



CHILDREN'S
INVESTMENT FUND
FOUNDATION

中国能源转型展望

2021

中国宏观经济研究院能源研究所

执行摘要



实施机构



资助机构



技术支持



"中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，这需要付出艰苦努力，但我们会全力以赴。"

习近平主席

在第 76 届联合国大会一般性辩论中的发言

联合国大会，2021 年 9 月

目录

前言	5
世界需要解决气候危机	6
中国能源转型的基础	7
中国能源系统实现碳中和的路径	9
主要结论	9
中国能源展望 (CETO) 的情景内容	10
两个情景的主要结果	11
政策建议	19
来自《展望》研究的其他主要发现	21
碳价	21
电制“X”	21
中国 CCS 和 CCUS 的现状	22

前言

气候变化和能源问题是当前突出的全球性挑战，事关国际社会共同利益，也关系地球未来。习近平主席在 2020 年 9 月的联合国大会讲话中宣布，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。碳达峰碳中和的承诺为中国的绿色低碳发展提出了新目标。能源系统向净零排放转型的路径是促进碳中和应对气候变化、实现经济社会系统绿色转型的关键。

实现碳达峰碳中和目标是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，需要付出艰苦卓绝的努力。中国是最大的发展中国家，能源转型需要实现包括气候目标在内的多元化目标，应保障支持经济增长，同时考虑清洁能源转型过程中对就业、地方经济等社会经济因素的负面影响，确保平稳过渡。中国的能源转型要处理好发展和减排、整体和局部、短期和中长期的关系，以深度节能和终端高比例电气化为引领，以低碳清洁能源技术创新为支柱，以能源市场改革为抓手，推动高比例可再生能源、新型电力系统、灵活与智慧能源、绿色氢能等领域实现突破，构建清洁低碳安全高效的能源体系。

中国宏观经济研究院能源研究所首次发布的《中国能源转型展望 2021》（CETO 2021），与之前发布的各年度《中国可再生能源展望》相比，对中国能源系统进行了更全面的分析。CETO 2021 侧重于分析两种情景下中国能源系统的转型情况。一是基准情景，即中国致力于与全球同步实现“2 度”目标，在 2070 年左右实现碳中和。二是碳中和情景，展示了 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的实现路径。

在此，感谢能源研究所（ERI）团队的巨大努力，感谢丹麦能源署（DEA）、哥伦比亚大学全球能源政策中心（CGEP）和挪威开发合作署（NORAD）对研究工作提供的大力支持和投入，更要感谢我们的长期合作伙伴——英国儿童投资基金会（CIFF）对能源研究所顺利编写展望报告提供的支持。

王仲颖

中国宏观经济研究院能源研究所所长

世界需要解决气候危机

2021 年 8 月，政府间气候变化专门委员会（IPCC）第一工作组发布了第六次评估报告¹的支持报告。IPCC 第一工作组发现，“人类活动的影响使大气层、海洋和陆地变暖，这一点毋庸置疑”。工作组还发现，最近气候变化的规模“在几个世纪以至几千年内前所未有”，“人类活动引起的气候变化已经影响到全球每个地区的天气和气候，出现了多个极端情况”。

国际能源署（IEA）²和国际可再生能源署（IRENA）³的全球路线图提出了到 2030 年能源部门的排放减少 40-45%、到 2050 年能源部门实现净零排放的路径。

联合国开发计划署《2021 年排放差距报告》⁴显示，即使新的国家应对气候变化承诺加上其他减缓措施，将仍使全球温度在本世纪末上升 2.7°C。这远远超过了巴黎协定目标，将导致地球气候发生灾难性的变化。

¹ “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” 政府间气候变化专门委员会，访问地址 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>。

² “World Energy Outlook 2021,” 国际能源署，2021 年，访问地址 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>。

³ “World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway,” 国际可再生能源署，2021 年 6 月，访问地址 <https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>。

⁴ “Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On - A World of Climate Promises Not Yet Delivered,” 联合国环境项目，2021 年，访问地址 <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>。

中国能源转型的基础

中国正处在能源发展的十字路口。改革开放以来能源和经济发展的历史表明，中国能源发展的主要矛盾已经发生了变化。很长时间内，主要矛盾曾是能源总量供给不足与经济社会发展需求之间的矛盾。今天，主要矛盾转变为高碳能源供应结构与经济社会可持续发展之间的矛盾。矛盾的核心也从过去为满足总供给不足而保证煤炭供应，转变为大力发展风能、太阳能、水能等可再生能源，优化能源结构，推动能源体系向低碳甚至零碳体系转变。

中国的能源发展是选择传统老路，还是新的发展道路？老路是包括部分发达国家在内的其他国家已经走过的所谓成功之路：主导能源从煤炭到石油和天然气，然后从石油和天然气转为可再生能源。这条路存在几个问题：转型过程缓慢，且无法满足《巴黎协定》的要求，甚至危及能源供应安全和环境安全；而且由于国际市场对低碳产品的需求增长，可能导致严重经济风险。此外，选择这条老路，中国可能错过绿色创新发展的众多机遇，导致中长期内能源成本上升、供应短缺。

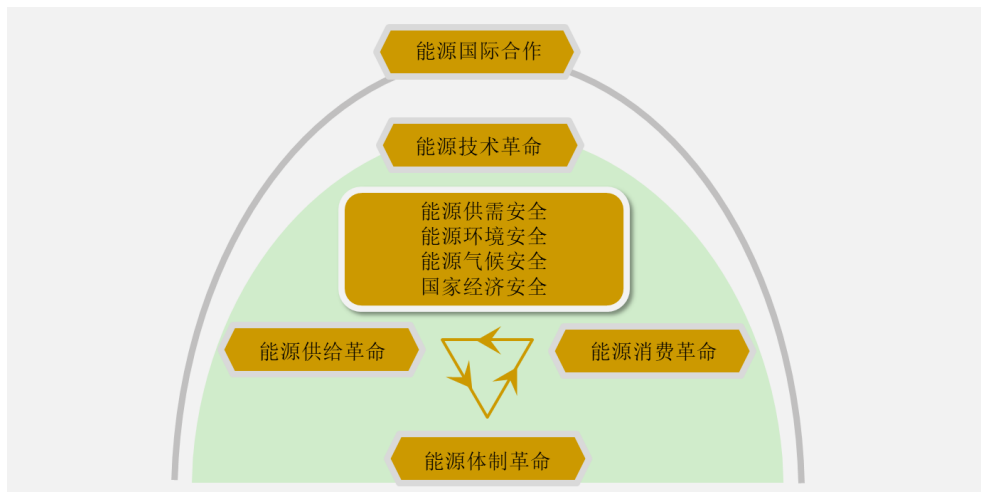
与老路相比，中国必须遵循十九大提出的新路线⁵：把构建清洁低碳、安全高效的能源体系作为现代能源体系建设的核心，关键在于保证相关要素之间的可持续平衡，最终形成相互促进的生态系统。因此，中国必须坚持习近平总书记在 2014 年 6 月提出的⁶“四个革命、一个合作”能源安全新战略。

