

脱碳目标下的 中美电力行业改革



脱碳目标下的中美电力行业改革

Mike O' Boyle, 能源创新公司 *

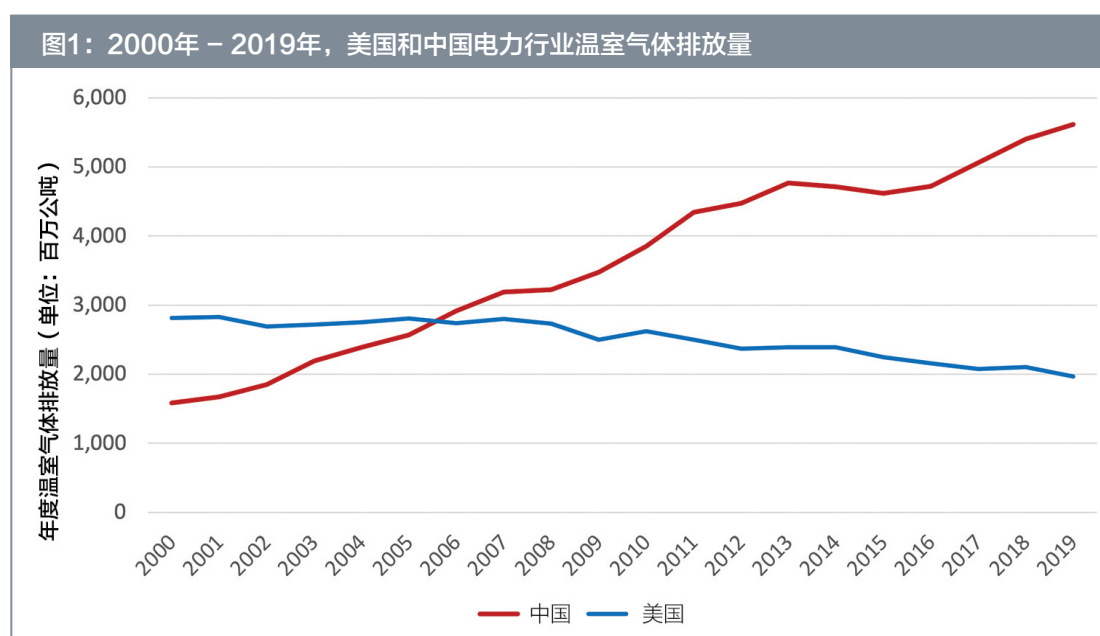
Max Dupuy, 睿博能源智库 *

* 机构名称仅用于注明作者所在单位。本文仅代表作者个人观点，并不代表其所在机构观点。

关键问题与趋势

2020年，美国和中国的电力系统共产生57.8亿公吨二氧化碳当量（CO₂e）排放，约占两国年度排放总量的36%，占全球年度排放总量的17%（国际能源署，2022）。科学界逐渐达成共识，认为绝大多数零碳电力超过80%的，可再生能源为主的电力系统，即使在不开发新技术的情况下，仍可实现可靠与低成本运行（Abhyankar等，2022；MacDonald等，2016年；Novacheck、Brinkman与Porro，2018；国家可再生能源实验室，2012；Phadke等，2020）。中美两国尽管在经济状况和制度上都存在差异，但在推动电力行业转型时，却面临类似的物理挑战和政策挑战。转型到以可再生能源为主导的电力系统，对电力终端用户的去碳化，例如交通和建筑供暖的电气化，也起到了至关重要的作用。

两国在《联合国气候变化框架公约》下的国家自主贡献（NDC）都包括大幅减少电力行业排放



资料来源: Climate Watch (https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2019®ions=CHN%2CUSA§ors=electricity-heat&start_year=1990)

的承诺。然而，这两个国家2030年的国家自主贡献承诺都不足以支持1.5摄氏度减排路径，而由于电力行业在脱碳方面的核心地位，中美两国必须考虑加大电力行业的减排力度。好消息是，根据两国国情制定考虑周全并且可行的政策路径，能够提高电力系统的可靠性，帮助降低成本，同时加快电力行业的低碳转型。

近来，美国承诺到2030年，全经济范围的净温室气体排放量较2005年减少50%，到2035年电力行业实现零排放，并于2050年前实现全经济范围净零排放。美国电力行业的碳排放量必须在2030年前较2005年减少约80%，才能实现2030年的全国目标（Abhyankar等，2021；Larsen等，2021；Larson等，2021）。虽然与2005年的最高峰相比，美国电力行业的碳排放已经显著减少，目前零碳排放发电占40%，但要在2030年达到80%、2035年达到100%，需要大幅加快部署清洁能源并淘汰化石能源。行业专家普遍认为，这些目标可能实现，并且能够显著改善公共健康，创造新就业岗位，甚至可能降低消费者电费（Abhyankar等，2022）。然而，要实现这些目标，需要制定更多政策，包括出台新的联邦法规和地方政府措施。

