋能源，其估算出的可用能源潜力均得到了开发。

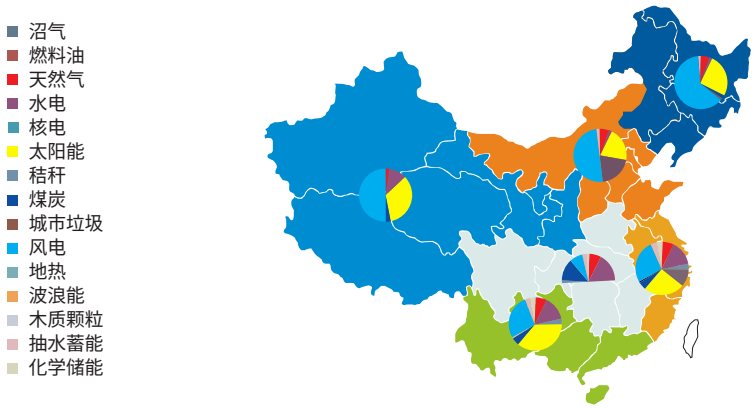



图 9 高比例可再生能源情景下 2050 年各地区可再生能源发电装机容量

# 4 风电和太阳能发电成为未来电力供应的重要支柱

2050 年将实现风电装机 24 亿千瓦、实现太阳能发电装机 27 亿千瓦，风电和太阳能发电合计为 9.66 万亿千瓦时，占全部发电量的 64%，风电、太阳能发电成为未来绿色电力系统的主要电力供应来源。由于技术突破和成本降低，以及全面深化电力体制改革的成功，2020 年至 2040 年间风电和太阳能发电得到迅猛发展，平均年度新增装机容量接近 1 亿千瓦。

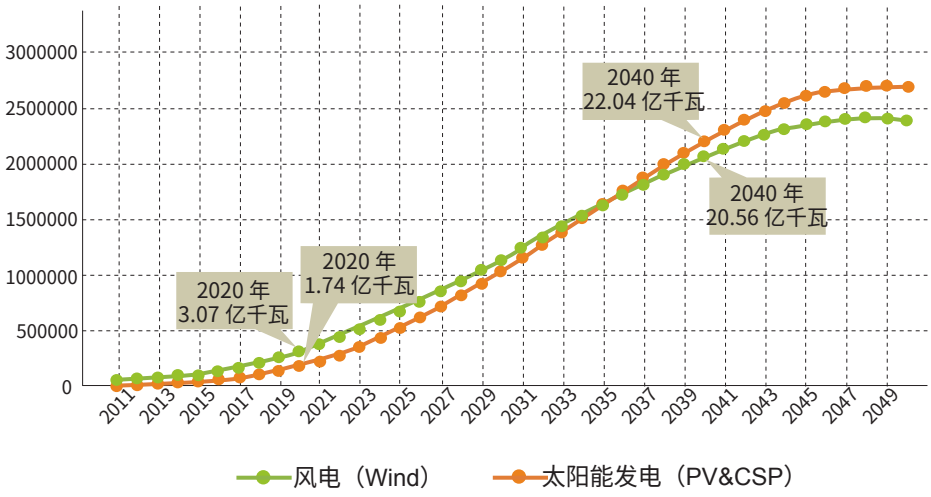



图 10 高比例情景下风电、太阳能发电发展阶段示意图

全国各区域风电均具备大规模发展的能力。2020 年前，在满足技术经济可行性的条件下，加大开发力度，推动其快速有序发展。考虑到电网基础条件和可能存在的约束，以发展规模化风电市场、建立具有领先技术标准和规范的风电产业体系为主要目标，以陆上风电为主、近海（含潮间带）风电为辅。每年风电新增装机达到 2500~3000 万千瓦左右。到 2020 年，风电累计装机达到 2.5~3 亿千瓦，届时，在不考虑跨省区输电成本的条件下，使风电的成本达到与常规能源发电（煤电）技术相持平的水平，风电在电源结构中具有一定的显现度，占电力总装机的 11%，风电电量满足 5% 的电力需求。

高比例情景中，2030 年前风电在电力市场中的经济性优势开始显现。风电市场规模进一步扩大，陆海并重发展，每年新增装机在 8000 万千瓦左右，全国新增装机中，50% 左右来自风电。陆上风电仍以华北、东北和西北地区大型风电基地建设为主，占到总风电装机容量的 70% 以上。中东部地区风电和分散式风电发展较快。海上风能资源则为河北、山东、江苏、浙江等地海上风电的开发提供了额外选择，2050 年海上风电装机容量达到 3 亿千瓦。到 2030 年，风电的累计装机超过 11 亿千瓦，风电成为满足电力需求、改善能源结构、支持国民经济和社会发展的重要支撑力量。参考情景中风电发展速度低于高比例情景，2050 年风电累计装机达到 24 亿千瓦。

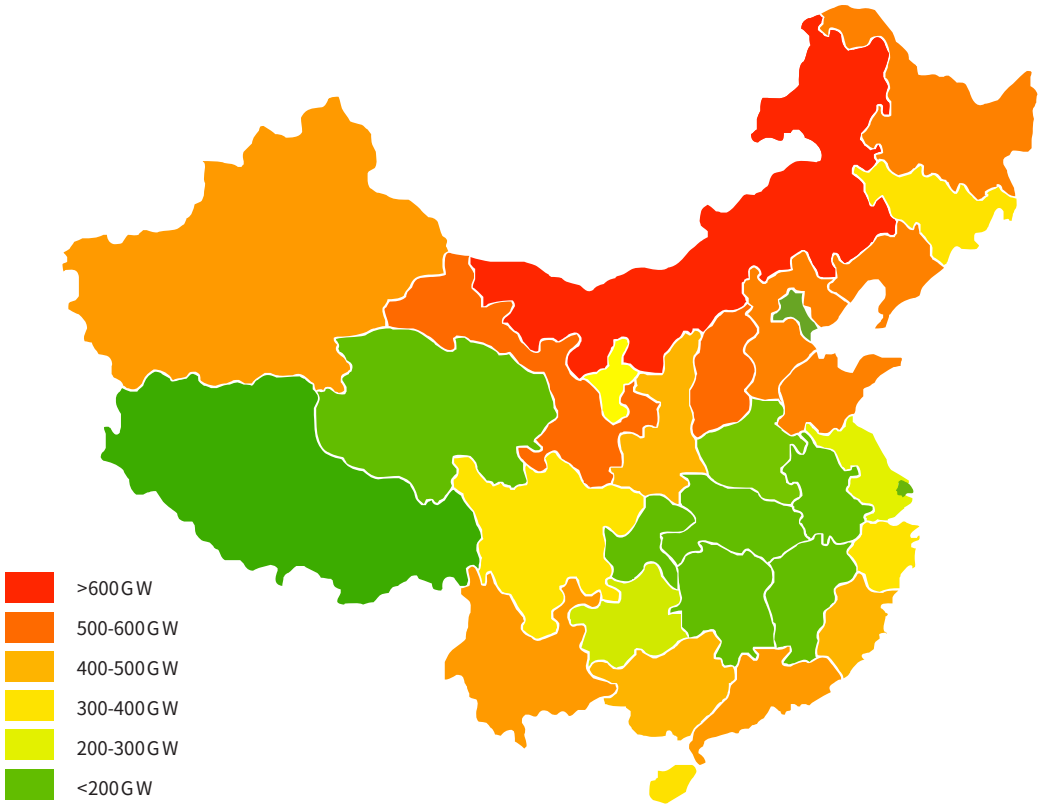



**图 11 2050 年风电发展布局**

太阳能是中国最为丰富的可再生能源。太阳能遍布整个中国，其中质量最佳的太阳能集中在中国西部地区，2020 年之前光伏市场的平均年增长率将保持在 35% 左右，则到 2020 年，光伏发电装机容量发展规模为 1.3 亿千瓦左右；2020-2030 年的平均年增长率保持 25-30%，到 2030 年，高比例情景太阳能发电装机容量达到为 10.5 亿千瓦。太阳能热发电通过规模化电站建设，形成比较成熟的太阳能槽式热发电、塔式热发电产业链。热发电成本逐步降低，到 2030 年，太阳能热发电装机容量发展目标为 5000 万 ~10000 万千瓦。

