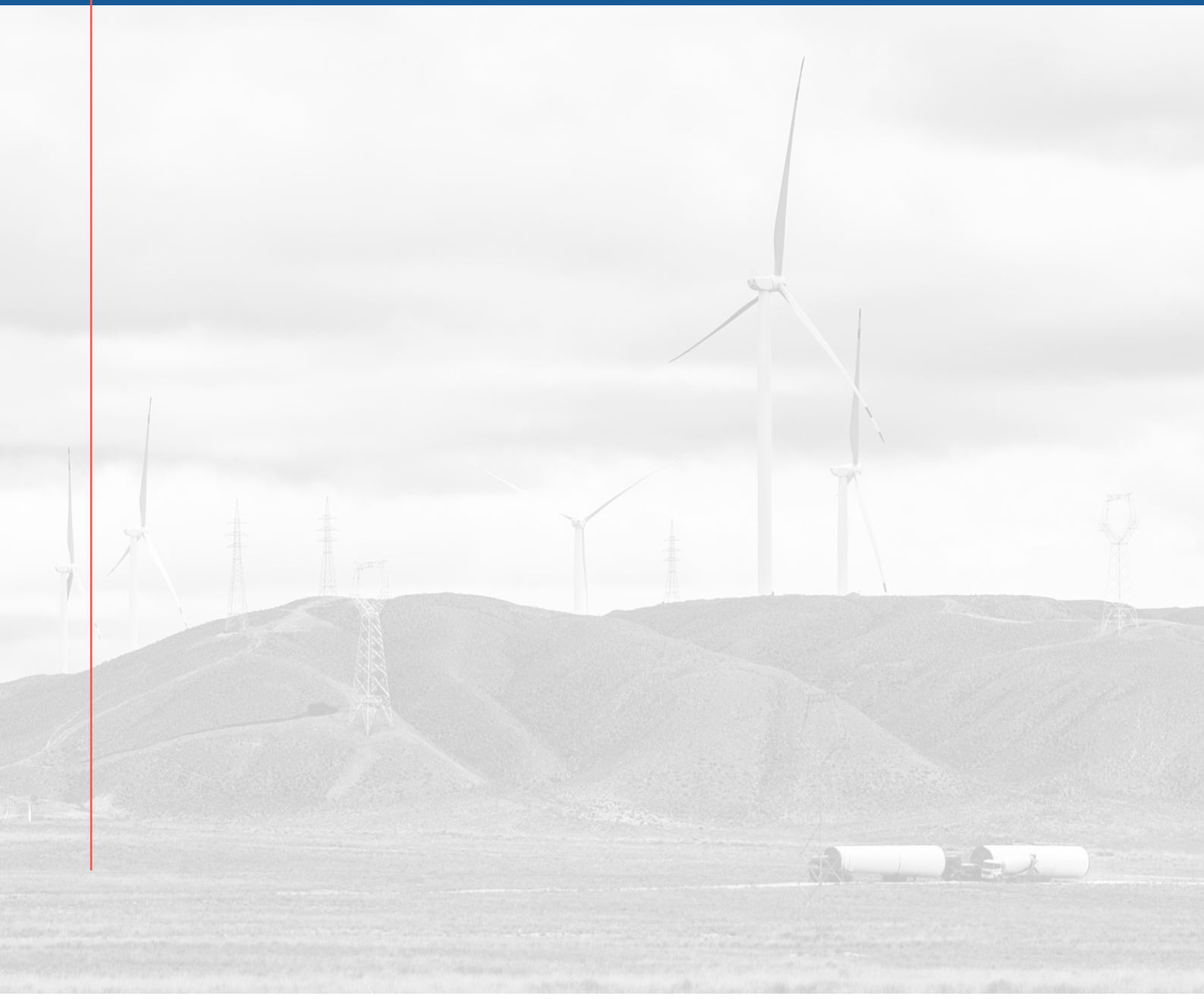


中国西北地区电力行业转型和煤电退出路线图

政策和监管策略

睿博能源智库



概述¹

中国政府制定的碳达峰和碳中和目标以及日益严格的空气质量标准，将会对电力行业产生巨大的影响。同时，还要在降低电力系统成本时保持系统稳定性。为了实现这些目标，中国的电力行业需要从以煤炭为主导的发电组合，向非化石资源组合转型。这将需要在满足国家环境目标的同时，以提高运行和投资效率为重点的持续的政策改革。

向有针对性的非化石资源组合转型，需要以提高运行和投资效率为重点的持续的政策改革。

要满足中国新近制定的气候和能源目标（见下页方框），电力系统需要发生巨大的改变。幸运的是，发展风电和光伏发电以及储能的成本在最近几年内已经显著减少。然而，要完全发挥成本减少的优势，确保优化的资源组合，激励理性的

煤电退役，以及促进有效的电力系统运行，在电力行业改革和相关的能源政策领域还有很多工作要做。许多国家正在面对类似的为支持低碳政策改革所面临的挑战，各有各的问题和阻碍。