美国在联邦和地方层面的减排策略仍在不断发展。21个州以及哥伦比亚特区和波多黎各共占美国发电量的三分之一，这些地区均制定了100%清洁电力目标，但许多地区制定的是2050年的目标，而不是美国国家承诺中提出的2035年的目标¹。在美国41家规模最大的电力公司中，有39家电力公司已经公开承诺到本世纪中叶实现净零排放（Esposito与Jeffrey，2022）。美国联邦政府在2022年通过的大型基建法案支持了整体经济的减碳。这个法案包括为终端能源效率和输电项目提供资金（其中包括支持输电线路选址授权的条款），这些资金将用于支持可再生能源项目开发和可再生能源并网发电。2021年8月，美国通过了支持发展风能、太阳能、能效、储能、以及交通、建筑、和其他终端用能的电气化的一揽子财政激励政策。美国能源部预估这一政策到2030年可以将美国的全经济范围排放量减少40%（以2005年为基准）。在联邦政策的基础上，若各州也跟进颁布新政策，则美国达成全经济范围的2030年国家自主贡献目标（2030年达到2005年50%-52%的排放）指日可待。

2020年9月，中国政府公布了最新国家自主贡献目标，提出到2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和（又称“双碳”承诺）。中国政府还提出到2030年，非化石能源消费比重达到约25%，电力行业风电和太阳能发电总装机容量超过12亿千瓦（中华人民共和国，2021）。此外，“十四五”规划中提出，到2025年，非化石能源发电比重达到39%。风电和太阳能发电投资的迅速增长，意味着中国将超过2030年的风电和太阳能发电装机容量目标，但中国依旧需要在电力行业持续推行改革，以支持大量新可再生能源并网发电，实现长期脱碳目标。

机会与挑战

为了充分抓住清洁能源所带来的机会并实现脱碳目标，中美两国以及世界各国的政策制定者目前正在考虑电力行业面临的一系列问题。这些问题基本类似，其核心在于如何在拥有高比例风力发电和太阳能发电的情况下保证电网的可靠性，所幸，这些问题目前是有解决方案的。即使在风力发电和太阳能发电渗透率非常高的情况下，依旧可以通过妥善设计的政策、市场和监管框架，建设高度可靠的电力行业。包括美国和中国在内，越来越多的国际经验已经证明了这一点。下文总结了中美两国共同面对的重要机会和挑战。

¹ 关于这些州的清单，请参阅清洁能源州联盟网站。<https://www.cesa.org/projects/100-clean-energy-collaborative/>

可靠性挑战

中美两国近期都遭遇了区域性电力行业可靠性挑战。两国都有一些利益相关者认为，在构建以清洁能源为主体的电力系统和其他目标（例如电力行业可靠性与能源安全等）之间需要有所取舍。这种观点会威胁能源转型的进展。有证据表明，电力行业改革措施不仅能够增强电力行业的可靠性，还能以较低（甚至更少）成本加快向清洁能源转型（Abhyankar等，2022；能源研究所，2022；Geocariss，2022），具体建议如下。

2020至2021年，美国最大的两个州，加利福尼亚州和得克萨斯州均遭遇了极端气候和用电短缺。在加利福尼亚州，极端局部高温和野火威胁到区域化石燃料发电厂、输电系统和风电出力的可靠性，导致该区域轮流限电。在得克萨斯州，极端严寒导致大量燃气发电机组关停，在危及生命的天气状况下延长了停电时间。2022年，美国国家电网可靠性监管部门警告，由于燃煤发电厂退役速度超出预期以及没有迅速补充替代容量，极端高温可能威胁美国大多数电网在夏季的可靠性（北美电力可靠性公司，2022）。尽管2022年没有发生这样的停电事件，但在可再生能源占比高的地区却有几次几乎要发生险情。

2021年，中国经历了一系列电力危机，影响了国内大片地区，数以百万计的用户遭遇了停电。2022年夏，中国部分地区受到热浪侵袭，且遭遇了严重干旱，导致水力发电大幅减少，再度暴露出可再生能源发电的可靠性问题，其中华中地区尤为严重。

燃煤发电容量的控制与退役

燃煤发电是排放强度最高的电力来源之一，在中美两国，电力行业的碳排放大部分都来自燃煤发电。2022年4月，联合国政府间气候变化专门委员会发布的报告中指出，“若要将升温限制在2摄氏度或更低水平，全球能源结构需要迅速转变对没有减排措施煤电的依赖……这需要停止新建燃煤发电项目，并加快淘汰现有燃煤发电厂。”（政府间气候变化专门委员会，2022）。使用煤炭造成的空气污染和水污染还产生了巨大的公共健康成本。

