

2020—2060 年中国风电装机规模 及其 CO₂ 减排预测

王怡¹

(中国社会科学院 数量经济与技术经济研究所, 北京 100732)

【摘要】: 利用系统动力学模型对未来 40 年中国风电市场规模进行了预测和情景分析。研究发现: 2060 年中国风电装机将达到 20.07 亿千瓦(大约是 2020 年的 7.1 倍), 年发电量约为 3.85 万亿千瓦时, 风电在电力生产结构中的比重预计将提升至 44.09%。按照可节省的标准煤估计, 预计 2020—2060 年当年风电开发与利用累计可减少 CO₂ 排放 664.07 亿吨。研究结果可为我国有序推进风电开发和电网建设, 引导国内风电产业高质量发展, 实现碳排放达峰目标与碳中和愿景提供参考。

【关键词】: 风电 CO₂ 减排 碳达峰 碳中和

【中图分类号】: F062.1; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)07-013-09

2020 年 9 月 22 日, 中国国家主席习近平在第 75 届联合国大会上郑重宣布: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。”12 月 12 日, 习近平主席在气候雄心峰会上进一步明确, 到 2030 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65%以上, 非化石能源占一次能源消费比重将达到 25%左右, 森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿立方米, 风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上。“碳达峰、碳中和”的提出, 为我国加快推动能源生产与消费的变革、构建“清洁低碳、安全高效”能源体系指明了方向。

我国能源体系一直是一个高碳、高煤的系统。据国家统计局公布的数据, 2019 年我国一次能源消费中煤炭占 57.7%(其中, 大约一半的煤炭消费用于电力、热力的生产和供应)、石油占 18.9%。化石燃料在燃烧时会产生大量的 CO₂, 是碳排放的主要来源之一。随着人们生活水平的提高, 对电的需求量还将不断增加, 倘若不能尽快改变以燃煤发电为主的电力结构, 那么我国的 CO₂ 排放将很难实现大幅下降。

风力发电(简称“风电”)是一种清洁低碳、可永续利用的发电形式, 其分布范围广泛, 安装与拆卸灵活, 对生态环境的影响较小。根据斯坦福大学 Jacobson 教授^[1]的研究, 风电全生命周期的平均度电碳排放低于光伏、电热、水电、核电、气电、煤电等其他形式的发电技术。对于我国来说, 我国东部沿海地区人口稠密、经济发达, 但能源和土地资源有限, 在近、远海区域发展海上风电可以有效缓解这些地区能源消费对化石能源和土地资源的依赖。经过 40 年的发展, 风电目前已经发展成为我国继煤电、水电之后的第三大常规电源, 陆上风电电价与煤电电价相当, 有些地区甚至比煤电还低 0.1 元/千瓦时, 海上风电有望在 2025 年前后实现平价上网^[2]。

展望未来 40 年, 风电发展前景广阔, 未来必将在调整能源结构、节能减排、促进经济可持续发展等方面发挥更加突出的作用。那么, 到 2060 年中国风电市场将会发展成多大规模、全国风电装机的布局如何?风电在电力结构中的比重可能提升至多少?

作者简介: 王怡, 博士, 副研究员, 研究方向为能源经济、可再生能源。E-mail:wangqia@cass.org.cn

风电的开发和利用对于 CO₂ 减排的贡献有多大?回答这些问题,对于我国有序推进风电开发和电网建设,引导国内风电产业高质量发展,实现“碳达峰”与“碳中和”的美好愿景具有重要的参考意义。

1 研究背景

1.1 中国风电市场发展现状

过去 40 年间,中国风电产业走出了一条从无到有、从小到大、从弱到强的崛起之路,从“六五”(1981—1985 年)到“十三五”先后历经了科研性示范应用、商业化探索、规模化建设 3 个阶段,如今正阔步迈向风电平价时代^[3-4]。

(1) 风资源情况。

按照第四次全国风能资源详查和评价的结果,如果考虑 3 级及以上(风功率密度 ≥ 300 瓦/平方米)风功率密度条件的地区可供开发,则全国陆上(不包括青藏高原海拔高度超过 3500 米以上的区域)离地高度在 70~100 米处可供风能资源技术开发量为 26 亿~34 亿千瓦(如果考虑更高的高度,以及考虑未来风电技术进步的情况,则可装机容量还可以增加)。其中,蒙东和蒙西、新疆哈密、甘肃酒泉、河北坝上、吉林西部和江苏近海风能资源最为丰富。就海上风能资源来说,水深 5~50 米、100 米高度的近海风能资源可开发量为 5 亿千瓦。其中,台湾海峡是我国近海风能资源最丰富的地区。

(2) 风电装机与发电情况。

截至 2020 年年底,全国风电累计装机容量 2.81 亿千瓦(其中,陆上风电约 2.71 亿千瓦,海上风电约 900 万千瓦)¹,为 2005 年 225 倍,占我国全部发电装机的 12.8%,占全球风电总装机规模的 36.3%左右²。目前,风电装机已覆盖 31 个省份(港澳台地区除外,下同)。受风资源分布和建设条件的影响,陆上风电装机主要分布在内蒙古、新疆、河北等北方地区,海上风电主要集中在江苏、上海和福建三地。