能源安全新战略以能源消费革命为关键，以能源供给革命为基础。这个“关键”和“基础”的核心为能源生产和能源消费形成有机的无缝对接，即生产出来的绿色能源可随时交付给消费者，消费者更喜欢绿色能源而不是“黑色”能源。生产和消费形成一个完整的市场循环，生产和消费的有效衔接和市场的正常运行，需要能源体制的革命来支撑。无论是能源供给革命、能源消费革命，还是能源体制革命，都离不开能源技术革命的支持，技术革命是上述三个革命的有效保障。此外，在全球经济一体化的大趋势下，在构建人类命运共同体的目标下，在全球能源绿色低碳转型不可逆转的趋势下，任何国家甚至企业都不能独善其身，需要广泛开展能源国际合作。

⁵ “习近平在中共十九大上的报告全文，” 新华社，2021 年 11 月 3 日，访问地址 http://www.xinhuanet.com/english/special/2017-11/03/c_136725942.htm。

⁶ 习近平在 2014 年 6 月 13 日召开的中共中央财经领导小组会议上提出了以“四个革命、一个合作”为特征的新能源安全战略。

图 1：“四个革命、一个合作”的内部逻辑



现代能源体系的建设与实现碳达峰碳中和目标密切相关，这是一项复杂的系统工程。正如习近平总书记在 2021 年 3 月 15 日中央财经委员会第九次会议上所指出的，“实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革”。⁷

因此，建设现代能源体系还需要进行系统的能源转型。只要我们坚持“四个革命、一个合作”的总方针，我们就能完成系统的能源转型，建成现代能源体系，最终实现能源供需安全、能源环境安全、能源气候安全，从而保障国家经济安全。

⁷ “习近平主持召开中央财经委员会第九次会议，” 中国新闻网，2021 年 3 月 15 日，访问地址 <https://www.chinanews.com/gn/2021/03-15/9432980.shtml>。

中国能源系统实现碳中和的路径

CETO₂₀₂₁ 包含了中国能源系统的两条发展路径情景。**基准情景 (BLS)** 为参考情景，即中国推动实现全球“2 度”情景目标，在 2070 年左右实现碳中和。**碳中和情景 (CNS)** 提出了中国实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标的路径。

主要结论

持续经济增长和碳中和目标可以并行实现

CETO 情景提出了向清洁低碳、安全高效的能源系统转型的路径。CETO 分析显示，通过提高能源效率、实现电气化和大规模开发利用可再生能源，这一路径能够提供经济持续增长所需的能源保障。

持续提高能效是推动能源需求下降的关键支柱

2020-2060 年，中国实际 GDP 增长达 4.2 倍以上，但终端用能到 2060 年可以回落至当前水平。在两种情景下，能源强度到 2060 年都下降到 2020 年的 23%。

电气化引领需求侧变革

电气化有利于降低化石能源消耗。工业、交通和建筑部门都需要化石能源消费进行电能替代。2060 年终端部门总体电气化率从 2020 年的 27% 提高到基准情景下的 54%，碳中和情景下则提高到 74%。

可再生能源将满足大部分能源需求

可再生能源电力成本将不断下降，随着电力市场改革有效推进，风能和太阳能的大规模发展将使其成为能源供应的主体能源。可再生能源在一次能源消费中的占比将从 2020 年的 13.5% 增长到 2060 年基准情景下的 87.6%、碳中和情景下的 92.8%。非化石能源在一次能源消费中的占比将从 2020 年的 15.9% 增长到 2060 年基准情景下的 91.2%、碳中和情景下的 96.8%（发电煤耗法）。

要实现碳中和的最后一步，必须发展电制“X”（PtX）、碳封存和碳汇

中国需努力提高能源效率，实现终端消费电气化，并大力开发利用可再生能源，从而构建低碳能源系统。但是，要完全实现碳中和，CETO 分析显示，有必要开发和部署电制“X”技术（Power-to-X, PtX），特别是绿色氢能生产，并通过碳捕集、利用与封存（CCUS）和碳汇消除二氧化碳。这些技术将在 2035 年后的能源系统中发挥越来越重要的作用。

中国能源展望（CETO）的情景内容

CETO通过情景分析提出了中国能源转型的战略和实现碳中和的路径。主要包括四个关键支柱和途径：

- 提高需求侧的**能源效率**，确保满足供应需求，并保证经济持续增长。
- **绿色能源供应**——技术进步和成本降低推动可再生能源大规模提供清洁能源，特别是以可再生能源电力的形式。
- **电气化**推动终端消费中化石能源退出，同时实现电力供应的去碳化。
- **氢能**成为一种重要的能源载体，为低成本的绿色电力供应和最难去碳的需求部门建立起桥梁。绿氢与碳捕捉相结合，可以为很难减碳的部门制造燃料，如重型运输、水上运输和航空部门。
- **二氧化碳封存**创造了负排放以及碳汇方面的后备手段，或者说最后的选择。负排放可以补偿 2060 年能源系统中仍然存在的少量排放（例如，通过碳捕捉（CCS）对火电厂的捕获等）。

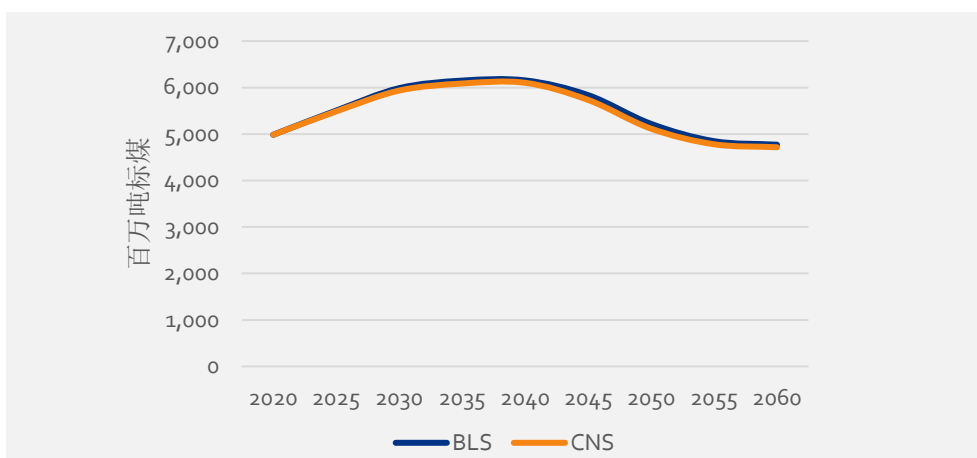
为在实践中实现碳中和，上述每个支柱都要依靠前一个支柱，环环相扣。如果没有能源效率的提升，绿色能源供应的大规模发展将需要过多的资本投入，有效能源服务成本将过高。如果没有绿色电力供应，电气化只能将排放源从终端消费部门转移到以化石能源为燃料的发电站。氢能和电制“X”（PtX）立足于供应侧，将主要服务于更难转型的需求侧。最后，高强度的直接和间接电气化为大规模的电力消费创造机遇，其灵活运行的潜力明显高于传统昂贵的电力消费，以及储能替代，例如氢能或消费侧储能电池等。因此，电气化进程需要绿色电力提供支撑，并为可再生能源在电力部门的高比例发展提供保障。