在电力行业转型过程中，西北地区面临着相似的挑战，然而，也具备独特的机遇。西北地区拥有丰富的可再生能源资源潜力，在电力领域有着长期的区域合作传统。同时，该地区在燃煤发电方面存在严重的产能过剩问题，是国务院国有资产监督管理委员会（国资委）牵头的中央企业煤电资源区域整合的试点地区。此外，该地区曾出现过高弃风、弃光和弃水率，不过，近年来“三弃”现象有所减少。最后，西北地区的经济发展面临挑战，这使其有别于迄今为止主导电力行业改革的沿海省份。

鉴于丰富的风电和光电资源潜力，西北地区有大幅度提高对中国其他地区的非化石能源发电净出口的机会。由于这些原因，中央政府可能会为这个地区提出更高的2030年可再生能源消纳目标，因此有必要提前考虑扩大可再生能源发展并为未来打下基础。无论如何，将需要电力体制改革和其他相关政策（包括国资委的区域煤电整合措施），在区域内互相协调的基础上不断取得进展。这会帮助实现西北地区电力行业转型和发挥成本有效地向其他地区出口可再生能源的机遇优势。本报告为支持西北电力转型提供了一些政策和监管策略。这些建议集中在三个主要领域：（1）采取区域性方法来提高电网运行效率；（2）协调中央和地方的退煤工作；（3）确保规划过程透明、一致并以科学为基础。我们提供实际的“下一步”电力行业改革和相关政策和行动，在借鉴国际和中

¹ 本篇文章受益于审阅专家小组的讨论以及所提出的宝贵意见。

国其他地区的经验之上提出策略建议²。

电力行业及中国的排放目标

最近，中国政府发布了一系列新的排放和能源目标。2020年9月，政府宣布了中国会在2030年前碳达峰并在2060年实现碳中和。12月，一项政策声明提出要在2030年前将非化石能源在一次能源结构的比重从之前承诺的20%提升到25%。根据清华大学气候变化和可持续发展研究院于2020年10月发布的“政策建议”情景，25%的非化石能源消耗目标意味着，2020年至2030年期间，中国一次煤炭总消费量将下降3.5%，这一期间中国电力行业的煤炭消费量可能也会下降³。2021年2月，国家能源局发布了2021年可再生能源消纳权重和2022-2030年预期目标建议的国家政策，给出了关于25%非化石能源目标的更多细节，包括将可再生能源在发电中的比例从2019年的28%增加到2030年的40%^{4,5}。同时，政府官员也正在为2025年第十四个“五年规划”设置空气质量改善目标。最近的五年规划成功地设置了更严格的空气质量目标，有理由期待“十四五规划”也会继续这个趋势⁶。

² 关于中国南方电网电力行业改革方案的讨论，详见Dupuy, M., Kahrl, F., & Wang, X. (2020) “能源革命”与电力行业改革:从国际对比视角看中国南方电网面临的挑战，睿博能源智库，https://www.raponline.org/knowledge-center/energy-revolution-power-sector-reform-insights-challenges-china-southern-grid-region-from-comparative-international-perspective_cn/ 本文发表于《南方能源观察》杂志。

³ 何健坤(2020年10月12日).“中国低碳发展长期战略与转型路径研究项目成果介绍”，PPT第八节，清华大学气候变化与可持续发展研究院。 <https://www.efchina.org/Attachments/Program-Update-Attachments/programupdate-lceg-20201015/Public-Launch-of-Outcomes-China-s-Low-carbon-Development-Strategies-and-Transition-Pathways-ICCSD.pdf>

根据“政策建议”情景预测，到2020年，一次能源消费总量由2020年的5000 Mtce增加到2030年的6000 Mtce，其中非化石能源占增长的70%。在此情景下，煤炭占能源消耗的比例从2020年的57%下降到2030年的45%，煤炭总消耗将从2020年的约2800 Mtce下降到2030年的2700 Mtce。

⁴ 北极星储能网(2021年2月10日). 能源局可再生能源消纳目标征求意见！2030年全国统一消纳责任权重40%。<http://chuneng.bjx.com.cn/news/20210210/1135946.shtml>

⁵ 2030年目标是否为实现2060年目标的最佳行动轨迹，也许是个不断发展的成本效益研究的主题。在林江和何钢的最新研究中，他们考察了中国的情况，假设了风能和太阳能成本持续下降的合理比率，并评估了2030年可再生能源目标为60%的情景。研究发现，鉴于廉价的风能和太阳能发电，与较低的可再生能源目标相比，该目标可实现显著的成本节约。如果考虑到与改善空气质量相关的社会效益，扩大2030年可再生能源目标的预期净效益甚至更大。林江，何钢(2021.2.2). 实现碳中和，中国需制订更具雄心的2030风能和太阳能目标。 <https://chinadialogue.net/zh/4/69954/>