2020 年,全国风电发电量达 4665 亿千瓦时,占全国总发电量的 6.3%左右,占全部可再生能源发电量的 21.1%左右。2020 年全国弃风电量约 144 亿千瓦时,平均弃风率 3%,为 2011 年以来最低。就 2019 年风力发电占电力需求的比重来看,内蒙古为全国最高,达到 18.2%,甘肃、宁夏、吉林、新疆、黑龙江、云南均在 10%以上;全国 12 个省份不足 3%。倘若考虑风电的跨省输配,那么各地区实际风电消费比重将会比这一指标的数值更低。从全球范围来看,风电在我国电力结构中的比重仍然较低。丹麦是风电利用率最高的国家,2019 年丹麦电力消费的 47%来自风力发电,陆上风电占其全部发电量的 18%左右,海上风电占 29%左右^[5]。除此之外,风力发电占比较高的国家还有爱尔兰(33%)、葡萄牙(27%)、德国(26%)、英国(22%)、西班牙(21%)、瑞典(15%)、奥地利(13%)、立陶宛(12%)、罗马尼亚(11%)、比利时(10%)等。其中,德国具有较高的风电比例,并且其产业结构中包含一定规模的工业,该国的风电比重可以作为我国中东部地区风电比重的有益参考。

(3) 风电电价。

在过去的 10 年中,得益于国产风电装备的普及、规模经济效应和技术进步(例如,采用更大容量的风电机组),风电发电成本实现了大幅下降。2019 年 5 月,国家发展改革委印发《完善风电上网电价政策的通知》(发改价格〔2019〕882 号),要求“自 2021 年 1 月 1 日起,新核准的陆上风电项目全面实现平价上网、国家不再补贴”。2020 年 1 月,财政部等单位联合印发《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》,要求新增海上风电项目不再纳入中央财政补贴范围。6 月,上海市发改委印发《上海市可再生能源和新能源发展专项资金扶持办法(2020 版)》,明确近海风电奖励标准为 0.1 元/千瓦时,单个项目年度奖励金额不超过 5000 万元,奖励时间为连续 5 年。这是我国首个地方海上风电补贴政策,对于其他地区具有较好的示范意义。

(5) 产业链情况。

过去的 15 年间,中国风电产业体系(涵盖原材料加工、零部件制造、整机制造、开发建设、技术研发、标准和检测认证体系等各个环节)日臻完善,金风科技、上海电气、远景能源、联合动力、中国海装、明阳智能、湘电风能等一些中国整机制造企业开始在国际风电市场上崭露头角。截至目前,全国风电从业人数大约 51 万人^[6]。

1.2 行业研究动态

根据国家发展和改革委员会能源研究所 2011 年出版的《能源技术路线图——中国风电发展路线图 2050》^[7],我国风电发展的整体思路是:2020 年以前以陆上风电为主,开展海上风电示范,2021—2030 年,陆上、近海风电并重发展,并开展远海风电示范,2031—2050 年,实现东中西部陆上风电和近远海风电的全面发展。到 2020 年、2030 年和 2050 年,中国风电装机容量将分别达到 2 亿、4 亿和 10 亿千瓦,到 2050 年风电将满足国内 17% 的电力需求。就目前的情况来看,我国风电发展路径基本符合这一路线,风电开发的步伐比既定目标稍快一些。

根据国际可再生能源署(IRENA)2019 年的研究报告^[8],全球风电(包括陆上风电和海上风电)的发电量占总发电量的比例将从 2018 年的 6% 提升至 2030 年的 21%、2050 年的 35%,2050 年全球陆上风电装机容量将达到 5044GW、海上风电 1000GW。到 2050 年,中国将拥有 2525GW 的风电装机容量(包括陆上风电和海上风电),大约占全球总装机规模的 42%。

根据全球能源互联网发展合作组织 2020 年发布的《中国“十四五”电力发展规划研究》^[9],2050 年全社会用电量预计将达到 14.1 万亿千瓦时,全国电源总装机 60.1 亿千瓦,发电量 14.3 万亿千瓦时。其中,风电装机 19.67 亿千瓦,发电量 4.36 万亿千瓦,占总发电量的 30.5%,为我国第一大电源。

2020 年 10 月在北京国际风能大会上,来自全球 400 余家的风能企业代表联合发布了《风能北京宣言》。宣言提出,综合考虑资源潜力、技术进步趋势、并网消纳条件等现实可行性,为达到与碳中和目标实现起步衔接的目的,在“十四五”规划中,须为风电设定与碳中和国家战略相适应的发展空间:保证年均新增装机 50GW 以上。2025 年后,中国风电年均新增装机容量应不低于 60GW,到 2030 年至少达到 800GW,到 2060 年至少达到 3000GW。

以上三份行业内关于 2050 年中国风电装机规模的预测,其结果差异性比较大,并且均未给出具体的实现路径。客观地说,在对风电装机规模进行中长期预测时,需要考虑政策、技术、成本等因素的影响,以及风资源条件、电力消费水平和电力系统灵活性的约束。鉴于此,本文试图从以下几个方面展开定量分析:(1)利用系统动力学模型,把新增装机容量和淘汰容量分别作为“流入”和“流出”、累积装机容量作为“存量”、新机位点新增装机增长率作为外生的“率量”,同时考虑运营期后风电机组“以旧换新”带来的新增容量和在新机位点安装风力发电机产生的新增容量,对 2020—2060 年中国风电装机规模、发电量和 CO₂ 减排量进行预测。(2)考虑到风电政策对预测结果的影响,在基本结果的基础上对新机位点新增装机增长率设置低、高增长率两种情景,并进行情景分析。(3)考虑到风电技术进步速度对于预测结果的影响,在基本结果的基础上对风电新增装机的平均单机容量设置低、高技术进步率两种情景,并进行情景分析。