两个情景的主要结果

一次能源消费趋势

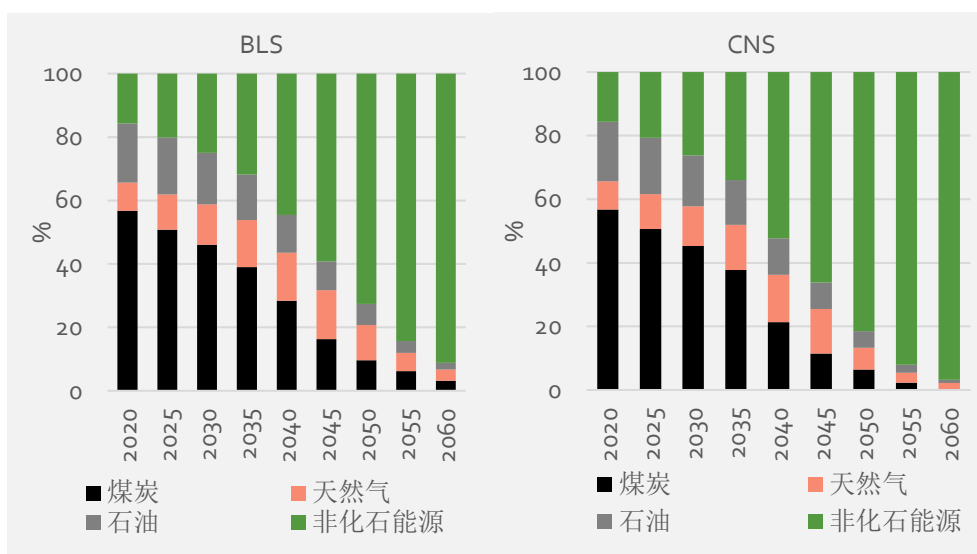
基于能源转型各要素驱动，“展望”两个情景中一次能源消费总量（TPEC）均将在 2040 年左右达到峰值，两个情景发展进程总体上较为相似。

图 2：2020-2060 年两个情景的一次能源消费总量（百万吨标煤）（发电煤耗法）



在这两种情景中，非化石能源和天然气逐渐取代煤炭。2035 年，非化石能源在 BLS 中占一次能源消费总量的 32%，在 CNS 中占比为 34%。2050 年，在 BLS 的占比为 73%，在 CNS 中占比为 82%。2060 年，在 BLS 中的占比为 91%，CNS 为 97%（发电煤耗法）。

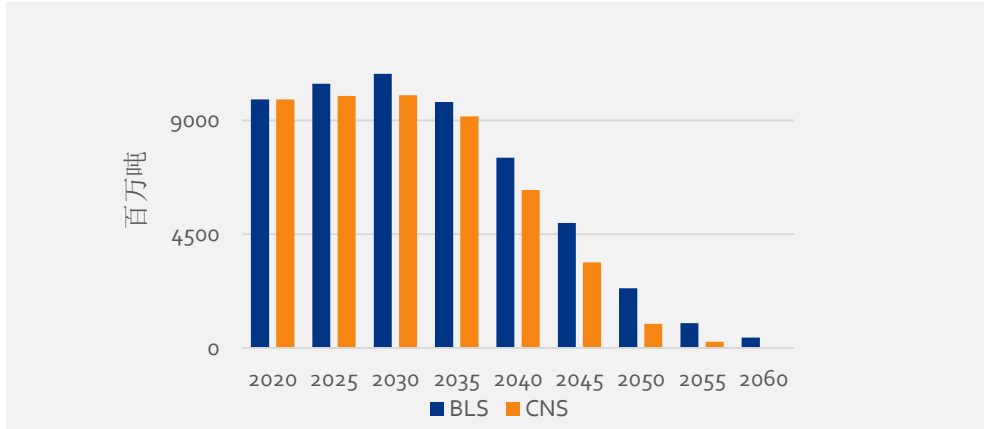
图 3：2020-2060 年两个情景的各类能源在一次能源消费总量中的占比（%）（发电煤耗法）



2030 年前二氧化碳排放达峰

CETO 情景显示，中国能源部门有可能在 2030 年前实现碳达峰，如图 4 所示。两个情景的二氧化碳排放放在 2030 年后均稳步下降。与 BLS 相比，CNS 的二氧化碳排放量从目前到 2060 年间都相对较低，在 2060 年之前达到碳中和。

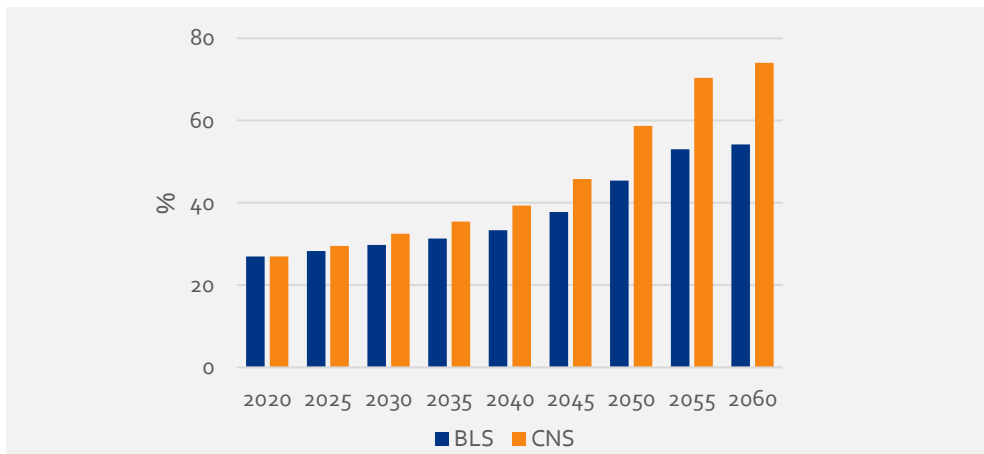
图 4：2020-2060 年两个情景的能源部门二氧化碳排放量（百万吨）



电气化战略减少了终端用能部门的煤炭和石油消费

能源转型的一个重要部分是用绿色电力系统生产的电力取代终端用能部门的化石能源消费。此外，引入由风能和太阳能发电产生的绿氢是使终端用能部门电气化的一种间接方式。随着工业电气化的深化（尤其是钢铁行业）和电动汽车的推广，电力消耗将大幅增加。2060 年，终端用能部门的总体电气化率在 BLS 中达到 54%，在 CNS 中达到 74%。