与此同时，另一个研究小组最近构建了一个实现“低于2摄氏度”目标的相关情景。这一情景包括到2035年可再生能源在发电中的比重达到73%。国家可再生能源中心，国家发改委能源所宏观经济研究院(2020年).2019中国可再生能源展望。<https://www.ea-energianalyse.dk/en/publications/china-renewable-energy-outlook-2019/>

⁶ 除了碳排放目标之外，十四五规划还可能包括更严格的全国空气质量标准。2017年，西北地区要求开始实现更严格的细颗粒物浓度降低目标。“优化调整能源结构”旨在提高非排放、非化石燃料发电的份额，在一些省份的2017年空气质量规划是一个重要的元素，并可能在交通、建筑和工业领域的电气化的前提下更为重要。

报告结构

本报告由两个主要的部分组成：

- **背景：西北地区的主要趋势**概述了西北电力行业转型的关键背景，其中包括：
（1）可再生能源的快速增长和并网的挑战，（2）煤电产能过剩和煤电所有权的重组，（3）最初的电力市场的发展。
- **电力行业转型的政策和监管策略**为西北地区推荐几种电力行业转型的途径，如下：

系统运行：走向区域经济调度

建议1：通过给予区域电网公司权力来调整省级水电和煤电机组安排，维持和改善可再生能源优先调度

建议2：考虑实行分时上网电价

建议3：在单个发电集团公司的发电机组组合中，提高中长期合同下交付发电量的灵活性

建议4：在事后的基础上重新分配中长期合同款项以支持高效调度

建议5：继续发展现货市场，以形成区域现货市场为目标，或许可以借鉴美国“RTO”区域电力市场的经验

煤电资产退役：协调国资委在促进高效发电行为和可再生能源并网方面的作用

建议6：协调国资委煤电重组与更广泛的电力行业改革

规划能源转型：鼓励合理的投资和退役决策

建议7：合理化识别需要淘汰的燃煤发电机组的过程

建议8：根据最低成本规划确定新的资源投资组合

建议9：对区域近期系统可靠性进行严格的定期更新分析（备用容量研究）

建议10：完善储能的批发定价和运行模式

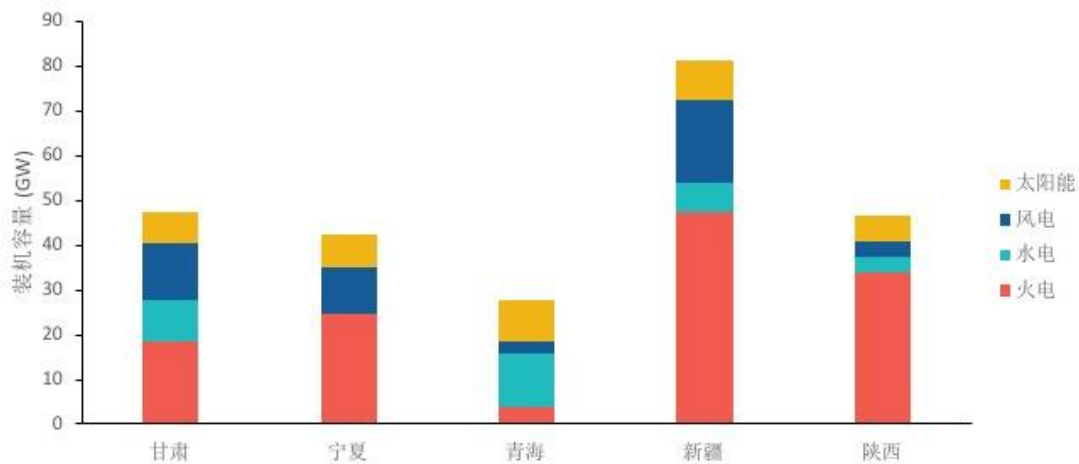
背景：西北地区的主要趋势

几个相互关联的趋势和因素正在塑造西北地区电力部门的转型。其中包括可再生能源的快速增长、燃煤发电产能过剩和燃煤发电所有权重组、电力市场的发展以及国家碳排放和空气质量政策目标。

可再生能源的快速增长和并网的挑战

过去十年，西北地区的风能和太阳能发电迅速增长，使该地区从对煤电以及（在较小程度上）水电的依赖转向了更加多样化的发电组合。现在，风能和太阳能发电占甘肃、宁夏和青海总装机容量的40%以上，占新疆和陕西总装机容量的30%以上（见图1）⁷。

图1. 2020年西北五省的预估装机容量



来源：基于各省级政府、电网公司和中国电力企业联合会公布的数据

太阳能和风力发电的快速增长导致了该地区电力系统的运行压力、某些省份太阳能

⁷ 截至撰写本文时，国家能源局尚未获得2020年各省的数据。因此，本图是基于各省、电网公司和中国电力企业联合会公布的数据得出的估算。甘肃省工业和信息化厅. (2021年1月8日). 2020年12月全省电力生产运行情况. <http://gxt.gansu.gov.cn/meiridongtai/bumendongtai/20210108/11341424226e7444b97.htm> 腾讯网.(2021年2月26日).这组数据告诉你宁夏电力发展有多“牛”.