幸运的是，提供经济可靠的电力供应，并不需要新建燃煤发电，这一点越发清晰可见。在国际上，设计完善的市场和规划机制不再将新增燃煤发电容量作为满足电力系统需求的最佳解决方案，其原因如下：首先，在美国、中国以及其他许多国家，太阳能发电和风力发电的平准化成本目前接近甚至低于燃煤和燃气发电厂的燃料成本，这意味着新建太阳能发电和风力发电厂的成本，可能低于运行现有火电厂的成本（国际可再生能源署，2022）。2021年和2022年多个国家的煤炭价格上涨，进一步扩大了可再生能源的成本优势。其次，与水力发电、需求响应、储能和燃气发电相比，燃煤发电快速调整发电量以补充低成本风电和太阳发电的能力相对不足（Lin等，2022；Lu等，2019）。

过去十年，美国持续减少燃煤发电，并淘汰燃煤发电厂，已经取得了显著进展。燃煤发电在2007年达到最高峰，目前已经减少了55%。美国有希望在2030年前停止使用未减排煤电，但为了淘汰最后剩余的未减排燃煤发电厂，美国可能需要在国家和地方层面采取更多行动。在美国许多地区，煤炭开采和燃煤发电依旧具有重要的文化、经济和政治意义。此外，由于一些电力公司无需负担煤炭造成的全部社会（如健康）成本，同时出于对搁浅资产的担忧，导致其推迟燃煤发电退役。事实上，在美国，通过在当地开发低成本清洁能源发电组合以取代淘汰的燃煤发电的机会，几乎无处不在（Gimon、Myers与O' Boyle，2021）。2021年《基础设施投资与就业法案》和2022年

《通胀削减法案》向依赖煤炭的社区提供拨款和激励，促进投资清洁能源生产，并为电力行业从煤炭向清洁基础设施转型提供低成本融资。

上文所提到的一些因素与中国的电力行业息息相关。一套设计完善的、“科学的”市场和规划机制，例如电力行业改革目前所推行的这些机制，将找出比新建化石能源发电更环保、成本更低的解决方案，以支持可再生能源比例越来越高的电网。这些经过改良的机制也可能会反对用效率更高的燃煤发电厂“减量替代”旧燃煤发电厂的主张。使用更清洁、更灵活的资源，包括需求响应和储能等，取代旧燃煤发电厂，可能成本更低，更有助于保证电网可靠性。

区域一体化

扩大电力平衡区的地理覆盖范围，将有利于实时优化电网供需平衡，为新输电线路与新资源规划提供帮助。这种区域性方法能够以低成本，有效提高系统可靠性，并支持风能和太阳能并网发电（国际可再生能源署，2019）。在广泛的地理区域内开展实时经济调度，指导可调度的化石能源（采购和燃烧化石能源都会产生成本），根据零边际成本的风能和太阳能互补资源的可用性调整发电量，可以降低成本，并提高可再生能源在发电组合中的比重。在广泛的地理区域内统一进行实时经济调度充分利用了风电和太阳能发电量的多样性，这样做能够提高风电和太阳能发电对系统可靠性的贡献，降低可再生能源并网发电成本，并减少对化石能源储备的需求。中美两国在这方面都取得了显著进展，但依旧有更多机会可以充分利用区域一体化能够带来的好处。

美国的区域输电组织（RTO）具有竞争性市场和在广泛的地理区域内进行实时经济调度的特点，在区域协调方面表现出色。这些市场覆盖了美国约三分之二的国土面积。美国东南部和西部地区目前没有区域输电组织，但西部已经在逐步朝着这个方向转型，并建立了临时区域市场机制。东南部地区虽然相对落后，但最近增加区域协调的工作正在初步进行中。区域输电组织覆盖的地区已经获得了实质性的好处，包括降低消费者电费和减少排放等。这些市场的可再生能源投资和低燃气价格，均对燃煤发电形成了竞争压力，从而推动了燃煤发电快速退役。然而，随着可再生能源投资日益增加，为了支持10亿千瓦清洁能源并网发电，区域输电组织和各州对新输电线路进行充分规划和合理选址的能力将受到考验。