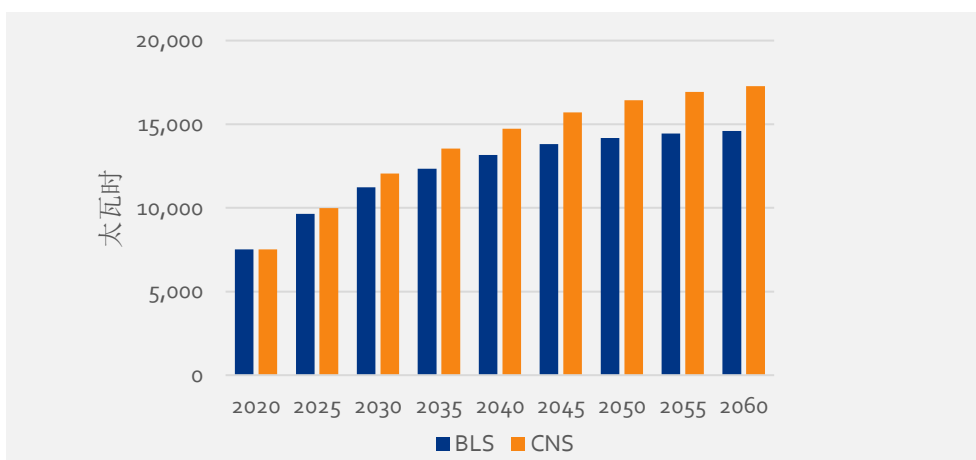
图 5：2020-2060 年两个情景的电气化率发展（%）



电力消费在两种情景下都保持增长趋势

在这两种情景下，中国的全社会用电量均呈上升趋势。由于终端用能行业的电气化率在 CNS 中更高，CNS 的电力消费普遍高于 BLS。在 CNS 情景中，全社会用电量到 2030 年达到 12,000 太瓦时，在 2060 年进一步达到 17,300 太瓦时，是 2020 年的两倍。

图 6：2020-2060 年两个情景的全社会用电量（太瓦时）

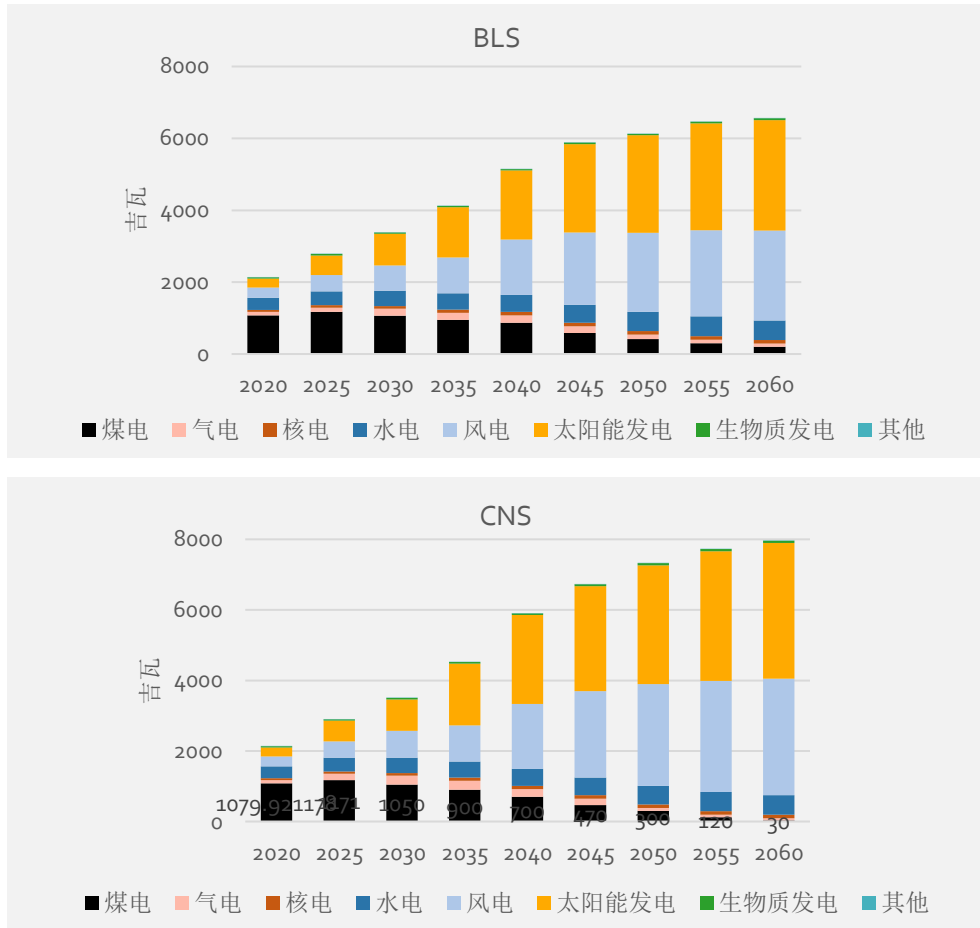


太阳能和风能使电力部门变得绿色和清洁

在 CNS 中，到 2030 年风电总装机达到 760 吉瓦，太阳能发电装机达到 890 吉瓦，风光合计累计装机达到 1,650 吉瓦，超过了 1,200 吉瓦的装机目标。这主要是由于与其他技术相比，风能和太阳能的经济竞争力提升，并与 2030 年前碳达峰的目标相结合。在 BLS 中，2030 年的风电装机为 707 吉瓦，太阳能装机为 880 吉瓦。

在 CNS 中，到 2060 年风电和太阳能发电总装机合计达到 7,145 吉瓦，其中风电装机 3,300 吉瓦、太阳能发电装机 3,845 吉瓦。在 BLS 中，到 2060 年风电总装机达到 2,500 吉瓦，太阳能发电总装机达到 3,070 吉瓦。

图 7: 2020-2060 年两个情景的发电装机及结构 (吉瓦)



从长期来看可再生能源将成为主导电源

在两种情景中，2060年前总发电量均会持续增长。在BLS中，从2020年的约7,500太瓦时增长到2060年的近14,600太瓦时；在CNS中，到2060年增加到17,300太瓦时。煤电逐渐退出，取而代之的是可再生能源发电，主要为光伏和风电。在BLS中，可再生能源在发电量中的占比从2020年的近30%增加到2060年的92.5%，在CNS中进一步提升到95.5%。