2 模型构建

2.1 数据来源

(1) 新增和累计风电装机容量。

根据 CWEA 和国家能源局公布的数据,本文整理了 31 个省份 2006—2019 年新增风电装机容量和累计风电装机容量,并计算

出新增风电装机增长率，将其作为设定新机位点新增风电装机增长率的参考。模型初始值采用的是国家能源局在《2019 年风电并网运行情况》中公布的并网容量 4。

(2) 年利用小时数。

根据国家能源局每年年初公布的《风电运行情况》，本文整理了 31 个省份 2014—2019 年风电可利用小时数，并取这 6 年的平均值作为该地区年均利用小时数。

(3) 平均单机容量。

根据 CWEA 公布的数据，本文整理了 1991—2019 年中国新增和累计装机的平均单机容量。

2.2 模型设计

(1) 计算新增装机容量。

某年某一地区新增装机容量由两部分构成，即由公式“某年新增装机容量=当年以旧换新的新增容量+当年新机位点的新增容量”计算得到。其中，“以旧换新”是指风电场运营期结束后，在原有的机位上安装更大容量的机组，假定完成旧机组拆卸和新机组吊装需要一年的施工作业。其二，“新机位点”是指来自该地区新建风电场，或者在旧风电场内增加的新机位点。

(2) 计算淘汰容量。

假定陆上风电场运营期为 20 年，海上风电场运营期为 25 年，届时将拆卸原有旧机组。某一年风电机组的淘汰容量指运营期满需要拆卸的旧机组容量，由公式“某年淘汰容量=20 年前新增装机容量”计算得到。由于新增和累计风电装机容量数据是从 2006 年开始统计的，故本文假定 2027 年首次出现陆上风电机组“以旧换新”，当年的淘汰容量取 2006 年的累计装机容量。

(3) 计算以旧换新的新增容量。

由于风电场在最初设计时选定的机位点是风资源条件较好、投资收益比较理想的位置，并且升压站、到每个机位点道路、场内线路、送出线路等配套设施已投入使用多年。从建设成本的角度来看，在原有风力发电机基础结构上，通过更换更大容量的机组、更高的塔筒实现“以旧换新”是较为经济的方案。因而，某一地区以旧换新的新增容量是指因“以旧换新”导致的装机容量净增长，由公式“某年以旧换新的新增容量=上一年以旧换新的台数×(当年平均单机容量-21 年前平均单机容量)”计算得到，其中，“上一年以旧换新的台数=21 年前新增装机容量/21 年前平均单机容量”。

(4) 计算新机位点新增装机容量。

某年某一地区新机位点新增装机容量由公式“某年新机位点新增装机容量=上一年累计装机容量×当年新增装机增长率”计算得到。为了便于分析，根据风资源条件、风电开发情况和各地区的电力消费水平，本文将 31 个省份分为以下 5 组，见表 1。第 1 组包括内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江。这些地区风电开发较早，已形成大型风电基地，秋冬季供暖需求量较大、供暖时间较长，未来有可能出现风电直接供暖的形式，即这部分风电不再需要接到主干网，不再由电网调度。第 2 组以华北地区为主，该地区人口稠密、工业用电需求较大。第 3 组为东南沿海省份，未来该地区的新增装机主要来自海上风电。第 4 组为华中、华南和西南的内陆地区，江河湖泊较多，多数地区风资源条件一般。局部风能资源较为丰富(如鄱阳湖湖区、湖南衡山、湖北九宫山、利川以及安徽的黄山、云南太华山等)，但是这些局部风能资源丰富区普遍覆盖范围较小，不适宜大型风电基地建设。第 5

组为甘肃、青海、新疆等其他西部地区，该地区风能资源丰富、但地广人稀、当地电力消费需求有限。上述各组新机位点新增装机增长率的设定遵循以下原则。第一，各组增长率参考各地区过去 5 年新增风电装机增长率进行设置，考虑到江苏和广东等部分沿海地区因电力需求较大、发展海上风电的资源条件和建设条件较好，故将其 2020 年的增长率进行了上调。第二，全部地区 2060 年的增长率设为 1%，即在新机位点的机组吊装作业基本结束。第三，假定每个地区的增长率从 2020 年到 2060 年以某一固定常数均匀地下降(即等差数列，从而避免出现锯齿状的波动)。

表 1 各组新机位点新增装机增长率的设置

分组	省份	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
第 1 组	内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江	5.00%	4.00%	3.00%	2.00%	1.00%
第 2 组	北京	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
	天津、河北、河南、山西、山东	8.00%	6.25%	4.50%	2.75%	1.00%
第 3 组	上海、浙江、福建、海南	10.00%	8.25%	6.50%	4.75%	3.00%
	江苏、广东	15.00%	12.00%	9.00%	6.00%	3.00%
第 4 组	安徽、江西、湖北、湖南、广西、重庆、四川、贵州、云南	8.00%	6.25%	4.50%	2.75%	1.00%
第 5 组	西藏、陕西、青海、宁夏	5.00%	4.00%	3.00%	2.00%	1.00%
	甘肃、新疆	3.00%	2.50%	2.00%	1.50%	1.00%

(5) 计算平均单机容量。

如图 1 所示，2000 年我国陆上风电新增装机的平均单机容量为 0.616 兆瓦，2010 年为 1.467 兆瓦，2018 年为 2.183 兆瓦，因而本文假定 2020 年风电新增装机的平均单机容量为 2.25 兆瓦，然后每年以 0.075 兆瓦增长，2060 年增至 5.25 兆瓦。