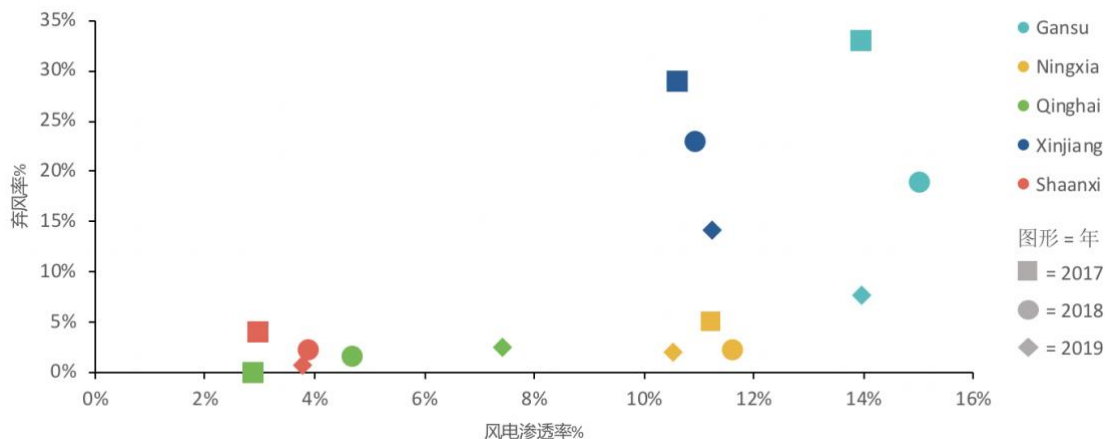
<https://new.qq.com/omn/20210226/20210226A0CFKR00.html> 北极星售电网.(2020年12月18日).陕西电力现货市场建设方案征求意见稿：2022年开展陕西电力现货市场结算试运行. 陕西省发改委.

<https://shoudian.bjx.com.cn/html/20201218/1123353.shtml> 国际能源网.(2021年1月23日)预计“绿电”交易规模25-30亿千瓦时！陕西省发布2021年新能源发电企业参与市场化交易实施方案. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2300723.shtml> 央广网.(2021年1月7日).青海新能源装机占比超六成，光伏成为第一大电源. http://news.cnr.cn/native/city/20210107/t20210107_525385768.shtml 中国电力网.(2021年1月5日).新疆电网总装机容量突破1亿千瓦，规模位居西北第一.科技日报.

<http://chinapower.com.cn/xw/gnxw/20210105/42013.html>

和风能的高弃电率以及对综合解决方案的需求。2017年，甘肃和新疆的弃风率分别达到33%和29%（见图2⁸）。同年，甘肃和新疆的弃光率分别达到20%和22%的峰值⁹。

图2. 2017-2019年西北地区的弃风率与风电渗透率的关系



来源：国家统计局(n.d.).各省总发电量;

能源局(2018年2月). 2017年风电并网运行情况;

(2019年1月). 2018年风电并网运行情况;

(2020年2月). 2019年风电并网运行情况.

在过去三年中，西北能源监管局和省政府机构实施了一系列为减少弃风、弃水和弃光做出贡献的政策，包括省、区域和跨区的电力交易机制。实施这些政策的部分原因是中央政府的具体目标和高层战略以减少弃风和弃光¹⁰。

在省一级，减少弃风弃光的机制包括建立调峰辅助服务市场和电能替代交易¹¹。在

⁸ 这里的风电渗透率是风力发电除以总发电量。总发电量数据来自国家统计局，可通过中国数据在线访问。弃风数据来源于能源局风电并网运行情况系列(2017 - 2019). 能源局(2018年2月). 2017年风电并网运行情况. http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm; 能源局(2019年1月). 2018年风电并网运行情况. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm; 能源局(2020年2月). 2019年风电并网运行情况. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm. 截至撰写本文时，2020年的数据尚未公布。

⁹ 数据来源于能源局光伏发电并网运行情况系列。能源局(2020年2月). 2019年光伏发电并网运行情况. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827923.htm; 能源局(2019年1月). 2018年可再生能源并网运行情况介绍. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780519.htm; 能源局(2018年1月). 2017年光伏发电新增装机5306万千瓦. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136920159.htm.