图 8：2020-2060 年两个情景的发电量（太瓦时）

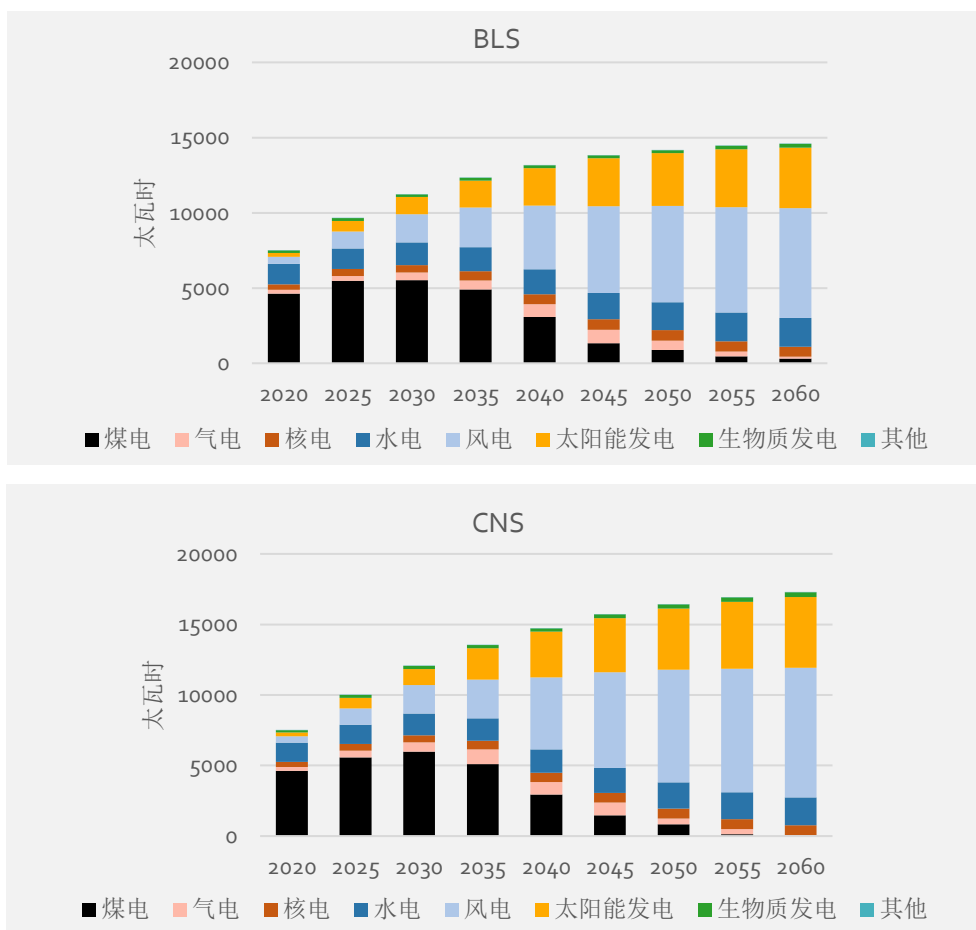


图 9：2020 年中国能流图（百万吨标煤）

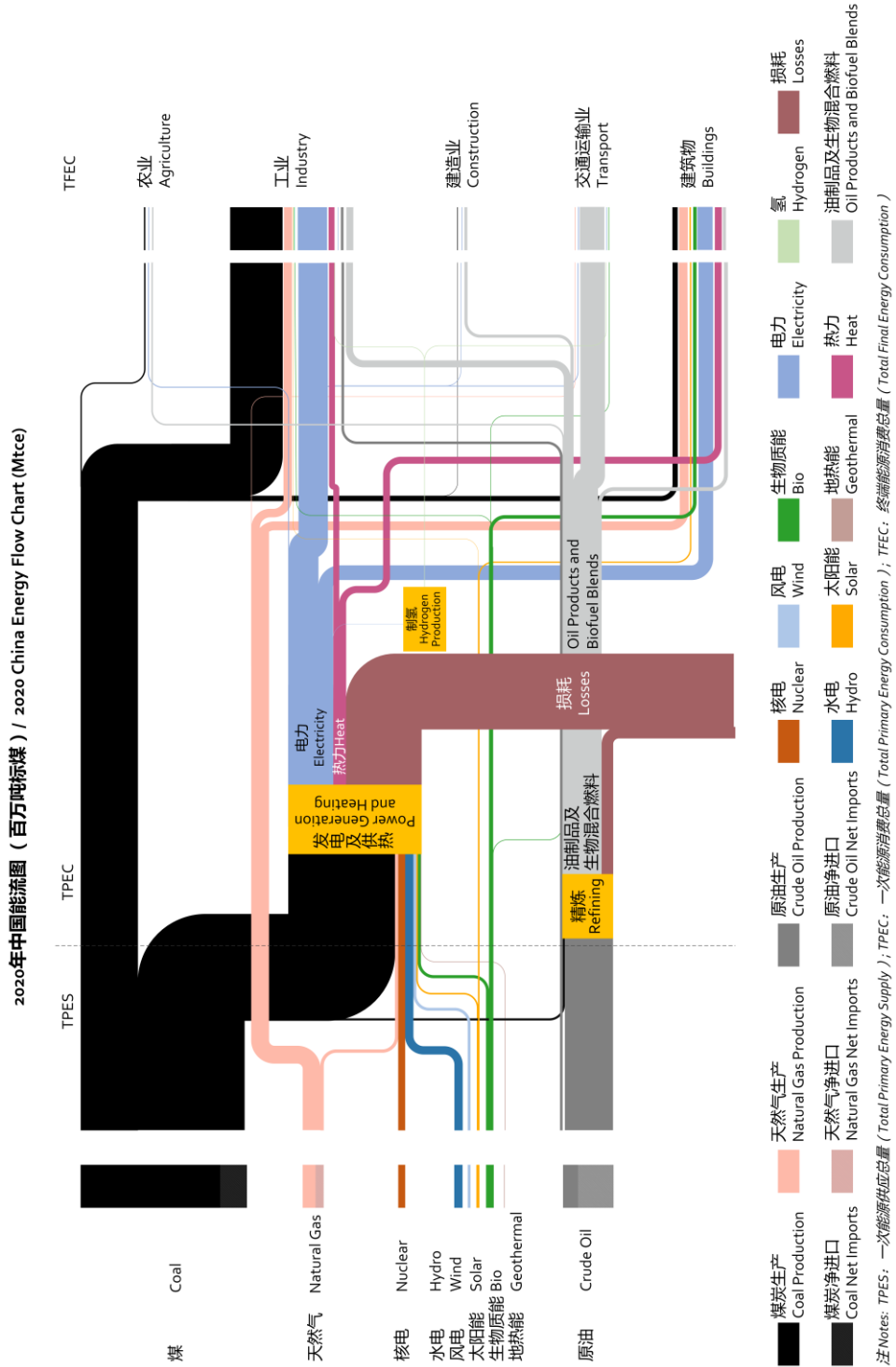
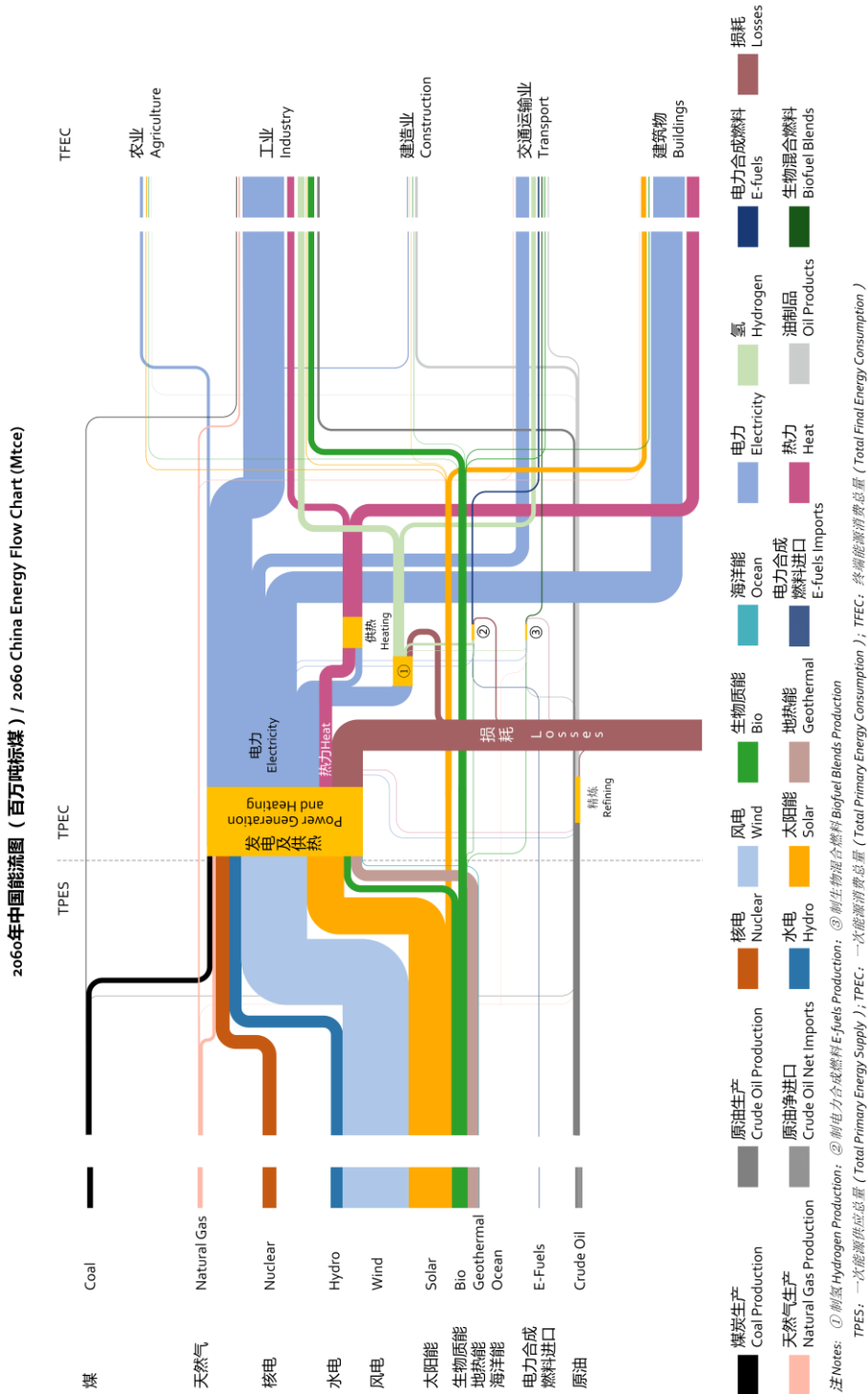


图 10: CNS 中 2060 年中国能流图 (百万吨标煤)



更加复杂的电力调度运行和平衡方式