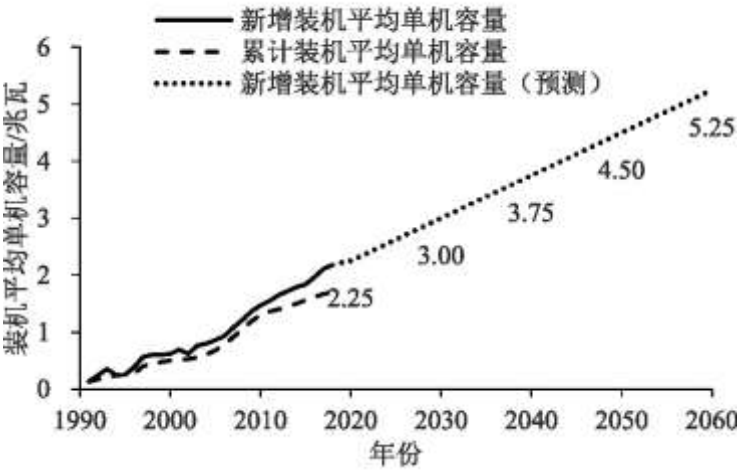


图 1 风电机组的平均单机容量

(6) 计算累计装机容量。

某年某一地区的累计装机容量由公式“某年累计装机容量=上一年累计装机容量+当年的新增装机容量-当年淘汰容量”计算得到。

(7) 计算风电发电量。

某年某一地区的风电发电量由公式“风电发电量=上年的累计装机容量×年利用小时数+当年新机位点新增装机容量×(年均利用小时数/2)+当年换新容量×(年均利用小时数/2)-当年淘汰装机容量×(年均利用小时数/2)”计算得到。需要指出的是，上式中的当年“换新”容量是指“换新”的总容量，而不是因“以旧换新”导致的净装机容量增长。考虑到新增装机和淘汰装机可能发生在年初、也可能发生在年尾，故对其年利用小时数进行减半处理。

3 基本结果与情景分析

3.1 基本结果

根据模型的计算结果，2030 年中国风电装机规模为 4.34 亿千瓦，2040 年为 9.24 亿千瓦，2050 年为 14.25 亿千瓦，2060 年为 20.07 亿千瓦(大约是 2020 年的 7.1 倍)，见表 2 和图 2。2030 年风电发电量为 0.80 万亿千瓦时，2040 年为 1.74 万亿千瓦时，2050 年为 2.72 万亿千瓦时，2060 年为 3.85 万亿千瓦时(大约是 2020 年的 8.2 倍)。倘若采用保守估计，2060 年中国电力消费为 8.29 万亿千瓦时，电力生产约 8.72 万亿千瓦时^[10](2020 年全国发电总量 7.42 万亿千瓦时)，这意味着届时风电在电力生产结构中的占比将达到 44.09%。

表 2 2020—2060 年风电累计装机规模、年发电量及其年 CO₂ 减排量预测

年份	累计装机 /万千瓦	年发电量 /亿千瓦时	由于风电生产当年 可减少 CO ₂ 排放/亿吨	年总发电量 /亿千瓦时	风电在电力 结构中的比重
2025	30809.40	5883.52	5.13	77921.20	7.55%
2030	43440.40	8048.02	7.02	80900.50	9.95%
2035	63841.48	12088.20	10.54	83482.90	14.48%
2040	92436.81	17442.14	15.21	85583.50	20.38%
2045	117845.17	22583.75	19.69	86900.00	25.99%
2050	142454.92	27194.35	23.71	87337.70	31.14%
2055	175363.48	33523.17	29.23	87219.10	38.44%
2060	200667.84	38454.11	33.53	87219.30	44.09%



图2 中国风电累计装机容量

按照2060年的风电发电量测算，当年可节约13.46亿吨标准煤，减少CO₂排放33.53亿吨(图3)，二氧化硫1.01亿吨，氮氧化物0.50亿吨，碳粉尘9.15亿吨。按2020—2060年累计发电量测算，风电的开发与利用累计可节约266.54吨标准煤(年均6.50亿吨标准煤)，累计减少CO₂排放664.07亿吨(年均减少CO₂排放16.20亿吨)。

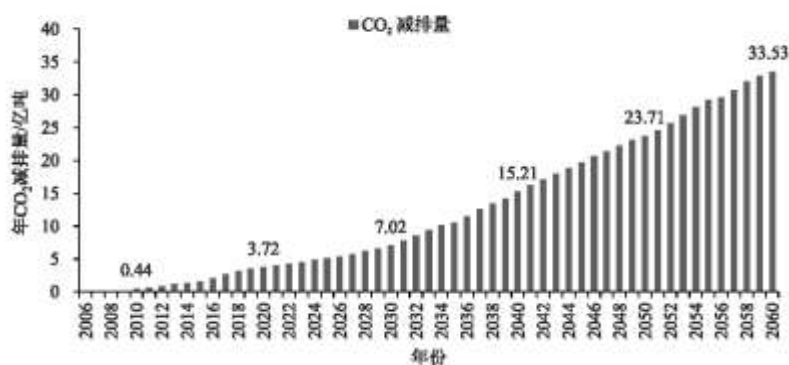


图3 风电生产带来的年CO₂减排量

就地域分布来看，2060年江苏、内蒙古、河北、广东、山东和山西的累计风电装机规模均在1亿千瓦以上，分别占全部风电装机的15.7%、10.8%、9.0%、7.0%、6.7%和6.0%，新疆、云南、宁夏、河南、甘肃、辽宁和福建的累计装机规模在5000万千瓦~9999万千瓦之间，除北京和西藏之外，其他地区的累计装机普遍在500~4999万千瓦之间。