中国电力系统在消纳快速增长的风电和太阳能发电方面已经有巨大进步。但与美国和其他国家一样，中国依旧需要开展大量工作，以确保电网能够支持更高比例的可变可再生能源发电并网。国内输电网络已有的大规模投资，有助于连接广泛的地理区域以及平滑远距离的供需波动。中国的政策制定者还出台了相关新政策，包括通过市场化机制保证这种现代化电网网络的高效运行等。2022年1月出台的建设“全国统一电力市场体系”的政策是非常重要的一个进步，该政策尚待有完善的空间，以确保得以成功实施。

系统灵活性

随着风电和太阳能发电的持续增长，维持系统可靠性需要在不同时间尺度管理更频繁的发电变化。由于对天气的依赖，风能和太阳能发电增加了可变性，因此需要能够调整发电量以填补这种变化的资源，这种特性被称为“灵活性”，其中包括供需的短期（秒、分钟和小时）和长期（如周级）波动。为了管理这种变化，需要识别、构建和协调具备适当特性的、具有经济性的发电资源组合，从而支持清洁能源电网建设。而达成这个目标需要有设计完善的一系列政策，以及相关市场机制、规划过程和规章制度（请参阅图2）。

美国的能效政策基本属于州和地方问题，尽管联邦政策会提供一些财政支持。地方建筑条例旨在提高新建筑的能效，而一系列联邦和州政策则规定了家用电器的能效标准。对能效的公共投资一部分会通过由州政府监管的电力公司项目实施，但各州在这方面的经验好坏参半。

如加利福尼亚州和马萨诸塞州等领先的州执行了能效资源标准和电力公司激励措施，利用财政激励和消费者教育项目取得了显著的节能效果（Berg、Cooper与DiMascio，2022）。这些项目通常都会采用与电力公司的收入“脱钩”机制，以减少节能对其财务健康状况的负面影响（Lazar，2016）。有些州要求进行综合规划，将电力行业的传统资源投资与能效方案投资进行对比。其余州则很少出台支持能效投资的政策。各州公共电力公司监管机构、州立法机关和联邦基金有许多机会提高州和地方的能效，保证将能效投资纳入电力行业的规划过程。

中国2021年发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中强调，“把节约能源资源放在首位”。这是一个非常重要的承诺，有望通过管理需求增长以提高系统可靠性，减少能源进口以改善能源安全，同时降低系统成本并减少排放。然而，该政策并未详细说明如何将“节约优先”承诺纳入正在开展的电力行业改革当中。中国还出台了一项重要的需求侧管理政策，提出了电网公司对终端节能的投资需要达到的目标。虽然该政策要求实现的目标仅为电网公司上年售电量的0.3%，但鉴于中国电力行业庞大的规模，按照年度节能量计算，这可能是全世界最大的电力公司节能义务。

对美国电力市场的一些建议

美国联邦制度下的法律体系将电力行业监管的权力分权授予了联邦和州政府。联邦政策是一个关键杠杆，最近在联邦政府花费支出的优先事项上可以看出，这将极大推动清洁能源经济发展，促进新兴清洁能源技术投资，并加快技术部署的步伐。因此，联邦政府和各州进一步开展工作落实这些政策，对于发挥联邦清洁能源补贴措施的潜力，减少排放并实现美国气候目标至关重要。

加快扩建输电容量

美国目前拟建清洁能源项目超过10亿千瓦，已经申请并网发电，几乎足以实现2030年的脱碳目标。这个数字在最近几年大幅增长，主要是受到经济环境的影响，以及消费者对风电、太阳能发电和电池的兴趣的推动。随着并网队列越来越长，输电互联过程变得更加复杂，目前平均需要四年时间。美国电网运营商须找到梳理并网名单的方法，以便优先考虑最可行的项目，同时改革规划过程，增加必要的输电容量。这些项目包括海上风电——由于近年其成本逐年降低，海上风电已经开始成为经济实惠的能源选择。美国联邦能源监管委员会已经开始着手制定规则，以实现这方面的潜力。

美国联邦电力监管机构，电力公司以及区域输电组织可以考虑以下做法：

- 出台新规定，要求在制定区域输电规划和成本分摊规则中，增加经济性清洁能源项目接入电网的机会；
- 明确将缩短并网排队时间，并且为具备充足输电容量的项目制定快速审批的标准。

提升区域一体化，完善电力市场

最近的极端气候事件，包括极端高温，考验了美国电力系统的弹性。随着电网发电越来越依赖天气情况，在更广泛的地理区域内增加电网的连接和协调，是以较低成本提高系统可靠性的关键。这方面可以采取两种形式。

首先，西部和东南部各州对于输电系统和发电厂的管理依旧碎片化，类似于中国的省级系统运营模式，且这些州所覆盖的地理范围通常更小。因此，各州和电力公司无法利用相邻州成本更低的能源所带来的可靠性和成本效益。