2030 年至 2050 年间，太阳能发电的经济性进一步凸显，在电力结构中的比重加快提升，高比例情景 2050 年太阳能发电装机容量达到 27 亿千瓦，其中地面光伏电站和太阳能热发电技术分别达到 19 亿千瓦和 3.5 亿千瓦。分布式屋顶光伏技术发展较为有限，约可达到 2.6 亿千瓦。

依据无电人口分布、太阳能辐射资源、用电负荷和电网条件、建筑屋面资源（大型工业园区、商业集群、公共建筑设施）以及荒漠 / 戈壁资源等资源条件等，太阳能光伏发电分类市场区域布局主要包括：（1）无电地区电力建设和离网微电网供电工程主要集中在中国西部省区和沿海岛屿；（2）分布式建筑光伏主要集中在中国中东部经济发达省区；（3）大型光伏电站则主要集中在西部 6 省区（西藏、新疆、内蒙古、甘肃、青海和宁夏）和东部沿海滩涂（山东、江苏、浙江、福建、广东、广西和海南岛）。太阳能热发电适宜开发地区主要分布在中国的西藏以及西北五省（州）。

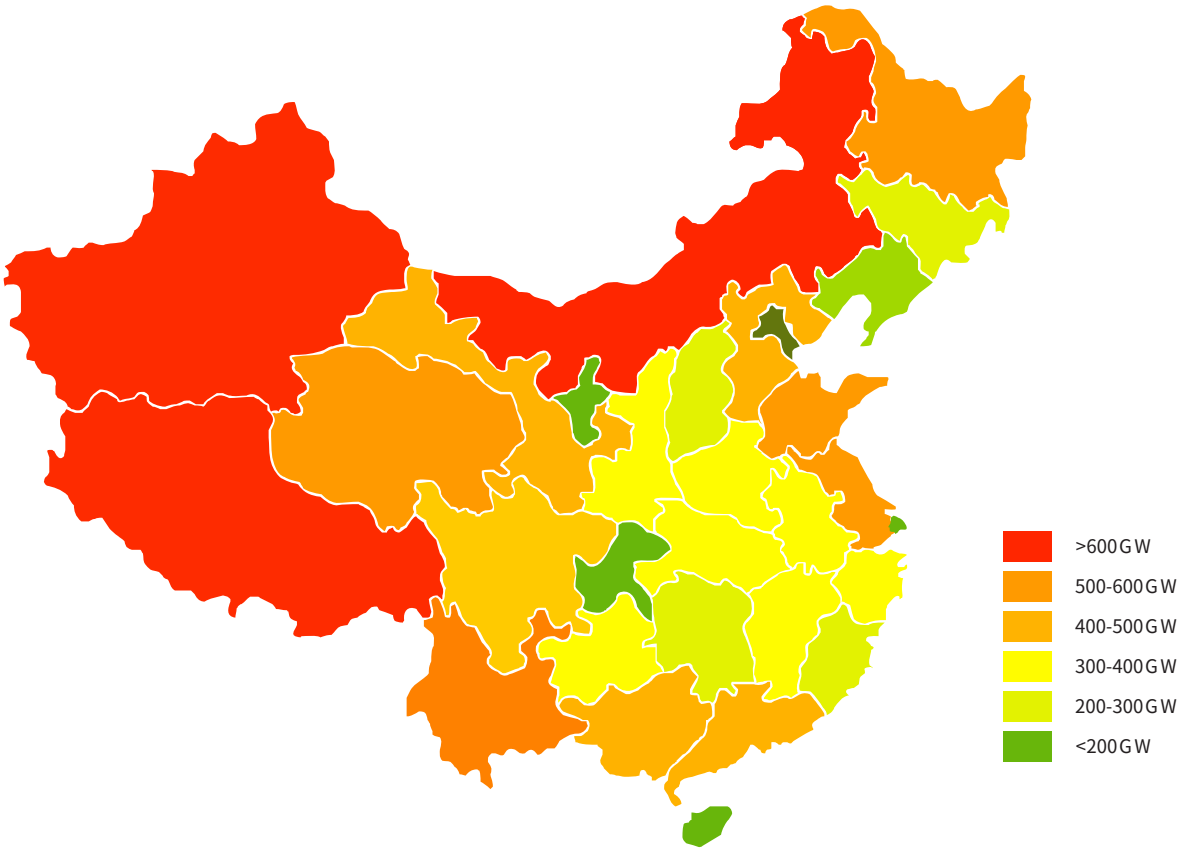



**图 12 2050 年太阳能发电发展布局**

# 5 通过扩大能源终端电力利用将人类社会推向更高级文明形态

未来能源系统的核心是电力系统，2050 年，电力占终端能源消费 60% 以上，电力将成为生产生活的主要用能方式。 在工业、建筑、交通等终端能源消费部门以及电力热力生产等能源转换部门的各个领域环节、大力推动电力和可再生能源利用，全面普及清洁电力、太阳能、生物质能（燃气）、地热能等现代化可再生能源热利用技术，提高电力在终端能源消费中所占比重。

在高比例情景下，电力和可再生能源在终端能源消费的比重进一步明显提高。2050 年终端能源消费总量为 31.57 亿 tce，电力的核心地位进一步突出，电力成为主要终端能源品种，满足 62% 终端能源需求，占一次能源供应的 61%、全部一次可再生能源的 77% 用于发电。

工业部门：加快产业技术升级和可再生能源技术的大规模利用，通过电气化、机械化生产大幅降低工业各个环节的能耗，以电力和可再生能源来替代化石能源，严格控制化石能源的消费总量。到 2050 年，中国工业部门各个领域的能耗均达到世界先进水平。在这个情景里，实现“美丽中国”的目标将得到具体的实现，工业部门将在能源结构调整中起到重要的作用。

建筑部门：建筑采暖将大量利用太阳能、生物质、地热等可再生能源，煤炭等化石能源比例逐年降低。通过集中供热、小区锅炉、热泵供热、可再生能源直接供热等途径，主要利用电力和可再生能源（生物质、太阳能、地热能等），为建筑提供供暖服务。在高比例情景下，将结束煤炭供热的时代，采取电驱动热泵、可再生能源供热和部分天然气供热，低碳甚至零碳建筑将成为普遍现象。

交通部门：高比例情景下，2020 年中国包括纯电动、插电式、燃料电池汽车在内的新能源汽车产销量达到 200 万辆，保有量达到 500 万辆。以电动汽车为代表的新能源汽车将加快普及，在 2035 年前超过内燃机燃油汽车销售量，成为主流车辆动力技术。到 2050，纯电动汽车、插电式混合动力汽车及氢燃料电池汽车将年占车辆市场保有率 86%。

社会文明：电是所有终端能源品种中，使用起来效率最高、无任何排放的能源，一个国家电气化水平的高低，即生产、生活和出行的用电水平代表了其文明程度的高低，到 2050 年，80% 以上的居民炊事将以电力为主。未来是信息的时代，是通信互联网、能源互联网和物流互联网三网高度融合的时代，三网融合时代的来临需要高比例电气化的支撑。

# 6 实现电网从单一电力输送网络向资源优化配置平台转型

随着可再生能源发电的增加，需要增加配置传输基础设施，并将符合成本效益的可再生能源生产的电力，从中国西部及北部地区，输送到负荷中心，同时实现更远距离的电力备用共享，并实现在更大的地理空间范围内平滑可再生能源出力波动性及消纳可再生能源。增加的传输基础设施从而实现更大范围的电力输送和备用共享，能够增加系统灵活性，满足风力和太阳能发电与电力负荷的变化。随着波动性发电的大规模开发利用，一些特定地区的净负荷（负荷减去波动性发电）将呈现出剧烈变化趋势。通过区域互联，扩大调度区域范围有利于降低净负荷变化。因为更广阔的调度平衡区允许系统调度使用更大规模的可再生能源资源和更多元化的发电技术，并使更广阔地区的输出和负荷状况更加平滑。高比例可再生能源情景下有三条跨区域传输容量超过 1 亿千瓦，分别为西北 – 华中、华中 – 华东和华北 – 华东。在高比例可再生能源发电情景中需要的新传输能力高于参考情景，传输需求随可再生能源电力的增加而增加。