随着波动性可再生能源渗透率的提高，电力系统运行向更加灵活的方式转变。在电源侧和用户侧，将调动包括储能、车网互动（V2G）、负荷转移以及电动汽车充电在内的各类灵活性资源来适应高比例可再生能源给电力系统带来的波动问题。可调节的灵活性资源占比将日益增大。

图 11: CNS 中全国电力系统一周的小时级电力平衡 - 2060 年冬季

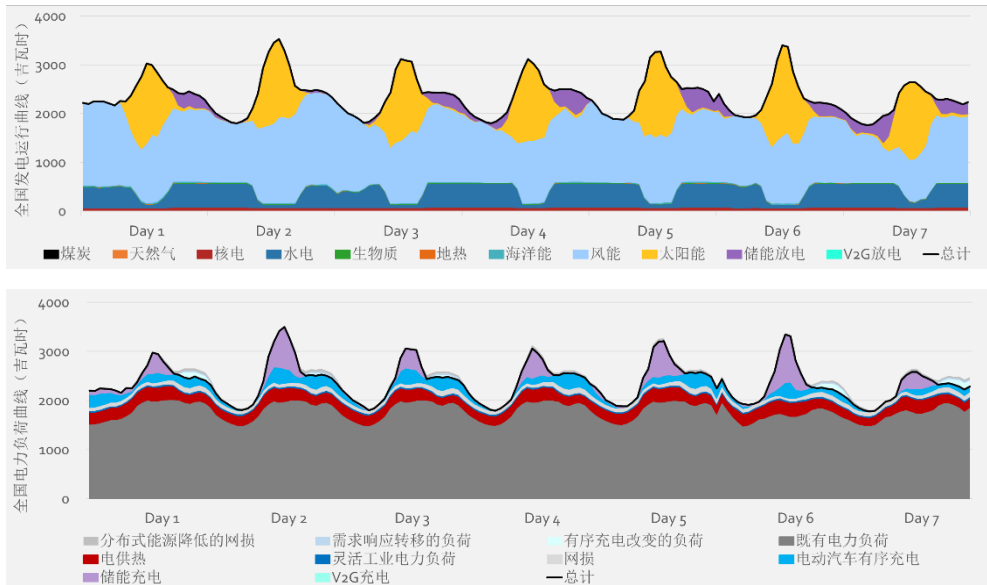
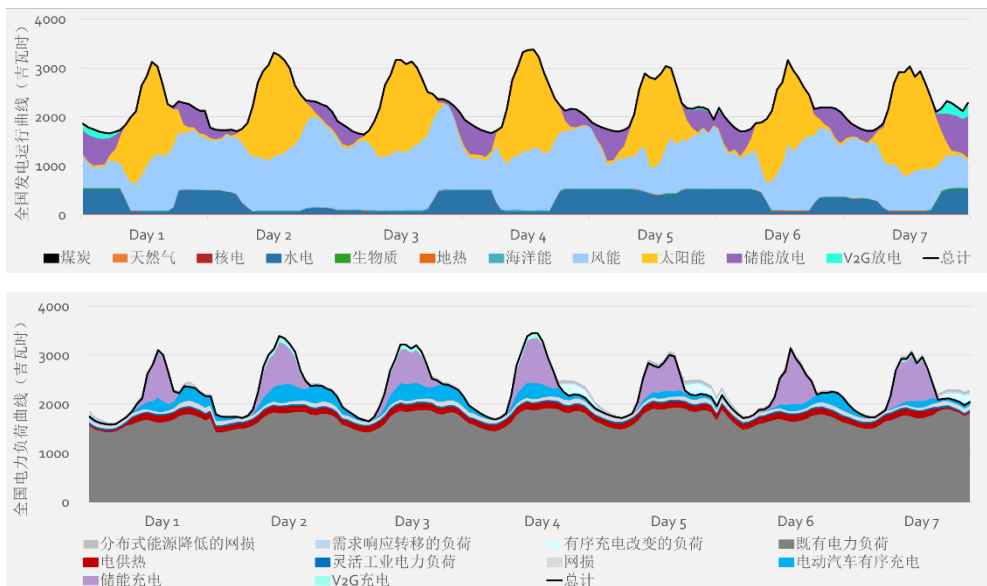