¹⁰ 国家发展改革委 国家能源局关于印发《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)》，https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201812/t20181204_960958.html

¹¹ 在西北等地区建立的深度调峰市场是中国特有的市场机制。它们允许火电通过将发电出力降低到指定的最低发电出力水平以下(与其他国家不同，这被称为“辅助服务”)通常约为额定容量的50%并以此获得补偿。这些市场是一种有效的机制，有助于减少弃风弃光，尽管随着风能和太阳能的渗透水平不断提高，这种方法可能会有局限。在电能替代交易中，有热电联产或其他表后发电的工业设施可以协商购买可再生能源发电，而不是使用自己的发电。

跨省跨区的层面上，包括对省级深度调峰市场进行补充的区域调峰辅助服务市场，可再生能源的发电权交易，省间互济协议，以及由国家电网公司和北京电力交易中心协助推动的跨区域省间富余可再生能源电力现货交易¹²。

尽管宁夏的风电渗透率很高，然而，一定程度上鉴于以上工作，在2017-2019年期间仍保持了较低的弃风率。同期间，甘肃和新疆的弃风弃光显著下降，尽管这两个省仍然是中国弃风率最高的省。同时，新疆和青海的弃光率在2019年超过7%¹³。这些省份的高弃电率表明该地区在管理弃电方面面临着持续挑战。

简而言之，西北地区为减少弃电所做的努力和取得的成果是非常重要的进展。然而，还有更长的路要走：低碳化意味着需要不断改善电力行业政策、规划和市场机制，以在不存在不经济弃电的情况下支持可再生能源渗透率的不断提高。特别地，在整个地区不断推动实施经济调度，对于应对太阳能和风能渗透率快速持续升高这一挑战至关重要（请参阅建议1至5）。正如我们在这些建议中讨论的，这不仅关系到调度途径的改变，也需要改变发电和其他资源获得补偿的方式，从而在新的调度方式下有充足的商业模式来支持合理的资源组合。

燃煤发电产能过剩和燃煤发电所有权结构调整

在各种类型的发电量快速增长和需求增长低于预期的作用下，自2010年以来，西北地区大部分省份的燃煤机组利用率一直在稳步下降。2019年，五省中有四个省的煤炭发电机组年运行小时数少于4600小时（容量系数为53%）¹⁴。运行时间的减少导致了燃煤发电企业的损失¹⁵。2018年，15个省的中央企业煤电业务出现了亏损，主要集中在东北、西南和西北地区。具体的说，西北五省中的四个省的中央煤电企业报告称，净亏损总计人民币53亿元（约8亿美元）¹⁶。

¹² 互济协议是按季节共享能源的非货币协议，通常是在水电资源丰富的地区和煤炭或天然气资源丰富的地区之间签署。2020年，青海和陕西签署了一项2020-2022年的互济协议，根据该协议，陕西在冬季每年将向青海出口3.2-3.5太瓦时的电量，而青海在夏季高峰时将向陕西出口0.5-2太瓦时电量。青海日报(2020年7月8日)。青陕两省签订中长期电能互济框架协议。 <https://m.yunnan.cn/system/2020/07/08/030777127.shtml>。

¹³ 本报告撰写之际尚未公布2020年的完整年度数据。国家能源局发布的公告显示，2020年，新疆的弃风率降至10%，甘肃降至6%，弃光率分别降至5%和2%。详见国家能源局(2021年1月21日)。“国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录”， http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm 根据2020年的月度累积数据表明，青海的弃光率上升至8%。月度数据来自全国新能源消纳监测预警中心的“2020年四季度全国新能源电力消纳评估分析”。详见北极星电力发电网(2021年2月)。 <https://news.bjx.com.cn/html/20210207/1135111.shtml>

¹⁴ 数据来自Sinolink Securities (2020).西北煤电合并方案出台，提升回报保供应。 http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202005251380197092_1.pdf

¹⁵ 2017年煤炭价格的大幅上涨也造成了煤炭发电企业的财务损失。

¹⁶ 中国碳交易网(2019年11月29日)。中国碳交易网“重磅！国资委发布《中央企业煤电资源区域整合试点方

作为回应，国有资产监督管理委员会在2019年11月宣布了西北地区中央企业煤电资产区域整合计划，将煤电资产划转给每个省的一个中央企业（“一省一企”）¹⁷。国资委的政策还要求加快淘汰西北地区不需要的燃煤发电资产，力争到2021年末，“煤电产能压降四分之一至三分之一”¹⁸。该政策还号召大幅增加剩余中央煤电企业的年度发电小时，并提高剩余燃煤发电机组的运行效率¹⁹。

总体而言，国资委该计划是向前迈出的非常重要的一步，不仅代表着国有发电公司在财务合理化方面取得了进步，而且也为中国实现碳达峰和碳中和目标迈出了坚实的一步。我们在下面讨论了对完善该计划的一些建议，以及如何避免可能的缺陷、如何与该地区电力部门政策的其他方面更好地进行协调等。

央企在各省的燃煤发电资产所有权份额以及按照国资委的计划被划转的燃煤发电比例，在西北各省之间有所不同。例如，根据公开数据，在甘肃和陕西，中央发电企业是燃煤发电资产的主要所有者，重组前约占每个省燃煤发电总装机容量的55%-60%²⁰。