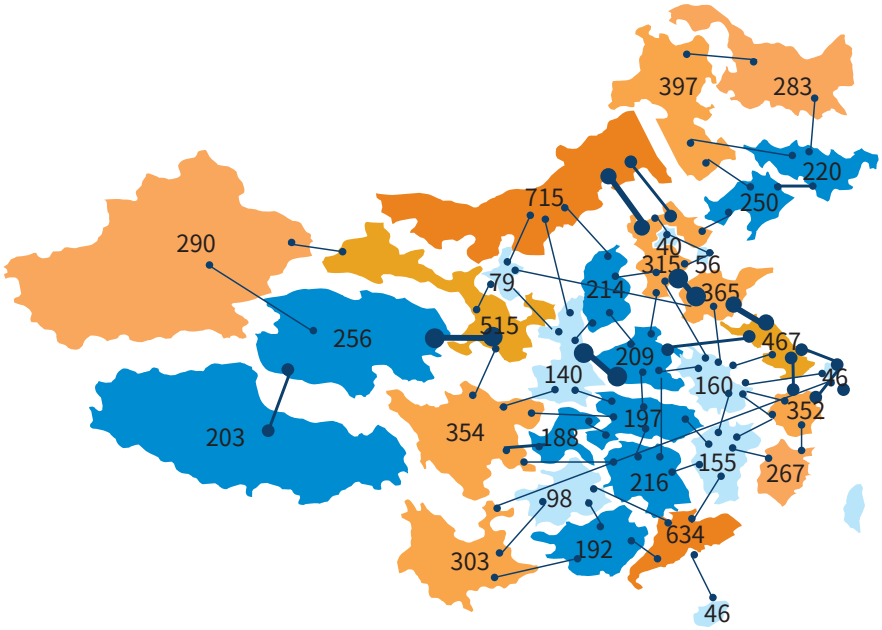



**图 13 高比例情景下省间新增输电能力需求及各省累计装机容量（GW）**

额外的远距离电力输送能力是未来高比例可再生能源情景的一个重要特征。电力生产模拟和电力传输流分析显示东西传输连接是双向的，以用来灵活响应电力供需的临时性变化，这种电力传输线路的扩展使东部负荷能更好地连接西部地区的优质可再生能源。目前还存在新传输线路的征地选址困难、项目成本分摊问题、监管机构之间的协调问题等机制性障碍，限制了大规模输电线路的扩展。

研究发现，高比例可再生能源发电情景下的新传输集中在中国中部和西部地区，主要用于连接上述地区的优质风能和太阳能资源，将可再生能源发电输送至负荷中心。

**图 14 高比例情景下跨区新传输能力需求 ( 万 kW)**

# 7 技术与制度创新是构建高比例可再生能源电力系统的基石

在高比例可再生能源情景下，电力系统规划与运行将面临更多挑战，包括低需求阶段的管理，以及削减过剩发电量等。分析发现，与目前化石燃料为主的电力系统主要关注高峰负荷（如夏季的下午时段）相反，高比例可再生能源发电情景下的运行挑战在低需求阶段（如春季的晚上时段）最为严峻，因为在低需求阶段，充足的可再生能源发电量超出需求，迫使火力发电机组缓降至最低发电水平。在当前系统和参考情景中的低需求阶段，通过火电和水力发电机组调整可满足大部分调峰需求；虽然需要运行燃气轮机，但低于高比例情景的需求。但在高比例可再生能源发电情景的低需求阶段，有充足的可再生能源发电量，导致净负荷（负荷减去波动性风能与太阳能发电量）的波动性比一年其他时间更大。而净负荷波动性的增加，将产生与提升调峰能力和系统灵活性相关的挑战。

高比例可再生能源情景下，通过采取一系列技术与制度措施，降低弃风、弃光、弃水幅度。首先，扩大输电通道容量减缓拥堵，降低削减幅度。其次，扩大储能技术规模，帮助降低提供旋转备用的在线发电机组的容量；减少以最低水平运行的发电厂数量，也可以减少对可再生能源发电的削减。第三，可以提高火力发电机组的灵活性，鼓励运行更灵活的发动机组。第四，增加能源存储和可控负荷，提高系统灵活性。最后，通过电力市场交易，在全中国甚至更大的范围的电力市场进行电力交易，在进行削减的季节或时间，新兴行业或现有行业可以利用低成本电力，由此导致需求增加，本应被削减的电力可以用于消费。

电力行业模型显示，为了适应可再生能源发电水平的提高，需要配置更加灵活的系统。通过供应方和需求方的多种选择，可以提高系统灵活性，但需要技术提高，制定新操作规程，开发商业模式和新市场规则。随着 2050 年可再生能源发电量从参考情景的 46% 提高到高比例情景的 85%，波动性发电的贡献比率将从 30% 提高到 60%。在波动性发电达到如此高比例的情况下，保证电力供应与需求之间的实时平衡更具挑战性。通过采用充足的灵活发电容量，使用储能装置（包括纯电动汽车）和需求侧技术，扩展输电基础设施，提高常规发电厂调节灵活性，包括增加火力发电机组的灵活性，可以对与高比例风力发电和太阳能发电相关的波动性和不确定性进行管理。

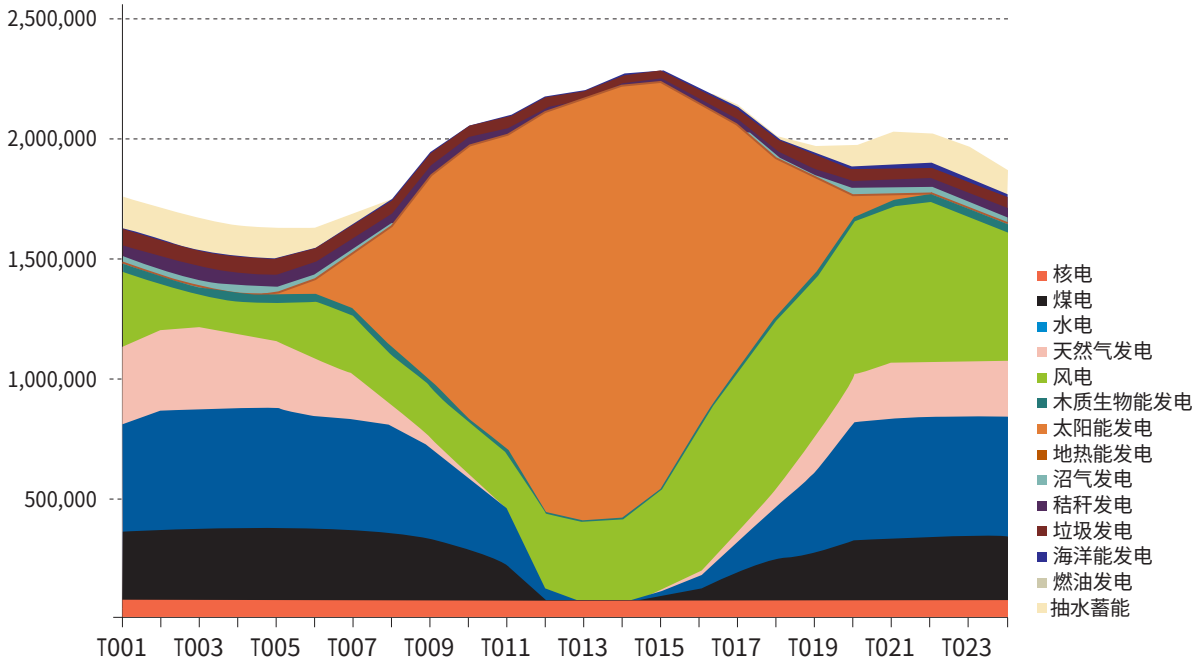


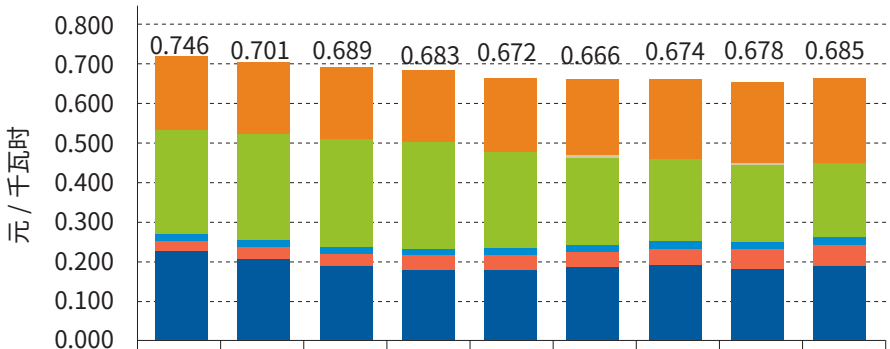

图 15 高比例可再生能源情景典型日全国发电机组小时级调度分析

通过模拟 2050 年供电系统运行情况，若可再生能源发电量达到 85%，其中约 60% 来自波动性可再生能源发电，并能平衡每个地区每小时供电与需求。图 15 按照发电技术类型，显示了在高比例可再生能源发电情景下，典型日全国发电机组出力与电力负荷匹配情况。