2060年预计第1~5组的累计装机规模分别为3.60、5.08、5.45、3.18和2.76亿千瓦。如表3和图4所示，2006—2010年，中国风电分布主要集中在内蒙古和东北三省，大约占全部风电装机的一半。2011—2015年，在新疆和甘肃两地的拉动下，西部地区(第5组)风电规模不断增长，全国风电装机布局形成了第1组、第5组和其他地区“三分天下”的局面。2016—2020年，华北地区和沿海地区风电规模呈现出不断扩大的趋势，2020年第1组、第2组、第5组三地合计约占全部风电装机的75%，且它们的比重基本相当。2020—2030年，沿海地区的风电装机仍然保持着较高速度的增长，2030年第3组、第4组、第5组三地合计约占全部风电装机的一半，且它们的比重基本相当。2030—2050年，全国第1~5组这五大地区风电分布将会变得更为均衡。2050—2060年，海上风电蓬勃发展，沿海地区(第3组)成为装机规模最大的地区。

从新增装机容量来看(图5)，2011—2020年平均每年新增装机容量约1824.7万千瓦，2021—2030年约6724.3万千瓦，

2031—2040 年约 7550.5 万千瓦, 2041—2050 年约 12545.6 万千瓦。根据每年新增装机平均单机容量粗略估计(图 6), 2011—2020 年平均每年新增装机约 0.95 万台, 2021—2030 年新增约 0.90 万台, 2031—2040 年新增约 1.97 万台, 2041—2050 年新增约 1.86 万台, 2051—2060 年新增约 2.56 万台。整体来看, 2030 年后产能将比当前翻一倍, 2050 年后产能将达到当前的 2.5 倍, 2048 年之后“以旧换新”新增装机的比重将达到一半以上。

从新增装机的地域分布来看(图 7), 2020—2025 年新增风电装机主要来自华北地区(第 2 组)和沿海地区(第 3 组)。2026—2035 年, 由于东北和内蒙古地区风电机组进入到大批量“以旧换新”的阶段, 此时全国新增风电装机主要来自第 1 组。2036 年之后, 海上风电技术成熟, 新增风电装机主要来自海上风电(第 3 组)。

表 3 2020—2060 年第 1~5 组累计装机容量预测

年份	第 1 组: 内蒙古、 辽宁、吉林、黑龙江	第 2 组: 北京、天津、 河北、河南、山西、 山东	第 3 组: 上海、江苏、 浙江、福建、广东、 海南	第 4 组: 安徽、江西、湖北、 湖南、广西、重庆、四川、贵 州、云南	第 5 组: 西藏、陕西、 青海、宁夏、甘肃、 新疆
2006	44.6%	18.1%	18.3%	0.0%	19.0%
2010	51.9%	19.9%	9.0%	2.1%	17.2%
2015	31.0%	19.7%	7.9%	10.6%	30.8%
2020	23.4%	24.6%	10.8%	16.3%	24.8%
2025	21.5%	25.7%	14.2%	17.0%	21.6%
2030	21.9%	25.6%	18.0%	16.5%	17.9%
2035	22.3%	26.6%	20.3%	15.6%	15.2%
2040	19.7%	25.9%	21.9%	16.1%	16.4%
2045	18.4%	25.9%	24.5%	16.2%	14.9%
2050	16.9%	25.9%	26.8%	16.4%	14.0%
2055	18.3%	25.8%	27.2%	15.5%	13.2%
2060	18.0%	25.3%	27.2%	15.8%	13.7%

表 4 低、中、高新机位点新增装机增长率的设定

分组		低增长率		中增长率 (基本结果)		高增长率		
		2020 年	2060 年	2020 年	2060 年	2020 年	2050 年	2060 年
第 1 组	内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江	5%	1%	5%	1%	10%	1%	1%

第 2 组	北京	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
	天津、河北、河南、山西、山东	5%	1%	8%	1%	12%	1%	1%
第 3 组	上海、浙江、福建、海南	8%	1%	10%	1%	15%	3%	1%
	江苏、广东	10%	1%	15%	1%	20%	3%	1%
第 4 组	安徽、江西、湖北、湖南、广西、重庆、四川、贵州、云南	5%	1%	8%	1%	12%	1%	1%
第 5 组	西藏、陕西、青海、宁夏	3%	1%	5%	1%	10%	1%	1%
	甘肃、新疆	1%	1%	3%	1%	5%	1%	1%

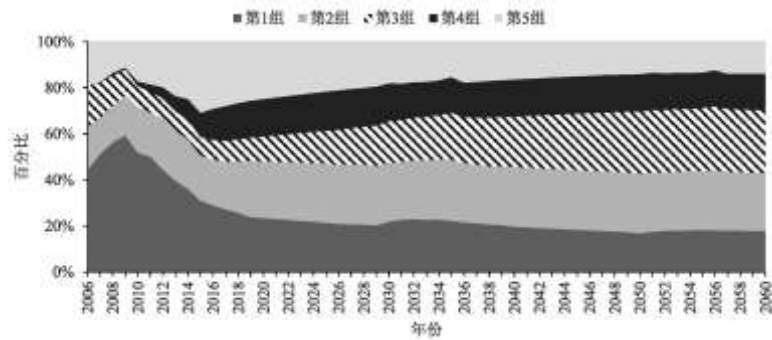


图 4 各组累计风电装机容量的比重

3.2 情景分析

(1) 政策因素。

地方政府可以通过项目审批、土地政策、贷款政策、税收政策、并网政策等来控制地方风电开发步伐的快慢，中央政府可以采取法律、法规和宏观经济手段控制风电开发的节奏。例如，为了严格控制弃风限电严重地区新增并网项目，2017 年起我国对弃风率超过 20% 的省份暂停安排新建风电规模。过快的新增装机，可能带来供应链吃紧、电气设备和施工质量问题等问题。过慢的新增装机，又可能导致市场低迷，不利于产业发展和技术进步。因而，结合电力消费水平和电网建设进度，稳步、有序地推进风电开发，对于风电产业的持续健康发展十分重要。