由于这些所有权统计仅限于燃煤发电，因此对反映行业集中度的作用有限。中央发电企业也是风能、太阳能和其他类型发电的主要投资者。然而，燃煤资产重组引发了对甘肃乃至整个地区发展中的电力市场的担忧。在更高的所有权集中度的情况下，这些市场可能遭受竞争不足和市场力的困扰。例如，在甘肃，即使华能有25%的发电机组退役，重组后它仍然会成为拥有约45%省级燃煤发电资产的主要所有者。燃煤发电分别占甘肃总装机容量和发电量的40%和60%，虽然从总装机容量和发电量来看，华能的所有权份额似乎并不高²¹。但是，如此高的燃煤发电所有权份额可能会使华能在资源短缺的时段和输电受限的地区获得巨大的市场力。更高的所有权集中度和市场力可能提高系统成本，增加弃风弃光，降低可靠性，并成为完成减排目标的障碍。我们接下来的一些建议会讨论应对合并所有权和市场力的监管机制，以确保产生经济有效且与环境 and 排放目标相一致的结果。

案》. <http://www.tanjiaoyi.com/article-29645-1.html>

¹⁷ 同上，文中所用汇率为6.56 CNY/USD。

¹⁸ 尚不清楚这里提到的“四分之一至三分之一”，是指的所有区域煤电产能，即包括省级企业拥有的燃煤发电机组，还是只指中央煤电企业。无论如何，这都意味着大规模的煤电退役。

¹⁹ 中国碳交易网(2019)。

²⁰ 所有计算均基于Global Energy Monitor的Global Coal Plant Tracker的数据，可从以下网址获得：

<https://endcoal.org/tracker/>

²¹ 甘肃的数据来自Global Coal Plant Tracker。即使华能的55%所有权分布在燃煤发电、少量的水电(约160兆瓦)、风电(约1250兆瓦)，以太阳能发电(约200兆瓦)，它的赫芬达尔—赫希曼指数(HHI)可能接近1225(假设35%的电量来自华能控股的设施)。这可能会使甘肃处于“中等集中度”偏下水平。然而，省级HHI分析并没有识别由于波动约束而可能出现在省级电网中较大部分的市场支配力。华能非燃煤发电数据来自中国华能集团有限公司(2016)。华能甘肃能源开发有限公司。

<https://www.victortunggal.com/n31529/n31563/n1551866/c39809080/content.html>

国资委快速淘汰过剩燃煤发电资产计划的实施，即便给市场竞争带来了挑战，也是向前迈出的一大步。

批发和零售电力市场的发展

西北地区已经为电力市场发展打下了基础，在此基础上进一步努力将有助于实现政策目标。早在2013年，宁夏和甘肃就已经开始进行试点，允许工业用户通过直接交易买电。这些试点已经成长为稳定的市场，直购电市场在该地区的其他省份也得到了发展。到2015年发布电改9号文件时，西北地区的大部分用电量已经基于市场化需求。2017年后，各省在现有市场的基础上建立了中长期交易规则，从而为更正式的年度和月度双边交易和基于拍卖的集中交易创建了平台。与其他地区不同，可再生能源发电积极参与了西北地区的中长期市场。

2019年，甘肃省还被选作设计和试点电力现货市场的八个省之一。和其他七个试点省一样，甘肃省的试点包括日前和实时（15分钟）电能量市场。甘肃的现货市场为准备正常运行完成了为期五个月的结算试运行。今年一月底，甘肃暂停了市场试运行²²。关于这其中的问题和甘肃现货市场的下一步工作还没有发布正式的官方说明，但是现货市场的设计和实施依然受到中央和区域政策制定者的密切关注。2021年3月，国家发改委宣布了五个新的省级现货市场试点并表明新疆、青海和陕西已经处于建设省级现货市场的初级阶段²³。

批发市场机制的不断发展，以及最终形成统一的区域现货市场（请参见建议5），将有助于提高调度效率，降低成本和减少可再生能源弃电，并提供价格信号，帮助指导西北地区的发电投资和退役决策。

总而言之，本章节概括出的这些问题——电力市场的发展，煤电产能过剩和重组以及可再生能源发电的快速增长——会在下一个十年继续作为中国西北地区电力行业转型的重要背景。

²² 中国能源报 (2021年1月25日). 屡遭叫停，电力现货试点怎么了？

http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-01/25/content_2031407.htm

²³ 北极星售电网(2021年3月17日). 第二批5个省级电力现货市场试点公

布. <http://shoudian.bjx.com.cn/html/20210317/1142342.shtml>

电力行业转型的政策和监管策略

在这一章，我们具体给出为促进西北地区电力行业转型的实际建议。我们在借鉴国际经验的基础上，根据西北地区的现实和情况，包括在上一章中讨论的背景，量身定制地提出了具体的下一步步骤。我们的讨论主要集中在三个政策方面：

1. 系统运行：这一章关注提高区域电力系统逐小时运行效率的挑战。讨论主要集中在解锁通过区域运行方式对发电机组进行安排和调度所带来的相关利益。这种区域运行方式会促进更高的可靠性、更低的排放和帮助可再生能源并网。
2. 煤电退役政策：国资委在淘汰煤电政策制定方面有着主要的话语权。将国资委的倡议和中央、区域政府机构在电力行业改革方面的行动相协调，是区域政策制定的一个重要方面。国资委的角色与运行和规划改革的议题相关，但是由于其重要性，我们会在单独一章对相关的建议进行讨论。
3. 规划改革：改善规划流程对于平稳过渡和优化电力系统转型至关重要。没有透明、一致和科学的规划方法，很难在满足新的国家排放目标所需的雄心勃勃的电力行业转型道路上前行。