图 12: CNS 中全国电力系统一周的小时级电力平衡 - 2060 年夏季



政策建议

面向碳中和目标的实现，中国清洁低碳、安全高效的现代能源体系建设，需要继续大力推进产业电气化，行业“三化”（信息化、数字化和智能化）和电力绿色化。以绿色电力的大规模开发和使用助推能源供给侧结构性改革，从源头上引领、带动和传导整个能源体系，形成构建现代能源体系的新突破；以能源行业信息化、数字化和智能化变革助推能源系统的绿色低碳转型；以终端能源用电需求引导能源生产持续优化，确保碳达峰碳中和目标的实现。

以绿色电力的大规模开发和使用助推能源供给侧结构性改革，形成构建现代能源体系的新突破

加快推动风、光成为主体能源。有序推动陆上风电集中与分散并举开发，以电力送出通道建设和消纳市场为引领，有序推进“三北”、中部等地区的大型风电基地建设；同时随着分散式风电利用成套技术的逐步成熟，逐步实现分散式风电的大规模应用；在满足本地区清洁能源供应的基础上，将进一步扩大风电跨区域配置。持续推进集中式光伏发电规模化发展和优化布局，在资源优越地区加大新型外送光伏发电基地建设，大力发展“光伏+”和分布式光伏，提高土地综合利用效率，促进光伏发电开发多样化。

推进可再生电力与煤电、气电等协同转型。统筹考虑绿色低碳发展转型、煤炭消费总量控制、能源领域供给侧改革等各项要求，用好存量煤电资源，加快推进煤电灵活性改造。结合技术创新，鼓励燃煤机组增加高效热储能装置，适应电力系统负荷和可再生能源发电的快速波动，逐步引导煤电由基础负荷的主要承担者向系统灵活能力的主要提供者转变。2025年前，全国存量煤电机组的灵活性改造完成率要达到50%以上，2030年前煤电全部完成灵活性改造。抓住窗口期，发挥好燃气发电的调节作用，支撑西北地区高比例可再生能源发展和华北、华东及南方地区分布式能源发展。

建设统一开放、竞争有序的能源市场体系。搭建煤炭、电力、石油和天然气交易平台，促进供需互动；建设中长期交易、现货交易等电能量交易和辅助服务交易相结合的电力市场体系，积极推进全国统一电力市场和全国碳排放权交易的市场建设。深入研究和持续完善绿色电力证书制度设计，优化绿色电力及电力证书交易机制中涉及的交易方式、交易价格及组织管理机制。推进碳排放交易机制与绿证机制兼容协调。

建立健全以抽蓄、电化学、电动汽车和绿氢为主的储能体系。充分利用各类储能技术的不同时空特性，实现“可再生能源+储能”协同发展。加强西部风光资源富集地区可再生能源场站并网与储能设施配置；推动储能体系作为电网主要调节资源参与电力系统的调峰、调频，共同参与电力辅助服务市场。

以能源行业信息化、数字化和智能化为加速器，开拓能源系统现代化转型的新局面

大数据、5G、人工智能、物联网等新技术推动了能源领域的信息化、数字化和智能化。随着技术的不断进步和成本的不断降低，龙头企业及其智慧资源将在提高海上风电、分布式太阳能发电的竞争力方面发挥关键作用。智能电网、能源互联网、储能等应用的不断扩大，以及更好的分布式市场化电力交易模式，推动整个能源系统更加高效、便捷。新能源汽车、新能源产业等核心前沿技术的发展，将使新能源产业链向上下游扩散，有效促进能源领域的高质量发展。

不断完善绿色智能电网规划布局。电网规划必须与电源建设和负荷发展全面协调，全面适应供需两侧大幅度、高频次波动，实现各类发电资源集中与分散利用并重、就近与跨区消纳并举，推动清洁低碳能源在更大范围内优化配置。电网规划要全国一盘棋，全面建成从省内优先平衡、到区域协调平衡、再到全国集中平衡的逐层全国联网体系。全面提升电网运行与管理智能化水平，提高电网接纳和优化配置多种能源的能力，满足多元互动的用户供需，充分发挥智能化电网在现代能源体系中的作用。

以终端用能用电需求引导能源生产持续优化，确保碳达峰碳中和目标的实现

以终端部门的电气化改善能源效率和降低碳排放。改善终端部门的能源消费结构，以绿色电能替代促进工业、交通、建筑等终端部门的现代化和电气化，降低终端部门的污染物排放量。积极推动可再生能源发电与大规模电动汽车普及的协同，着力推进高污染工业、商业居民建筑的减煤和电气化，持续推动城乡电力、热力基础设施的扩容和与分布式可再生能源的整合，逐步实现人人享有可持续能源。

激发需求侧主动响应。建立健全基于价格激励的负荷侧响应措施，制定反映市场供求关系的价格体系，进一步优化峰谷电价机制，整合系统运行、市场交易和用户用电数据，提高负荷侧大数据分析能力，增强负荷侧响应能力。加快促进 V2G 规模化应用，推动电动汽车充电基础设施体系加快建设，研究电动汽车充放电与电力系统互动技术与商业模式。加快退役电池储能梯次利用技术研发及示范应用，充分发掘电动汽车动力电池全生命周期与可再生能源发电的协同潜力。