其次，即使在区域输电组织覆盖的地区，跨区输电容量有助于提高可靠性，获得低成本的可再生能源，并顺利度过极端天气。国家可再生能源实验室的研究显示，增加三个国家电网之间的互联，能够产生巨大的净效益，增加系统弹性（Bloom等，2022）。

在未来高比例可再生能源发电的情况下，为了提高电力系统的可靠性和弹性，可以考虑：

- 在州和联邦层面，制定资源充足性指标和市场化产品，以确认和维护发电资源组合的可靠性价值，包括可再生能源、储能、需求响应和可调度容量等；
- 西部和东南部各州，应该在联邦能源监管委员会的指导下，加入统一的区域输电组织，参与统一的现货市场，并共同承担可靠性义务；
- 美国能源部应该研究构建国家级“广域电网”（“macrogrid”）的可行性，将关键的可再生能源区域连为一体，并对其效益进行量化，包括系统弹性；
- 能源部应该将区域间的高压电网互连指定为“国家利益输电走廊”，以支持这些重要输电线路的投资和建立；
- 联邦能源监管委员会应该对新跨区输电线路的研究和规划提出更多要求。

更新州电力公司规划流程

美国各州在现有法律框架下，依旧有可观的自主权可以决定本州的电力资源。常见的做法是由接受监管的电力公司将15至20年资源规划提交监管机构审批，并定期进行更新。许多规划流程要么已经过时，要么受到电力公司控制而维持现状。对清洁能源的新补贴意味着电力公司和消费者需要更新规划过程，综合考虑最新技术成本，并使用现代化工具评估高比例可再生能源电力系统的可靠性需求。除非更新这些流程，否则各州在采用经济可行的风电、太阳能发电和储能资源时将行动迟缓，放弃节约成本的机会，并且威胁到美国实现其气候目标的能力。

美国的电力公司及其监管机构可以考虑：

- 着手制定新规则，通过竞标评估清洁能源的经济性，制定加快电力转型的计划；
- 制定与国家国际气候变化减缓标准一致的新清洁能源目标（并规定相关采购），如到2030年零排放电力占比达到80%的目标；
- 协调规划过程与区域活动，规划并扩大输电容量；
- 采用先进的模拟工具，准确模拟储能、风电和太阳能发电占比较高的电力系统；
- 将电力公司的盈利能力和成本与清洁能源应用绩效挂钩。

化石能源退役和社区转型

虽然美国燃煤发电厂的数量持续减少，但它们依旧是一种关键的可靠性资源，也为本地经济发展做出了贡献。新型清洁能源和更大的系统灵活性可以取代煤炭所提供的可靠性服务，而且这些解决方案也可以振兴依赖煤炭产业的社区。例如，燃煤发电厂退役之后留下的输电容量，有助于加快本地清洁能源的发展。当前执行良好政策的例子包括2021年联邦《基础设施投资与就业法案》，该法案规定了拨款和税收优惠，旨在鼓励在依赖煤炭产业的社区发展清洁能源生产制造业，除此之外，科罗拉多州还成立了“公正转型办公室”（Just Transition Office）。

为了通过发展清洁能源，振兴依赖煤炭产业的社区，联邦和州政府可以考虑：

- 授权州公共事业委员会创建电费用户担保债券，将经济性差的燃煤发电和燃气发电机组证券化并淘汰，减少电力公司的用户支付高额资本成本的义务，同时为电力公司的合理投资提供补助。联邦政府也应就上述举措为电力公司提供财政支持；
- 提供临时资金补充退役煤炭基础设施导致的税基缺口，并考虑设立州公正转型办公室；
- 通过投资清洁能源、开展就业培训和提供公共服务临时资金等，为依赖煤炭产业的社区创造经济机会。

优先发展能效和需求响应

能效和需求响应是为满足未来的能源需求可以使用的成本最低的零碳资源。虽然美国经济的效率持续提高，但美国的现有建筑依旧有许多以低成本提高效率的机会。州和地方政府负责控制建筑施工与能源定价规则。

为了充分释放能效实现气候目标的潜力，各州和地方政府可以考虑：

- 根据国际最佳实践更新地方和州建筑条例，包括要求新建筑安装屋顶太阳能的规定；
- 开发绿色银行或电力公司融资等项目，帮助低收入用户提高能效和获取分布式能源提供资金支持；
- 要求电力公司将能效措施纳入规划。开发电力公司主导的能效激励项目，以投资经济高效的能效措施；
- 电力公司应该提供分时电价和尖峰电价项目，对调整用电需求并促进系统可靠性的消费者提供奖励。电价设定应该鼓励消费者将分布式太阳能发电与储能相结合，从而使电网受益。