走向区域经济调度

区域协调的经济调度，或者，简单地称为区域经济调度，是指以减少短期运行成本（理想地，包括排放的社会成本）的方式进行区域电力系统运行。只要有充足的输电容量，区域经济调度会帮助电能量从边际发电成本较低的省出口到边际发电成本较高的省。

随着西北地区的能源结构越来越多地转向太阳能和风能发电，继续向区域经济调度转变对于经济高效地并网可再生能源至关重要。区域经济调度会使得风能和太阳能发电在更大的地理范围进行平衡，从而减少整体的波动和与这些资源相关的不确定性，并利用负荷和其他发电资源多样性的优势。这也会帮助减少西北地区的弃电。

提高调度效率一直是西北地区和全国各地政策制定者的长期目标。这一目标的实现已取得实质性进展，包括通过实施区域调峰辅助服务市场。但是，仍然存在许多实施更高效区域调度的障碍，包括尚未解决的发电机组补偿和用不灵活的“物理”方法处理中长期合同的问题²⁴。在本节中，我们会提供解决这些问题的步骤。

²⁴ 历史上，调度中心为了满足单个火电机组的月度或年度运行小时数而偏离经济调度。这些运行小时数是根据年度发电量计划或(越来越多地)发电机组之间以中长期合同的形式就每月或每年的运行小时数进行竞争作出的。全国范围内改革的一个关键方面将是将中长期合同过渡到“金融”合同方式。有关这些问题的更多讨论，请参见M. Dupuy (2020). “能源革命”与电力行业改革:从国际对比视角看中国南方电网面临的挑战。

建议1：通过给予区域电网公司权力来调整省级水电和煤电机组安排，维持和改善可再生能源优先调度

水电、太阳能和风能的运行成本非常低。从社会角度来看，最大限度地利用这些类型的发电（例如，将弃电维持在合理的或者“经济”的范围）将最大程度地降低发电成本、减少排放，并最大程度地提高整个电力行业的投资回报率。但是，鉴于西北地区现有的发电补偿机制，无形中鼓励了那些拥有大量燃煤发电的公司尽可能多地运行燃煤发电机组，即使这样做会导致同一公司遭受弃水弃风和弃光。国资委关于增加中央煤电企业发电机组运行小时数的计划，可能会加剧这种动机（见建议6）。

中国2005年颁布的《可再生能源法》规定了可再生能源的优先调度，为可再生能源发电创造了调度空间。“优先调度”与“经济调度”的最终目标大体一致，这是中央政府于2015年启动的电力部门改革的重要基础原则（在经济调度下，鉴于其运行成本接近于零，可再生能源通常首先被调度）。

西北地区的政府和电网公司已采取各种步骤来支持优先调度可再生能源发电，包括在风能和太阳能预测、机组组合和调度、非化石能源资源参与中长期市场以及可再生能源替代燃煤发电的变化²⁵。此外，甘肃省已承诺允许非化石能源发电参与现货市场，这会帮助所有资源的实时经济调度。但是，西北区域持续的高比例可再生能源弃电暗示着整个地区似乎仍未充分实施优先调度。

优先调度面临的一个挑战是西北区域以省为中心的调度本质，也就是说省调度中心在更大的地理范围内平衡可再生能源的能力有限。每个省调度中心只负责省内的调度，而对于以区域为基础的优化调度没有给予足够的关注。在更大区域范围内的平衡可以释放巨大的利益并缓解风能和太阳能并网的挑战，这是因为风能和太阳能发电的波动性在更大的区域内会得到平滑。

在最近鼓励更高效的跨省调度的基础上，可以授权西北电网调度中心，在合理化目前各省独立的运营决策方面发挥更积极的作用。即，为了帮助区域优化风能、太阳能和水电，西北区域电网调度中心（如果需要的话，在国家能源局的政策支持下）享有调整省级水电和煤电机组安排的权力。大部分化石燃料机组组合和调度决定，以及制定日前

<https://www.raponline.org/knowledge-center/energy-revolution-power-sector-reform-insights-challenges-china-southern-grid-region-from-comparative-international-perspective-cn/> 以及M. Dupuy(2019). 对《关于进一步推进电力现货市场建设试点工作的意见（征求意见稿）》的建议. <https://www.raponline.org/knowledge-center/comments-on-national-energy-administrations-advancing-electricity-spot-market-implementation-cn/>

²⁵ 允许非火电资源参与中长期市场，可以通过使可再生能源发电价格低于火电机组而减少弃电，从而将火力发电转向可再生能源发电。

的水电和煤电机组安排，依然属于省调度中心管理权限。

在这种区域优化下，西北电网公司会直接或者通过汇总各省预测，负责周前、日前和实时的区域风电和光电预测。从运行日前的数日开始，西北电网公司需要采集：

- 每小时（甚至每 15 分钟）风电和光伏发电预测；
- 每日以及每小时水电发电预测和约束；
- 负荷预测；
- 省级水电和化石燃料发电机组的实际安排；
- 省级调度中心更期望的水电和化石燃料发电机组安排和发电约束。