逐步发展电制氢替代。因地制宜布局电氢融合基础设施，力争在绿氢制备、长距离运输和终端应用等前沿技术方面取得突破，关键产业链技术自主可控。逐步推动电解水制氢成为西部地区风电、光伏发电等可再生能源消纳的重要方式。随着绿氢成本的持续下降，推动氢能下游应用市场由交通领域向储能、工业、建筑领域拓展，逐步形成较完备的电氢融合产业体系。

来自《展望》研究的其他主要发现

碳价

为二氧化碳排放增加成本（碳价）是整个气候政策框架中的一个重要政策工具。经过十年的酝酿，中国在 2021 年推出了国家碳排放交易系统（ETS），即全国碳排放权交易市场（简称碳市场）。这个以市场为基础的机制为低碳技术提供激励，推动减排，为中国到 2060 年的去碳化道路做出贡献。除了碳市场，其他类型的碳价工具（如碳税）也可以被引入并在推动能源转型中发挥作用。

一开始，碳市场计划采用了基于强度的目标，火力发电厂根据其燃料类型和容量类别的预先确定的基准（排放强度，吨二氧化碳/兆瓦时）获得一定数量的配额。因此，老旧和低效的火力发电厂如果排放强度高于基准，将因为需要购买配额而受到惩罚。相反，更高效的火力发电厂将有多余的配额作为补贴，因为他们可以在碳市场上出售并获得收入。

基于强度的目标有一个局限性。尽管它可以提高火电机组（主要是煤炭）的整体效率，但它为建设新的和更高效的电厂提供了激励，新建电厂的排放强度将低于基准线。此外，只要总产量（火力发电）增加，碳市场的排放量就会增加。随着中国将达到二氧化碳排放的峰值，有必要使碳市场的目标与总体减排目标保持一致。这意味着碳市场应迅速转向绝对减排目标，以推动碳市场所涵盖的部门减少排放，实现 2030 年的二氧化碳峰值目标。政府可以确定碳市场对整体气候目标的贡献。碳市场也应逐步引入配额拍卖，并减少配额的免费分配。拍卖配额的收入可以作为低碳技术投资和创新的资金。

由于碳价为可再生能源投资提供了激励，确保碳价和可再生能源支持政策之间的一致性和协同作用是非常重要的。

电制“X”

电制“X”（Power-to-X, PtX）包括众多基于电力的燃料、原料转换与生产。CETO 分析了两个省份的 PtX 发展前景，其中青海省拥有丰富的可再生能源资源，具有显著的 PtX 成本优势。广东省作为国内重要的工业中心和航运枢纽，也将氢能发展纳入“十四五”规划，重点发展绿氢和化工副产氢。

CETO 通过整合 OptiFlow 模型与电力和区域供热 EDO 模型分析了 PtX 在两个案例省的发展前景。

案例研究的主要启示

由于涉及多个能源转换环节，PtX 存在较高的效率损失问题。因此只有脱碳电力才能有效降低 PtX 的 CO₂ 排放，且 PtX 应主要应用于直接电气化存在困难的领域。

各地需要因地制宜设计 PtX 解决方案：

- 一个省是否开展 PtX，取决于该省电力系统特性、生物碳（Biogenic Carbon）资源、PtX 产品市场需求等因素。
- 为了减少二氧化碳排放，在零碳电力未能得到充分保障之前，不应建设大型 PtX 项目。

长期来看，PtX 是深度脱碳的重要方案。未来 PtX 在能源转型中的角色转变还需要从系统角度出发进行定量研究，以指导 1) 在何处和何时建立大规模的 PtX 设施，以及 2) 根据减碳效果和经济性对各类 PtX 技术路线的优先级进行量化和排序。

中国 CCS 和 CCUS 的现状

作为世界上最大的能源消费国和碳排放国，中国很早就认识到碳捕集、利用和封存（CCUS）的潜力，使中国在利用化石能源的同时实现深度碳减排。在过去的十年中，中国至少发布了 26 项与 CCUS 相关的政策，重点是技术研发和工业示范。在中国力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的气候承诺的背景下，中国的 CCUS 政策变得越来越积极。

尽管在碳捕集技术和地质利用方面取得了突破，中国 CCUS 整体发挥的作用迄今仍然有限。2007 年至 2019 年间，中国二氧化碳（CO₂）封存量累计达到 200 万吨。

与其他净零排放技术不同，如节能、基于可再生能源的电气化、生物能源、绿氢、生物碳汇等，CCS 部署的重大弱点是除了减少碳排放外缺乏其它的辅助效益，很难近期行动中做出决定。至关重要的是，CCUS 的发展不应导致全国范围内支持节能、可再生能源和其他清洁能源发展的努力在研发和财政方面明显减少。在没有重大技术突破的情况下，CCUS 应该被定位为“最后的手段”，在没有可行替代方案的情况下对难以消减的部门进行脱碳。

建议：1) 进一步提高能源和排放统计报告的质量；2) 建立支持性的、全面的 CCUS 法规和标准；3) 取消所有化石燃料补贴，以刺激包括 CCUS 在内的净零排放技术在国内的市场渗透；4) 积极与欧盟和其他具有净零排放目标的志同道合的国家合作，在国际合作方面探索一个多边而非单边的碳泄漏解决方案。

能源研究所的能源系统模型工具

CETO2021 情景开发由能源研究所能源系统模型工具支持，含中国能源部门的互联模型。

终端部门用能模型与最终能源需求

基于长期能源替代规划模型 LEAP 是一个自下而上的模型，展示了如何满足终端用户的用能需求。在 LEAP 中，每个子部门的关键活动水平的发展情况，主要通过经济附加值来推动终端部门的能源消费量变化。将这些驱动因素与假设、终端使用行为特征调整相结合，就转化为能源消费。包括上游炼化等在内的资源开发活动、区域供热和电力以外的转型情况，也涵盖于 LEAP 的模拟中。

区域电力和供热优化部署模型 EDO

区域电力和供热优化部署模型 EDO，是基于 Balmorel 模型开发的区域电力和区域供热系统优化模型。EDO 模型包括了火电（含热电联产）、风电、太阳能发电（含 CSP）、水电、储能、供热锅炉、储热、热泵等。EDO 考虑了省际电网限制和扩容选择，主要在省级层面上呈现电力系统、各行业的需求侧灵活性、电动车充电的选择以及与区域供热部门完全一体化耦合等。

EDO 模型可以呈现中国电力系统每小时的调度情况，包括热电厂和跨省输电的技术限制，以及基于边际成本最优的省级、区域或国家级电力市场的调度情况。其关键特征在于负荷及供应可变性（例如源自于波动性可再生能源）的详细呈现，以及在装机增长模式下，优化运行及高效部署的灵活性和灵活性潜力。

综合集成工具

两种模型的结果在综合集成工具中加以整合，即将 EDO 模型中电力和区域供热系统的燃料消费，与 LEAP 中终端部门及其他转换环节的直接消费相结合，最终得到能源系统变化的全貌。

中国能源转型展望

2021

执行摘要