对中国电力市场的一些建议

在做出具有里程碑意义的双碳承诺之后，中国政府于2021年年底发布了“1+N”脱碳框架下的第一批文件。首批文件中包括针对电力行业的高层指导方针，要求通过“推动清洁电力资源大范围优化配置”，以“加快建设新型电力系统”（中国国家发展和改革委员会，2021a，2021b）。在中国可再生能源投资高速发展的基础上，本节为落实这些政策提供了一些切实可行的方法，旨在同时控制成本，加快实现双碳目标的进程。

完善和落实“全国统一电力市场体系”

2022年1月，国家发展和改革委员会（NDRC）与国家能源局（NEA）共同印发了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》（发改体改〔2022〕118号，以下简称“118号文件”），向电力行业的区域和全国一体化迈出了至关重要的一步（中国国家发展和改革委员会，2022年）。

基于对118号文件的解读，我们认为加强以下几方面的工作，将对完善电力市场起到重要作用：

- 优先建设现货市场。118号文件中提到了正在国内试点的中长期市场，我们建议将重点放在构建全国（或至少跨省的）统一现货市场上。现货市场的设计应该发出随时间和地理位置变化的合理信号，以支持系统灵活性。全国或区域现货市场的设计应该注重实用性，无需向目前试点的省级现货市场一样复杂²。此外，目前执行的中长期合约市场是系统灵活性面临的障碍，应该转变成一个金融市场，其主要功能是允许市场参与者对冲现货价格；
- 第118号文件中提出的建立“发电容量成本回收机制”以“保障电源固定成本回收”，可能有待慎重考虑。只有为满足系统可靠性（如科学规划过程中所确定）而需要的、符合政策标准（包括空气质量标准）的资源，才应该被允许回收固定成本。另外重要的一点是，要避免向过剩的煤电资源以及新增煤电项目承诺支付容量电价。

透明的电力行业规划在转型过程中支持系统可靠性

为了配合“五年规划”的进程，电网公司和研究机构等均开展了详细的电力行业规划，但这些规划过程未做到足够透明，也没有经过充分协调，无法在可再生能源达到高渗透率的情况下，支持可靠的、高效的和竞争性的市场化电力体系。我们建议更新国家能源局2016年发布的《电力规划管理办法》³，创建国家规划框架，明确三个互为关联且透明的规划流程，每个规划流程均发布报告，接受国家能源局审批，并将数据在线公布，这三个规划流程分别是：

- 季度规划流程，用以评估和管理近期风险并支持系统可靠性。该规划流程逐年滚动进行，每年发布两份报告。这对于管理用以缓解2021年电力危机的措施以及评估危机带来的经验教训，可发挥重要价值；
- 中期最低成本资源规划流程，完善现有的五年规划过程。该规划流程将确定，若要实现既定脱碳目标和其他政策目标，电力行业所需的最低成本新资源组合（以及应退役的资源）。滚动时间跨度为5至10年，每年发布报告；
- 长期输电系统规划流程，用以检验实现清洁能源转型的不同长期途径。滚动时间跨度为20年甚至更长时间，每两年发布一份报告。

我们建议中国考虑欧盟的新规划实践。欧洲输电系统运营商联盟作为整个欧洲的规划部门，为更好地支持清洁能源电网开发了一系列透明规划过程，每个过程有不同时间期限（欧洲输电系统运营商联盟，2021）。

² 刚开始，可以委任调度中心和交易中心做两方面工作：第一，在每个跨省区域市场实施一套统一的经济调度方法；第二，基于预估的系统边际成本，为现货市场制定电价。在确保系统稳定性的同时，按照“循序渐进”的方式，随着对各区域市场运行的成熟度而逐渐完善成更具竞争力的系统。

³ 可登陆这里查看2016年的框架：http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5145577.htm。

支持低成本系统灵活性的政策

中国的“1+N”框架提出“构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统……大力提升电力系统综合调节能力，加快灵活调节电源建设……”，上文提到的市场和规划改革措施，有助于优化资源以提供灵活性。这些措施还将有助于避免高成本、高污染和低效率的选择，包括不必要的新燃煤发电容量。中国可以考虑出台更多政策和监管机制，以支持低成本灵活性，比如以下几方面：

- 2021年，国家发改委发布了在全国实施分时零售电价的规定⁴。各省政府在执行该规定方面取得了良好的进展，如果可以进一步完善这方面工作，且确保达到综合全面，那将是很具有意义的。例如，包括输配电成本在内的所有系统成本，都应在分时电价设计中有所体现；
- 中国政府在碳达峰行动方案中提出发展“虚拟电厂”（VPP），即分布式发电资源和需求侧资源的组合。国家可以考虑出台配套措施，允许他们公平、全面的参与新的电力现货市场，以认定和合理补偿这些资源为系统所能带来的各种服务的全部价值。目前一些省级试点现货市场正在研究这些政策。