# 8 能够以较小成本或无增量成本建成高比例可再生能源电力系统

本研究对各情景下平均度电成本进行了量化评估，评估内容包括：输电成本、机组启停成本、燃料成本、固定成本、可变成本、容量成本。下图显示了高比例情景下平均度电成本的变化趋势及分技术平准化度电成本。

可再生技术的进步，如技术成本和性能改善，对高比例可再生能源发电情景的增量成本产生的影响最大。因此降低可再生技术成本，提高可再生技术的性能，是降低该增量成本最有效的途径。与高比例可再生能源发电相关的直接增量成本，基本相当于参考情景的估算成本。在高比例可再生能源电力情景下，平均度电成本在 2030 年至 2050 年间略有上升，基本保持在 0.672RMB/kWh 至 0.685RMB/kWh 之间。




| | 2011 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 输电成本 /Transmssion Costs | 0.180 | 0.182 | 0.183 | 0.185 | 0.190 | 0.199 | 0.213 | 0.230 | 0.250 |
| 机组启停成本 /Starp -up Costs | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 燃料成本 /Fuel Cost | 0.276 | 0.259 | 0.262 | 0.233 | 0.186 | 0.143 | 0.111 | 0.094 | 0.080 |
| 可变成本 /Varial O&M | 0.022 | 0.021 | 0.019 | 0.016 | 0.014 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 固定成本 /Fixed O&M | 0.023 | 0.028 | 0.029 | 0.035 | 0.040 | 0.044 | 0.050 | 0.053 | 0.054 |
| 容量成本 /Capital Cost | 0.244 | 0.212 | 0.196 | 0.212 | 0.240 | 0.266 | 0.285 | 0.285 | 0.287 |

图 16 高比例可再生能源电力情景度电成本趋势

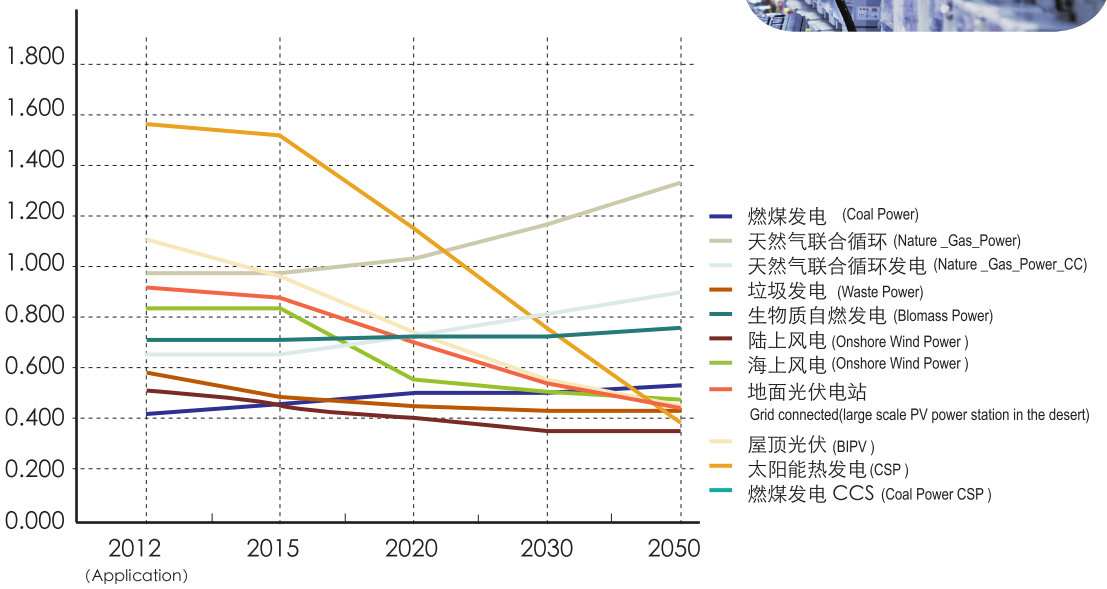



**图 17 高比例可再生能源电力情景平准化度电成本**

与电力系统大规模变革的其他清洁能源发电情景类似，高比例可再生能源发电情景度电成本分析显示出了传统发电技术占主导地位的系统变革产生的直接增量成本构成——燃料成本大幅下降，容量成本和输电成本上升。造成高比例可再生能源情景相关成本先降后升的主要因素包括：容量成本——现有发电厂更换新型发电设备（主要为可再生能源发电设备）；燃气轮机、储能设备和输电线路建设而产生的额外成本。与参考情景相比，与上述因素相关的增量资本投资，绝大部分都通过节约化石燃料的燃料成本而抵消。因此，通过可再生技术不断进化和完善，可以在较小成本或无增量成本的前提下，实现可再生能源发电比基年水平大幅增加。此外，上述增量成本分析并没有考虑与情景相关的社会成本（如温室气体排放和大气污染物造成的环境污染）或经济影响。

# 9 可再生能源作为新兴经济增长点可显著提升宏观经济发展质量

高比例可再生能源发展情景中，风电、太阳能、电动汽车等新兴产业成为新的经济增长点，对经济增长产生显著的拉动作用。我国经济总量实现从 2010 年 40 万亿元到 2050 年 280 万亿元七倍增长情况下，2050 年可再生能源相关产业链增加值总额占当年 GDP 的贡献从 2010 年仅 0.9% 显著增长到 2050 年的 6.2%。2050 年风力发电产值达到 3.8 万亿，比参考情景 1.8 万亿高出 108%，太阳能发电产值 2.8 万亿，比参考情景的 0.5 万亿高出近 5 倍。另外由可再生能源发展所需的装备制造、电子仪器、气象预测预报等技术和产业发展需求，对机械制造业、电子产品制造业、研发产业和服务业都有显著拉动作用，可再生能源相关产业链实现总增加值 17 万亿元，电动汽车生产实现增加值近 8 万亿元，分别达到经济总量的 6.2% 和 2.9%，对经济总量贡献超过 9%。