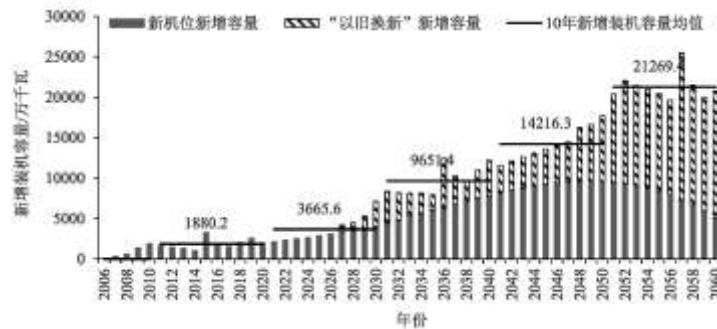


图 5 中国风电新增装机容量

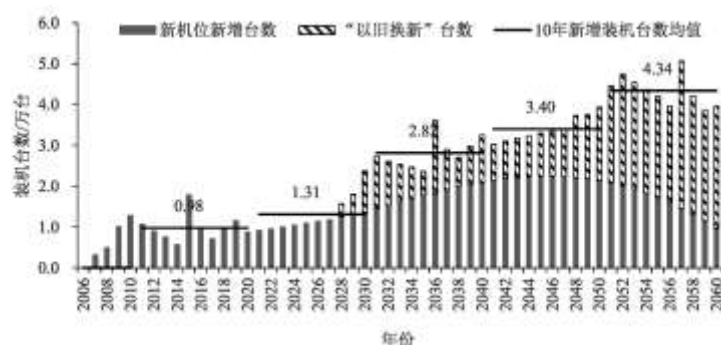


图 6 中国风电新增装机台数

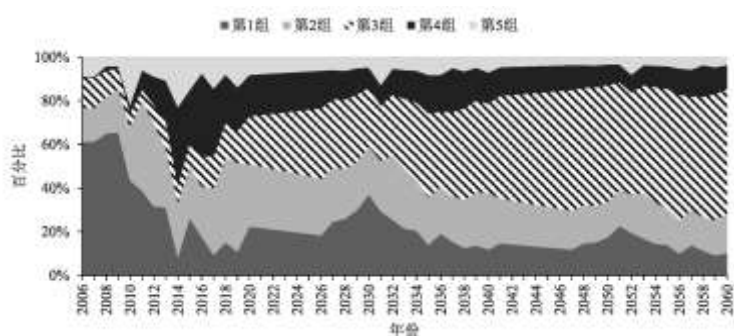


图 7 各组风电新增装机容量的比重

本文设置高、中、低装机增长率 3 种情景(表 4)，它们分别代表地方上加快和放缓风电项目建设的情况。根据国家主席习近平提出的目标到 2030 年“风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上”，即再过 10 年中国风电累计装机规模将达到 6 亿千瓦左右。为了实现这一目标，本文设置了高装机增长率情景，提高了 2020 年的新机位点新增装机增长率，同时，将全国风电开发基本完成的时间提前至 2050 年，并将 2060 年新机位点新增装机增长率为设为 0。此外，增长率的设置还考虑了各个省份 2020 年之前的新增装机增长率、产能的限制以及风电比重的限制等因素。例如，如图 6 所示，在基本结果的情况下 2036 年前后将出现一波新增装机的高峰，这主要来自机组“以旧换新”产生的新增，需要产能达到 2019 年新增装机台数的 2.3 倍。2019 年的“抢装”(已核准项目为了赶在 2021 年实现并网，从而享受补贴电价)曾造成供应链吃紧，2036 年改建和新建台数达到 2019 年的 2.3 倍，这一增长规模尤为可观。所以，在高增长率情境下设置新机位点新增装机增长率的时候，本文将这一比例控制为 3.06 倍。又如，参考德国和丹麦目前的风电比重，本文认为再过 20 年，到 2040 年中国风电比重达到 30%~40%，2060 年达到 60%左右在技术上是可行的，是可以通过电力系统调控和储能配套设施的建设实现的。在设置新机位点新增装机增长率的时候，也考虑了这一因素。

上述两种情景的计算结果如图 8 所示。在低装机增长率情景下，2060 年风电累计装机约 13.43 亿千瓦，年发电量约 2.57 万亿千瓦时，当年可减少 CO₂ 排放约 22.41 亿吨。在高装机增长率情景下，2030 年风电累计装机约 6.02 亿千瓦，2060 年风电累计装机约 27.35 亿千瓦，2060 年风电年发电量约 5.42 万亿千瓦时，当年可减少 CO₂ 排放约 45.75 亿吨。如果假定 2060 年中国电力生产为 8.72 万亿千瓦时，那么在低装机增长率情景下 2060 年风电发电占比预计为 29.5%，在高装机增长率情景下预计为 60.2%。