“把节约能源资源放在首位”承诺纳入电力行业改革

中国的节能承诺对于脱碳工作非常重要，类似于欧盟在2015年提出的具有里程碑意义的“能效优先”原则。“能效优先”原则使欧盟得以专注于将能效作为一种低成本资源，用于提高电力系统可靠性、通过减少能源进口达到改善能源安全和减少排放的效果⁵。然而，欧盟仍需要加大力气执行这些政策，并保证将能效真正作为电力行业的优先资源。

为了保证中国电力市场改革能够充分和节能承诺相结合，我们提供以下建议供参考：

- 制定具体规则，要求电网公司将节能和其他需求侧资源作为“非电网替代方案”进行评价和投资。或者可以理解为“虚拟输配电资产”，这就与中国的虚拟电厂政策相得益彰；
- 目前从建筑中淘汰煤炭燃料的进程中，应该在强调电气化的同时，停止煤改气。这可将高成本的天然气用于更有价值的用途，包括较难实现电气化的工业部门；
- 在国家发改委2010年《电力需求侧管理办法》的指引下，扩大电网公司年度节能目标⁶。

机会与合作

鉴于中美两国都在面对相似主题的技术和政策挑战，两国可以在多个领域继续开展合作，包括：

- 从彼此的电力行业改革中相互吸取经验教训，包括市场、规划、定价、运行、需求侧并网等领域。两国政府人员、电网运营商和其他利益相关者之间可以举行会议。例如，增加国家能源局（及下属区域监管部门）与联邦能源监管委员会等美国政府部门之间的互动，可能会卓有成效；
- 共同协调清洁能源部署目标和清洁能源目标，尽早实现零碳电力占比达到80%的目标，认识

⁴ <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18212>

⁵ https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle_en

⁶ 中国国家发展和改革委员会. (2010).《电力需求侧管理办法》（发改运行[2010]2643号）.

到两国承担责任的相同和区别之处；

- 开展技术知识交流，包括需求响应、输电、氢和车辆到电网集成等领域；
- 开展科学交流，了解气候变化对电网可靠性和弹性的影响，并联合制定政策、分析和技术解决方案。

致谢

感谢以下人员对本报告提供的审阅：Lin Jiang博士（劳伦斯伯克利国家实验室）、Robert Weisenmiller博士（加利福尼亚州能源委员会前主席）、谢鹏飞博士（睿博能源智库）、Anand Gopal博士（Energy Innovation：能源创新公司）和Silvio Marcacci（Energy Innovation：能源创新公司）。

参考文献

1. Abhyankar, Nikit, Jiang Lin, Fritz Kahrl, Shengfei Yin, Umed Paliwal, David Wooley, Amol Phadke, Mike O'Boyle, Michelle Solomon, Robbie Orvis, and Olivia Ashmoore. 2022. *Achieving an 80% Carbon Free Electricity System in China by 2035*. Lawrence Berkeley National Laboratory, UC Berkeley, and Energy Innovation.
2. Abhyankar, Nikit, Umed Paliwal, Taylor McNair, David Wooley, Mike O'Boyle, and Amol Phadke. 2021. *2030 Report: Powering America's Clean Economy, A Supplemental Analysis to the 2035 Report*. UC Berkeley, GridLab, and Energy Innovation.
3. Berg, Weston, Emma Cooper, and Marianne DiMascio. 2022. "State Energy Efficiency Scorecard: 2021 Progress Report." Retrieved August 29, 2022 <https://www.aceee.org/research-report/u2201>
4. Bloom, Aaron, Josh Novacheck, Greg Brinkman, James McCalley, Armando Figueroa-Acevedo, Ali Jahanbani-Ardakani, Hussam Nosair, Abhinav Venkatraman, Jay Caspary, Dale Osborn, and Jessica Lau. 2022. "The Value of Increased HVDC Capacity Between Eastern and Western U.S. Grids: The Interconnections Seam Study." *IEEE Transactions on Power Systems* 37(3):1760–69. <https://doi: 10.1109/TPWRS.2021.3115092>
5. 中国国家发展和改革委员会.2021a.《2030年前碳达峰行动方案》.检索于2022年8月29日，网址 https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211027_1301020.html
6. 中国国家发展和改革委员会.2021b.《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》.检索于2022年8月29日，网址 https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211024_1300725.html
7. 中国国家发展和改革委员会.2022年.《加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》.检索网址 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202201/t20220128_1313653.html?code=&state=123
8. Crossley, David. 2014. *Energy Efficiency as a Resource for the Power Sector in China*. Beijing: Regulatory Assistance Project.
9. Dupuy, Max, and Carl Linvill. 2019. "Implementing Demand Response 2.0: Progress toward Full Potential in the United States." *The Electricity Journal* 32(7):106622. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106622>
10. 能源研究所.2022年.《2022年中国能源转型展望》.中国宏观经济研究院.
11. ENTSO-e. 2021. "ENTSO-E中国电网规划建模展示报告." Retrieved August 29, 2022.