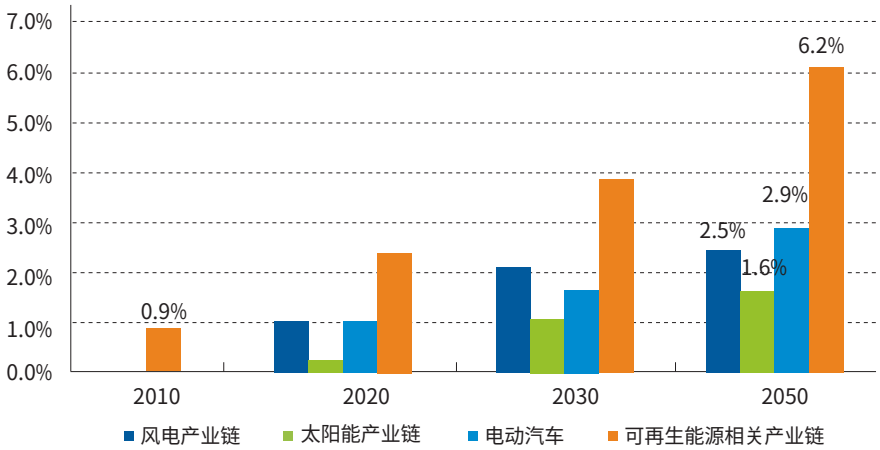



图 18 可再生能源及相关产业实现增加值对 GDP 的贡献

同时，高比例可再生能源发展创造了可再生能源行业及相关产业就业人数共 1200 万人（2050 年），其中太阳能发电和热利用，及光伏设备等产业就业岗位最多，达到 480 万人，风电及相关产业创造就业达到 380 万人。可再生能源发展所需的电子、研发、电力等支持行业主要为新兴产业，高比例可再生能源发展促进我国就业人口从传统制造业向高业态产业的发展，优化了我国整体就业结构。研究表明，传统化石能源行业如煤炭开采洗选业、炼油业、运输业等从业人员逐步减少，到 2050 年，从事电力、服务业、电子机械、科研等行业人数分别增加 261 万、162 万、141 万、96 万人。未来 40 年期间将通过新增就业人员在可再生能源相关行业择业，以及部分传统能源行业人员退休和转产，在政府转产和就业引导服务指导下，将对传统能源部门就业冲击降到最小，更有利于就业人口向更高业态转移优化。

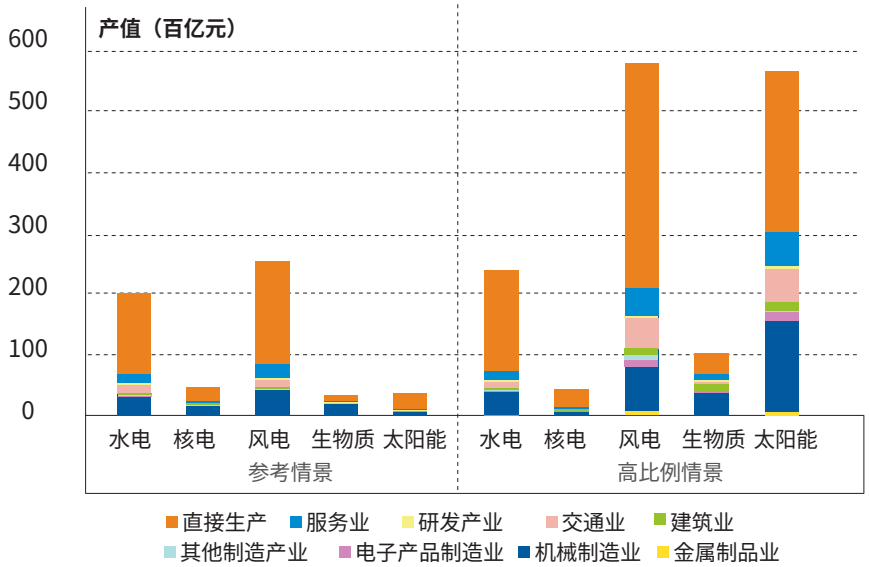



图 19 2050 年高比例情景中可再生能源对相关产业产值的带动（百亿元）

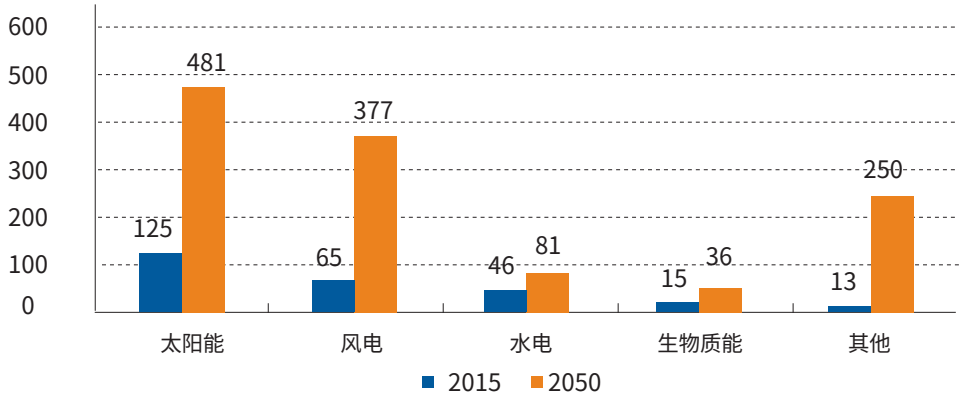



图 20 中国可再生能源及相关产业就业人数增长（万人）

总的来说，高比例可再生能源发展提升了我国宏观经济发展的质量。通过测算，高比例可再生能源发展与参考情景相比，对经济总量没有负面影响，并对调整经济结构，提升经济增长质量产生了积极促进作用。如高比例可再生能源情景中，居民消费对 GDP 的贡献得以增长，政府支出相对减少，有利于居民更公平有效的分享经济增长的成效；国际贸易总水平进一步提高，国内总物价水平得到有效控制，经济发展质量进一步优化。

**高比例可再生能源发展对宏观经济指标的影响（2050 年，万亿元）**

| | 参考情景 | 高比例情景 | 变化 |
|---|---|---|---|
| 居民消费 | 141.2 | 141.5 | +0.23% |
| 政府支出 | 33.2 | 32.8 | −1.44% |
| 出口 | 70.5 | 71.1 | +0.87% |
| 进口 | 69.6 | 70.2 | +0.88% |
| 物价水平 | 0.909 | 0.908 | −0.11% |

# 10 高比例可再生能源发展助力重现碧水蓝天

高比例可再生能源显著替代了煤炭消耗，到 2050 年我国煤炭消费总量不到 6 亿吨标准煤，仅为 2010 年的三分之一左右，化石能源燃烧排放的主要污染物和二氧化碳得以显著降低。根据测算 2050 年，中国 CO2 排放量将从现在的 100 亿吨左右降到 2050 年的 30 亿吨，比 2010 年的 67 亿吨，降低了 55%；2050 年，人均 CO2 排放量为 2.17 吨，比 2010 年世界平均水平 4.44 吨降低了 51%，比 1990 年世界平均水平人均 3.99 低 46%。

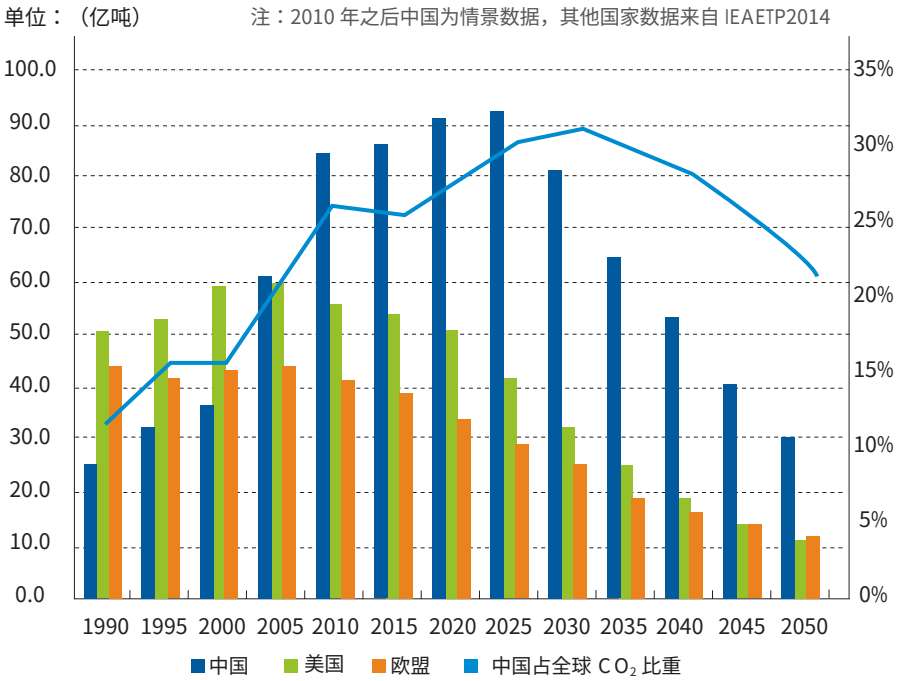
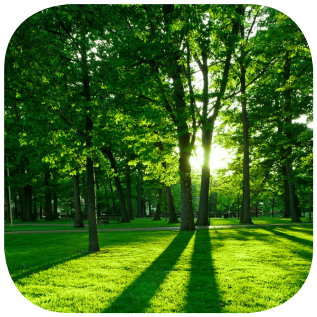