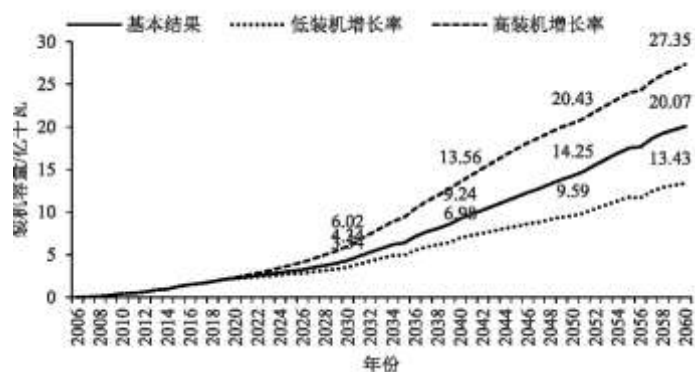


图 8 不同装机增长率下的累计风电装机容量

(2) 技术因素。

技术发展的快慢也会影响基本结果，如风力发电机组研制技术、叶片研制技术、电网技术的发展、储能技术的发展、氢能技术的发展、信息技术和海量数据处理技术的发展等。采用更大的单机容量、更轻更长的叶片、更智能化的监控技术可以增加发电量，并且还可以节省单位度电的建设和运维成本。储能技术和氢能技术的突破可以将风力产能的电量储存下来，有效地解决风电波动性对电网的冲击。在上述诸多技术因素中，本文主要考察风力发电机组研制技术进步的快慢对于基本结果的影响。具体来说，本文设置 2060 年风电新增装机的平均单机容量为 3.0 兆瓦和 7.5 兆瓦两种情景(表 5)，分别反映较慢的和较快的技术进步率。3.0 兆瓦机组，目前，国内整机制造企业已可以实现批量生产，2060 年风电新增装机的平均单机容量为 3.0 兆瓦，这意味着几乎不需要技术进步。7.5 兆瓦机组属于大型机组，目前，主要用于海上风电，欧洲的研制技术相对成熟，国内仍处于研发阶段，个别企业已经可以生产出部分样机，2060 年风电新增装机的平均单机容量为 7.5 兆瓦，这意味着 2060 年新增陆上风电的平均单机容量应在 5 兆瓦以上，新增海上风电的平均单机容量将可能达到 10 兆瓦及以上。

表 5 低、中、高技术进步率的设定

进步率	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年	2055 年	2060 年
低技术进步率	2.25	2.34	2.44	2.53	2.63	2.72	2.81	2.91	3.00
中技术进步率(基本结果)	2.25	2.63	3.00	3.38	3.75	4.13	4.50	4.88	5.25
高技术进步率	2.25	2.91	3.56	4.22	4.88	5.53	6.19	6.84	7.50

上述情境的计算结果如图 9 所示。在低技术进步率情景下，2060 年风电累计装机约 14.65 亿千瓦，年发电量约 2.82 万亿千瓦时，当年可减少 CO₂ 排放约 24.55 亿吨；在高技术进步率情景下，2060 年风电累计装机约 24.99 亿千瓦，年发电量约 4.78 万亿千瓦时，当年可减少 CO₂ 排放约 41.69 亿吨。如果假定 2060 年中国电力消费为 8.72 万亿千瓦时，那么在低技术进步率情景下 2060 年风电发电占比预计为 32.3%，在高技术进步率情景下预计为 54.8%。

对比政策和技术两类情景分析，不难看出：在低增长率情境下和低技术进步率情景下，两者的计算结果相差不大，2060 年风电发电量在 2.7 万亿千瓦左右，年 CO₂ 减排量在 23.5 亿吨左右，这两种情景的年 CO₂ 减排效果相对于基本结果大约延迟了 10 年。然而，在高增长率情境下 2050 年风电发电量与基本结果中 2060 年风电发电量基本相当，这意味着前者的 CO₂ 减排效果相

对于基本结果大约提前了 10 年。同理可得，在高技术进步率情境下 CO₂ 减排效果相对于基本结果仅提前了 6 年。

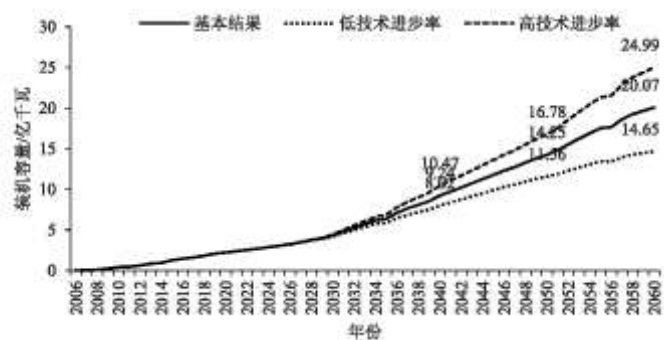


图 9 不同技术进步率下的累计风电装机容量

4 结论与政策建议

4.1 主要结论

(1) 风电是一种理想的替代能源。相对于核电和水电，风电的分布范围更为广泛，31 个省份均有分布。风电的开发与利用可以有效地减轻我国对化石能源(特别是火电)的依赖，极大地降低二氧化碳排放强度。对于东部沿海地区来说，海上风电具有容量系数高、出力相对平稳，距离电力负荷中心近、输送成本低、不占用土地资源、对环境负面影响小等诸多优势。

(2) 风电政策的稳定性对于中国风电市场的高质量发展尤为重要。这就要求地方政府要提前做好中、长期风电发展规划和电网规划，并肩负起风能资源开发、风电消纳和二氧化碳减排的责任。当出现电网建设跟不上风电建设的情况，要及时地遏制住风电开发过热的苗头，使风电开发纳入既定的发展轨道。