<http://www.ececp.eu/zh/entso-e-cn/>

12. 能源系统集成研究会. 2022. *Design Study Requirements for a U.S. Macrogrid*. Reston, VA: Energy Systems Integration Group.
13. Esposito, Dan, and Kimani Jeffrey. 2022. "How States and Utilities Can Capitalize on the Biggest Clean Energy Legislation in US History." *Utility Dive*, August 31.
14. Geocar, Madeline. 2022. "A Decade of Transformation: What We Have Learned Since RE Futures Showed What Was Possible." Retrieved <https://www.nrel.gov/news/features/2022/re-futures.html#:~:text=the%20video%20tag-,A%20Decade%20of%20Transformation%3A%20What%20We%20Have%20Learned%20Since,Futures%20Showed%20What%20Was%20Possible&text=The%20year%20is%202012.,of%20the%20U.S.%20electricity%20supply>
15. Gimon, Eric, Amanda Myers, and Mike O'Boyle. 2021. *Coal Cost Crossover 2.0*. Energy Innovation.
16. 国际能源署. 2022. *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021*.
17. 政府间气候变化专门委员会. 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III.
18. 国际可再生能源署. 2019. *Regional Markets – Innovation Landscape Brief*. International Renewable Energy Agency.
19. 国际可再生能源署. 2022. *Renewable Power Generation Costs in 2021*. International Renewable Energy Agency.
20. Larsen, John, Ben King, Emily Wimberger, Hannah Pitt, Hannah Kulus, Alfredo Rivera, Naveen Dasari, Claire Jahns, Kate Larsen, and Whitney Herndon. 2021. *Pathways to Paris: A Policy Assessment of the 2030 US Climate Target*. Rhodium Group.
21. Larson, Eric, Chris Greig, Jesse Jenkins, Erin Mayfield, Andrew Pascale, Chuan Zhang, Joshua Drossman, Robert Williams, Steve Pacala, Robert Socolow, Ejong Baik, Rich Birdsey, Rick Duke, Ryan Jones, Ben Haley, Emily Leslie, Keith Paustian, and Amy Swan. 2021. *Net Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts, Final Report*. Princeton, NJ: Princeton University.
22. Lazar, Jim. 2016. *Revenue Regulation and Decoupling: A Guide to Theory and Application*. Regulatory Assistance Project.
23. Lin, Jiang, Nikit Abhyankar, Gang He, Xu Liu, and Shengfei Yin. 2022. "Large Balancing Areas and Dispersed Renewable Investment Enhance Grid Flexibility in a Renewable-Dominant Power System in China." *IScience* 25(2). doi: 10.1016/j.isci.2022.103749.
24. Lu, Hong, Caixia Wang, Qionghui Li, Ryan Wiser, and Kevin Porter. 2019. "Reducing Wind Power Curtailment in China: Comparing the Roles of Coal Power Flexibility and Improved Dispatch." *Climate Policy* 19(5):623–35. doi: 10.1080/14693062.2018.1546164.
25. MacDonald, Alexander E., Christopher T. M. Clack, Anneliese Alexander, Adam Dunbar, James Wilczak, and Yuanfu Xie. 2016. "Future Cost-Competitive Electricity Systems and Their Impact on US CO₂ Emissions." *Nature Climate Change* (6):526–31.
26. 北美电力可靠性委员会. 2022. *2022 Summer Reliability Assessment*. North American Electric Reliability Corporation.
27. Novacheck, Josh, Greg Brinkman, and Gian Porro. 2018. *Operational Analysis of the Eastern Interconnection at Very High Renewable Penetrations*. NREL/TP-6A20-71465. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

28. 国家可再生能源实验室. 2012. *Renewable Electricity Futures Study. Volume 1: Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures.*
29. 中华人民共和国. 2021年. 《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》.
30. Phadke, Amol, Umed Paliwal, Nikit Abhyankar, Taylor McNair, Ben Paulos, David Wooley, and Ric O'Connell. 2020. *The 2035 Report: Plummeting Solar, Wind, and Battery Costs Can Accelerate Our Clean Electricity Future.* Goldman School of Public Policy, University of California Berkeley.