图 21 2050 高比例可再生能源发展情景下中国 $CO_2$ 排放量全球对比

如果全世界都能共同为实现全球气候变暖的 2° 目标努力的话，2050 年中国的 CO2 排放量仅是届时全球 CO2 排放量四分之一左右，同中国 GDP 占世界的比例相比，中国对世界的生态环境保护将做出巨大贡献。欧洲和美国走过一条大量排放二氧化碳的工业化道路，按照相关研究预测，欧洲和美国正在从 2005 年排放峰值逐渐降低至 2050 年排放目标。而中国



通过高比例可再生能源发展，将在更短时期内控制二氧化碳排放，以更显著的碳排放降低总量及更早达到的排放峰值，为减缓全球气候变化做出突出贡献。

中国已从“十二五”发展时期制定并实施污染物总量减排控制战略，SO2 和 NOx 总量分别从 2005 年和 2010 年达到峰值并逐年降低，通过可再生能源高比例发展，将保障大气主要污染物排放总量持续降低的力度和速度，并在 2050 年分别控制在 250 万吨和 270 万吨左右，主要污染物（SO2、NOx、重金属汞等）的排放量与 1980 年的排放水平持平，中国大地将重现上个世纪八十年代的碧水蓝天。

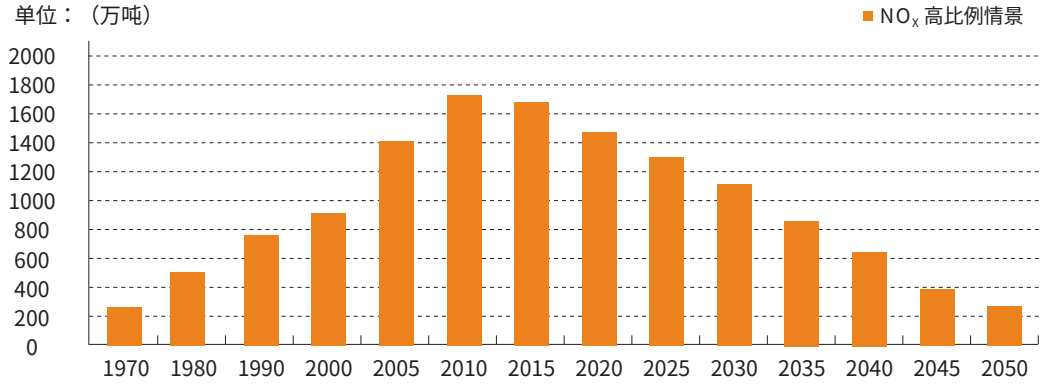



图 22 2050 高比例可再生能源发展情景下中国 NOx 排放

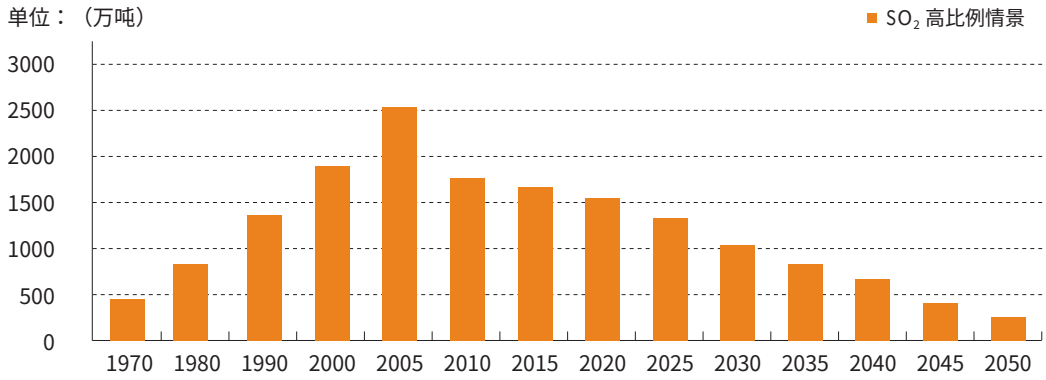



图 23 2050 高比例可再生能源发展情景下中国 $SO_2$ 排放

# 第三章

# 实施高比例可再生能源发展的行动计划

为适应中国未来的能源转型形势，应将实现高比例可再生能源发展作为国家能源战略的重要组成部分，为此在制定国家能源战略的过程中，应将高比例可再生能源作为《国家能源战略》的核心目标；在今后出台的所有与能源相关的发展规划中，实现高比例可再生能源发展目标都应切实得到具体体现。应进一步制定实现高比例可再生能源发展路线图，按照《国家能源战略》确定的方向、重点、目标和任务，将总目标分解成不同发展阶段的具体目标，明确在不同发展阶段实现高比例可再生能源的基本条件、主要障碍、重点领域和工作重点。

具体地，从目前到未来各阶段，政府部门应从战略规划和政策管理方面加强引导和推动，可再生能源行业要大力推进技术创新和可再能源开发利用，电力系统要适应新能源的特点构架公共电网服务平台和灵活电力系统，全社会要从建筑、工业、交通等终端能源部门推动清洁电力和可再生能源替代化石能源，构建清洁城镇能源体系、发展智能能源互联网，在共同建立未来能源体系，实现能源革命。

# 政府部门重大行动

## 制定实施优先发展可再生能源的清洁低碳能源革命战略与行动计划

• 按照生态文明要求确定能源领域污染物和 CO2 减排长期目标与路径，制定 2030 年能源革命战略和 2050 年远景目标，使可再生能源占一次能源消费比重届时达到 23% 和 60% 以上，使能源部门 CO2 排放在 2025 年前达到峰值、2050 年大幅下降。

• 制定实施可再生能源优先发展规划和行动计划，明确提出能源生产和终端消费部门的可再生能源发电、供热、电动汽车和生物燃料优先发展的路线图，使可再生能源实现 2020 年新增替代、2030 年后存量替代化石能源。

• 制定实施能源消费总量控制特别是化石能源消费总量控制目标和行动计划，使煤炭消费、煤电装机、石油消费分别在 2020 年前、2020 和 2025 年左右达到峰值。

• 制定实施重大基础设施建设、重大科技创新、重大公共平台的战略和路线图，引导、支持和服务行业发展。

## 建立适应新能源发电的电力市场体制机制

• 在现行年度发电计划制度下优先安排可再生能源发电的过度期后，加快建立基于市场竞争和供需的电价形成机制，发挥可再生能源边际成为为零的优势全面实现可再生能源优先调度。

• 积极引入多部制电价机制，建立容量市场、辅助服务市场，激励市场各方容量和辅助服务，推动各方提供灵活性市场服务。

• 建立跨省的区域和全国电力交易市场，打破省区间、电网间的电力市场分割。

• 建立独立交易（调度）平台机构，收回电力企业（特别是电网企业）拥有的公共权力，建立健全独立交易调度机构的公共治理机制。

• 完善推进输配电网分开，实行输配电监管。

• 完善负荷侧响应、储能等灵活市场配套管理体制机制。

## 健全促进可再生能源公平竞争的绿色税制和碳交易市场体系

• 推进绿色税制转型，加快推进资源税改革、环境税和碳税出台，使化石能源价格涵盖资源耗竭和环境污染外部成本，确立可再生能源的公平竞争环境。

• 建立运行碳排放总量控制和交易体系，推动更大范围排放权有偿发放，逐步加强碳排放约束，推动提高化石能源使用成本和控排主体转为使用可再生能源。

• 在近中期利用资源税、环境税、碳税和碳排放权有偿拍卖收入，增加可再生能源等清洁低碳能源的扶持资金投入。

## 全面建立适应新能源发展的法律保障、综合管理和专业监管体系

• 坚持立法先行和协调立法，出台《能源法》、修订《电力法》、完善《可再生能源法》，在各层面明确可再生能源的优先发展地位和重大机制，强化可再生能源优先发展及体制机制变革的法律保障。