(3) 实现 2030 年 6 亿千瓦风电装机的目标，即高增长率这一情景，这一挑战十分巨大。从新增装机台数来看，在高增长率情景下，2030 年新增装机台数是 2019 年的 2.18 倍，2036 年是 2019 年的 3.06 倍。这意味着在未来的 10 年之内，全国风力发电机整机制造的产能需要至少翻一番。

4.2 未来 40 年风电产业发展政策建议

第一，建议地方政府做好风电发展规划，制定出长期且稳定的风电发展目标，稳定市场预期，避免市场出现短期过热或过冷的情况。对于东部沿海地区来说，海上风电的组网和并网规划委托由电网公司承担、规划甚至可以先于海上风电开发进行，从而避免地方政府或风电开发商的盲目开发带来重复性建设。

第二，建议由国家能源局和生态环境部牵头，构建起长期有效的清洁能源消纳专项监管机制，保障可再生能源全额消纳，对达不到消纳目标的地区依法予以追责。同时，进一步深化电力市场化改革，建立起中长期交易为主、现货交易为补充的电力市场，完善市场化电力电量平衡机制和价格形成机制。

第三，加快提升电力系统的调峰能力，包括火电灵活性改造，各类灵活调节电源建设，化学电池、风电制氢等新型储能技术应用。推动智能电网建设，满足分布式电源接入需要，全面构建现代化输配电系统。

第四，建议风电行业进一步加强产业链的联合创新，解决关键零部件、芯片、软件、大型铸锻件、轴承等方面的卡脖子问题，风电企业应积极开展大数据、“互联网+”等信息技术的应用研究，推动实现全行业实现信息化管理和数据共享。

第五，建议高校、科研院所、新型研发机构与风电企业建立起常态化对接交流机制，共同组建国家级风电研发试验和检测平台，鼓励跨学科、跨领域、大协作、高水平的研发试验创新，全面提升国产风力发电机及相关装备的研制水平和可靠性。

参考文献:

[1] Jacobson M Z. Evaluation of nuclear power as a proposed solution to global warming, air pollution, and energy security [EB/OL]. [2019-12-22]. <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NuclearVsWWS>.

[2] 林楚, 秦海岩: 海上风电补贴逐步退坡助推海上风电 2025 年平价发展[J]. 电力系统装备, 2019(21): 22-23.

[3] 张子瑞. 中国风电: 从“零”到领跑全球[N]. 中国能源报, 2018-07-30(2).

[4] 王怡. 中国风电产业 40 年发展成就与展望[J]. 中国能源, 2020(9): 28-32.

[5] 陈商. 丹麦 2019 年风电占比创新高[N]. 中国能源报, 2019-01-13(7).

[6] 夏云峰. 2018 年全球可再生能源从业者达 1100 万[J]. 风能, 2019(6): 46-49.

[7] 国家发展和改革委员会能源研究所. 能源技术路线图——中国风电发展路线图 2050 [EB/OL]. [2019-01-22]. <https://max.book118.com/html/2019/0122/8001034041002003.shtm>.

[8] The International Renewable Energy Agency. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects [EB/OL]. (2020-3-4). <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>.

[9] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[R]. 北京: 中国“十四五”电力发展规划研讨会, 2020.

[10] 李平, 刘强, 胡安俊, 等. 碳中和前景下的能源转型: 选择与路径[R]. 北京: 全球能源安全智库论坛第九届年会, 2020.

注释:

1 数据来自国家能源局, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1690274346916599196&wfr=spider&for=pc>。自 2015 年以来, 国家能源局于每年年初公布上年《风电并网运行情况》, 但 2021 年年初仅召开了新闻发布会, 数据未在国家能源局网站上予以公布, 也未说明装机容量指的是完成吊装的容量, 还是并网容量。中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA)秘书长秦海岩和业内人员分别进行了解释, 详见 <http://news.bjx.com.cn/html/20210125/1131894.shtml> 和 <http://news.bjx.com.cn/html/20210121/1131174.shtml>。为了便于区分, 本文用装机容量作为统称, 用吊装容量表示已完成吊装的机组容量, 并网容量表示完成吊装并且实现并网发电的机组容量, 通常并网容量基本上等于吊装容量。

2 据全球风能协会(GWEC)的统计, 2019 年全球陆上风电累计装机规模为 621 GW, 位列全球前五位的国家分别为中国(占 37%)、美国(17%)、德国(9%)、印度(6%)和西班牙(4%); 全球海上风电累计装机规模为 29.1 GW, 位列全球前五位的国家分别为英国(占

33%)、德国(26%)、中国(23%)、丹麦(6%)和比利时(4%)。

3 注：1 GW=100 万千瓦=0.01 亿千瓦。

4 在统计口径上，CWEA 和国家能源局公布的装机数据存在一定的差异。CWEA 统计的是吊装容量，国家能源局仅公布了 2014—2019 年的并网容量(2020 年装机数据未给出说明是指吊装容量、还是并网容，详见前页脚注 1)。在模型设计、计算结果以及图 2、图 4 至图 9 中，2006—2013 年装机容量采用 CWEA 公布的吊装容量，2014—2019 年装机容量采用国家能源局公布的并网容量。模型的初始值采用并网容量，这是为了便于计算出发电量，即并网容量乘以年利用小时数等于发电量。因此，严格地说，模型计算结果中关于 2020—2060 年风电装机容量是指并网容量。