• 强化综合管理职能和约束力，切实强化规划的统筹科学制定和实施机制，切实发挥引导、规范和协调作用，打破条块割据和市场封闭，在全国层面综合统筹、优先开发利用可再生能源和新能源。

• 推进可再生能源项目投资管理制度改革，适应可再生能源项目的规模相对较小、投资建设运营主体多元的特点，最大程度上放开项目投资，促进和吸引全社会投资开发利用可再生能源。

• 建立现代专业能源与电力监管体系。改革落后的传统监管的方式，建立与综合性能源管理相配套的规范化、标准化、数字化的专业监管方式，强化法律、规范、标准、监测系统等手段。

# 二 可再生能源行业重大行动

## 重大公共平台建设和技术研发及产业化

- 资源数据库和图谱，提供风能太阳能等可再生能源资源精细化评估结果服务。
- 公共技术平台，包括风电、太阳能发电、微电网等公共技术研发和服务平台。
- 技术研发，重点推进高效风电、太阳能发电、生物质发电、中高温太阳能供热集成应用等核心关键技术研发、示范和推广应用。

## 持续大规模发展可再生能源发电

水电：理顺管理、移民和神态环保体制机制，不断开发 13 个大型水电基地以及各类小水电，确保每年保持按一定的增长率平稳增长，适时开发藏东南水电接续基地。

风电：有序推进“三北”和沿海地区大型风电基地建设；加快开发内陆地区分散风能资源，积极稳妥推进近海风电发展，远期积极在较深水域、离岸较远海域发展海上风电。

太阳能发电：西部地区建设大型光伏电站，在城乡全面推广分布式光伏发电，推动太阳能热发电产业化，全面推进太阳能发电的多元化利用；光伏和热发电均实现大规模应用，成为主力电源。

生物质能发电：积极高效发展各类生物质发电，全面促进实现资源高效清洁利用。

地热能和海洋能发电：建设若干试验示范项目，在远期建成一定规模商业化项目，在特殊地区和领域发挥重要作用。

## 全面推广可再生能源热利用和燃料

太阳能热利用：在城乡大面积推广低温太阳能热利用，开展中高温热利用示范。

生物质热利用：积极推广沼气、成型燃料，各种城乡垃圾（工业有机废水、畜禽粪便等），全面高效利用各种生物质资源。

地热热利用：广泛推广浅层地热直接热利用，推进地源热泵规模化应用。

电供热：结合区域供热开展试点示范。

# 三 电力部门重大行动

## 加快构建新型电网公共服务平台

科学建设跨省跨区主干电网、新型配电网和智能电网，建设综合服务型电网。构建技术先进的电力调度平台，整合与功率预测预报、实时调度运行和变电设备集中监控密切相关的工作，实现对风电等新能源调度的全过程优化和多专业协调。推动电网的功能由传统输配电网发展成为集电能传输、资源配置、互动服务为一体的综合服务型电网平台。大力推广智能微电网，建成适应高穿透率分布式发电的智能配电网；建成电能双向传输、互动服务为一体的综合服务型电网平台 。

## 优化灵活电源布局、结构和运行特性

优化运行常规能源发电，控制煤电规模并逐步转为备用和调峰电源，大规模优化发展各类灵活电源，建设天然气发电，远期充分挖掘太阳能热发电、地热能发电和核电的调节能力。协调水电项目、风电场、光伏发电站与其他传统发电电源、电网的布局和运行，因地制宜推动风 / 水、风 / 气等多种发电互补运行。

## 大规模发展负荷响应和储能

发展可调节负荷，不断扩大可调节负荷的规模，使可调节负荷的成为最重要灵活资源。布局建设一批水电蓄能电站，提高电网安全稳定经济运行水平和抵御事故能力。大力发展先进电池、压缩空气储能、纯电动气车等新型储能措施，逐步普及先进储能技术。

# 四 全社会共同行动

## 转变发展理念，人人行动成为可再生能源产消者（prosumer）

加强社会宣传，全社会要在尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念引领下，充分认识到发展可再生能源是真正实现自然资源永续利用、生态环境友好的能源发展必由之路，紧紧把握新能源革命和第三次工业革命的历史机遇，抓住分布式能源生产利用一体化、终端消费电力化和“互联网+”的发展趋势，人人行动推进清洁可再生能源生产利用，从垃圾资源分类处理利用、屋顶光伏系统、电动汽车出行和车网融合等出发，成为能源产消者（prosumer），实现人人享有能源、户户销售能源、人人受益于能源，全面迈进绿色、低碳、清洁、高效、智能和可再生为主要特征的新能源时代。

## 居民和商业部门推广建筑可再生能源供热和光伏系统

全面推广安装太阳能热水器，大力推广可再生能源供暖、制冷系统，使可再生能源成为居民和商业热水、供暖、制冷的主要补充能源。推广建筑屋顶和建筑一体化光伏发电。可再生能源成为居民和商业热水、供暖、制冷的主要能源之一。全面推广屋顶光伏系统，大规模推广新建建筑一体化光伏系统。

## 工业部门电力替代和可再生能源热利用

推动部分工业部门推进科学经济的电力替代；推动可再生能源热利用技术在一些对热能品质要求较低的工业领域如印染、纺织、食品等行业规模化应用，对工业热能能源供给起到补充作用。推动电力、钢铁、化工等对热能品质要求较高工业领域的可再生能源热利用，成为工业热能能源供给的重要能源。全面实现电力替代和可再生能源热利用技术在工业领域的应用，规模化替代常规化石能源。

## 交通部门推进电力化提供低估负荷和灵活储能

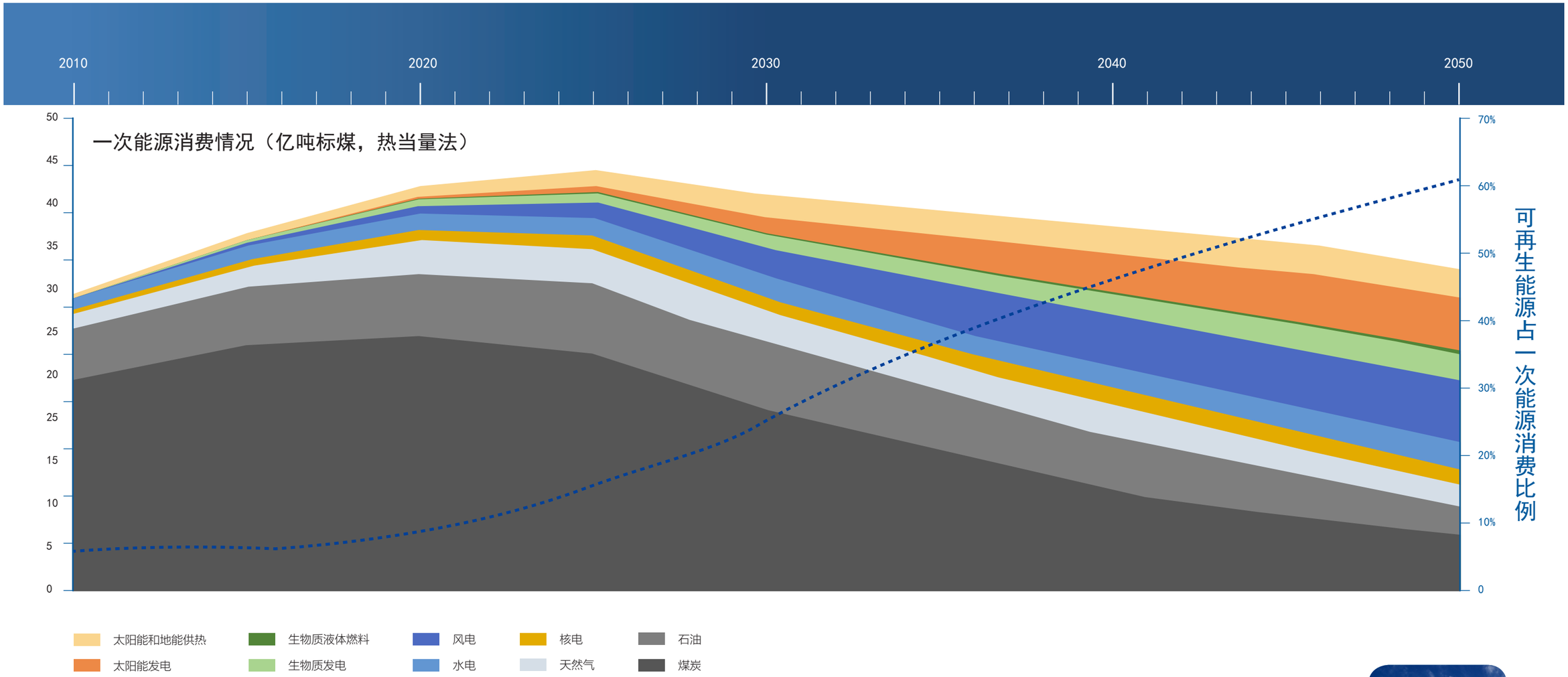
加快推广普及电动汽车，使 2020 年前电动汽车具有一定规模应用，初步发挥低谷负荷作用，到 2030 年形成上亿千瓦低谷负荷和灵活资源；

## 城镇可再生能源体系和智能能源互联网

积极示范楼宇、小区、区域微电网和综合能源网。大力推广楼宇和区域微电网和综合能源网。将能源网、物联网和互联网耦合形成“能源互联网”，将工业、建筑、交通部门各类用能设施与集中电网、管网和本地太阳能、风能、地热能等分布式能源等各种新能源高效集成，按照终端用户的需求将区域多种类的可再生能源和化石能源高效转换为冷、热、电等不同种类和品位的适用能量，形成清洁能源循环生产、多种能源有序配置的智能能源网。

## 政府、可再生能源行业、电力部门和全社会的重大行动

| | | 2017 年前 | 2020 年 | 2030 年 | 2050 年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 政府部门 | （一）制定实施优先发展可再生能源的清洁低碳能源革命战略与行动计划 | 制定 2030 年能源革命战略、行动计划和 2050 年愿景目标 | 使煤炭消费和煤电装机达到峰值；CO2 排放在 2020~2025 年达到峰值 | 化石能源消费从峰值开始下降，可再生能源替代存量化石能源 | 可再生能源满足 60% 一次能源和 80% 电力需求；CO2 排放大幅下降 |
| | （二）建立适应新能源发电的电力市场体制机制 | 放开售电侧市场；可再生能源优先调度机制；建立独立交易（调度）平台机构 | 建立竞价市场机制、多部制电价机制、跨省区电力交易市场；推进输配电网分开 | 建成智能电网支撑下的现代电力市场体系 | 形成人人自由参与的 21 世纪电力市场 |
| | （三）健全促进可再生能源公平竞争的绿色税制和碳交易市场体系 | 出台资源税、环境税；建立资源化环境税收入支持可再生能源的投入机制 | 全面建成碳交易市场，逐步有偿拍卖排放权；出台碳税 | 全面有偿拍卖碳排放权 | 全面形成绿色税制和碳市场体系 |
| | （四）全面建立适应新能源发展的法律保障、综合管理和专业监管体系 | 修订《电力法》；强化电力规划、扩大投资准入；健全监管体系 | 出台《能源法》、完善《可再生能源法》；建立与市场化改革协调的监管体系 | 建成健全的法律保障、综合管理和专业监管体系 | 形成新型能源治理体系 |
| 可再生能源行业 | （一）建设重大公共平台和技术创新体系 | 制定创新引领的技术路线图；建设风电、太阳能发电等资源评价、技术研发、检测等公共平台 | 基本建成风电、太阳能发电技术体系；风电和太阳能发电平准化度电成本平均降到 0.5 和 0.6 元以下 | 掌握可再生能源集成应用技术；风电和太阳能发电全面形成经济竞争力 | 形成引领全球的可再生技术和产业体系 |
| | （二）持续大规模发展可再生能源发电 | 建成一批海上风电、分布式光伏应用示范项目（区） | 理顺水电开发机制实现稳步开发；加快并重开发集中和分散风电、太阳能发电 | 实现水电和屋顶光伏发电全面开发；快速开发三北风电、太阳能发电 | 全面实现各类可再生能源发电技术的多元化应用，可再生能源发电比重达到 80% 以上 |
| | （三）全面推广可再生能源供热和燃料 | 开展太阳能、生物质能、地热能清洁供热技术和商业模式创新示范 | 全面推广中低温各类可再生能源热利用；推进先进生物燃料商业化示范 | 在工商业领域全面推广中（高）温可再生热利用 | 全面普及低温太阳能热利用，满足全部建筑和部分热需求 |
| 电力部门 | （一）建设新型电网公共服务平台 | 示范应用智能电网、微电网；整合应用风电、光伏发电功率预测系统。配套建设跨区输电通道 | 全面推广智能电网；建成先进的调度平台，实现大规模、分层次联合优化调度 | 大力推广智能微电网，建成适应高穿透率分布式发电的智能配电网；<br>煤电转为备用和调峰 | 建成电能双向传输、互动服务为一体的综合服务型电网平台 |
| | （二）优化灵活电源布局、结构和运行特性 | 东部控制优化煤电发展布局；加快建设抽蓄和天然气电站；提高煤电（热电联产）调节能力 | 全面控制煤电规模，扩大抽蓄电站、天然气发电规模；挖掘煤电、太阳能热发电和核电的调节能力 | 与气电成为主力调节电源；各类电源均具有调节能力 | 全面形成多元灵活电源体系 |
| | （三）大规模发展负荷响应和储能 | 示范可调节负荷和负荷响应；发展抽蓄；示范先进储能 | 扩大可调节负荷的规模；在用户侧推广先进储能 | 全面挖掘可调节负荷潜力；普及先进储能技术 | 负荷响应和先进成为重要灵活资源 |
| 全社会共同行动 | （一）转变能源发展理念，人人行动成为能源产消者 | 加强社会宣传，充分认识可再生能源是能源发展必由之路 | 人人行动推进清洁可再生能源生产利用 | 能源用户普遍成为能源产消者（prosumer） | 实现人人享有能源、户户销售能源、人人受益于能源的新形态 |
| | （二）居民和商业建筑推广普及可再生能源供热和建筑光伏系统 | 加快推广建筑屋顶和建筑一体化光伏发电。建设居民和商业建筑可再生能源热水、供暖、制冷示范项目（区） | 规模化推广等可再生能源供暖、制冷系统。全面推广屋顶光伏系统、建筑一体化光伏系统 | 全面推广可再生能源供暖、制冷系统。新建建筑普遍实现建筑光伏一体化 | 可再生能源成为居民和商业供暖、制冷的主导能源 |
| | （三）工业部门开展清洁电力和可再生能源供热替代 | 开展印染、纺织、食品行业的电力替代和可再生能源供热技术应用商业化示范 | 推动电力替代和可再生能源热利用技术在印染、纺织、食品等行业规模化应用 | 推动电力、钢铁、化工等对热能品质要求较高工业领域的可再生能源热利用 | 全面实现电力替代和可再生能源热利用技术在工业领域的应用，规模化替代常规化石能源 |
| | （四）交通部门推进电力化提供低估负荷和灵活储能 | 推广电动汽车和低谷负荷充电 | 电动汽车具有一定规模应用，初步发挥低谷负荷作用 | 全面推广电动汽车，形成上亿千瓦低谷负荷 | 普及电动汽车，提供超过 10 亿千瓦低谷负荷 |
| | （五）建设城镇可再生能源体系和能源互联网 | 示范楼宇、小区、区域微电网和综合能源网，集成应用可再生能源、电力、燃气、热力 | 示范融合居民、商业、工业、交通部门能源供应服务的城镇综合清洁能源网，试验智能能源互联网 | 将能源网、物联网和互联网耦合形成“能源互联网” | 全面建成智能能源互联网 |


2010
2020
2030
2040
2050
一次能源消费情况（亿吨标煤，热当量法）
50
45
40
35
30
25
20
25
15
10
5
0
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0
可再生能源占一次能源消费比例
太阳能和地能供热
太阳能发电
生物质液体燃料
生物质发电
风电
水电
核电
天然气
石油
煤炭

## 合作伙伴

## 技术支持单位