西北电网公司会在发电和输电限制的情况下，利用最大化预测的区域风电和太阳能发电以及最小化煤电机组夜间调峰的算法来调整省级日前每小时水电和火电的总体出力，然后西北电网公司将对运行日以及日内每个时间区间的机组安排进行调整直到实时调度，可以按比例对各省火电机组安排进行向上向下调整。在不超过总体出力的限制下，省级电网公司仍然负责其管辖范围内火电机组的调度。

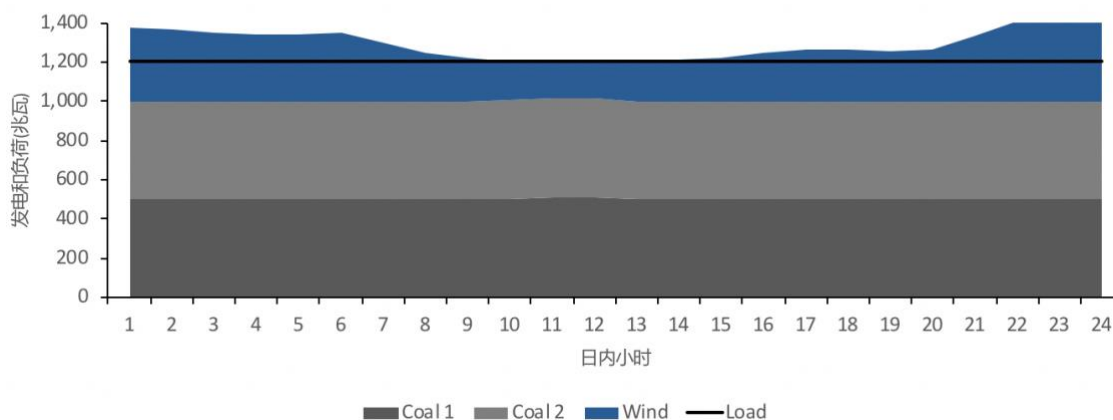
主要的效果是调整煤电机组的日前安排，允许一些机组在运行日前停止发电。例如，为应对高风电发电预测，在日前关闭燃煤机组可以减少一些燃煤机组低负荷运行的需要，为整个区域减少燃料成本。由于西北地区相对较少的水电资源，区域优化对水电调度的影响可能会较小。随着太阳能发电比例的增加，很可能将水电转移到夜间发电，最大限度地减少所需的燃煤发电夜间调峰。

图3简单地展示了区域协调安排煤电机组如何为可再生能源发电创造更多的空间。如图中所示，两个地理区域（1和2），每个拥有两个1000兆瓦的煤电机组。地域1有1000兆瓦的风能发电。地域2有1500兆瓦的光伏发电。在前两组情形中（“单独开机组合”），每个地域分别安排他们的煤电机组，要求它们在日内的一段时间在最低负荷情况下运行，导致3400兆瓦时弃光和弃风。在第三种情形中（“区域开机组合”），煤电机组4停止发电，没有产生弃电。总的来说，整个区域节省了3400兆瓦时（6%）的燃料成本。

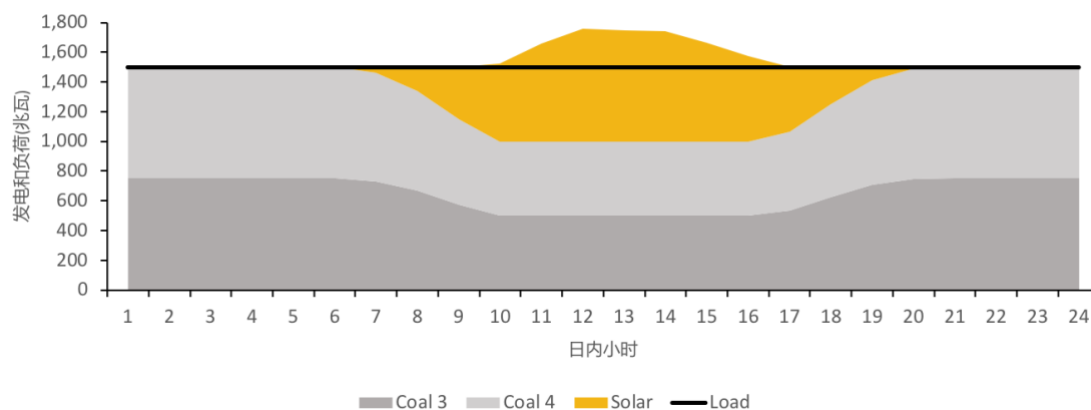
图3.区域协调安排燃煤发电的效益示例

单独开机组组合：每个地域独立安排煤电机组

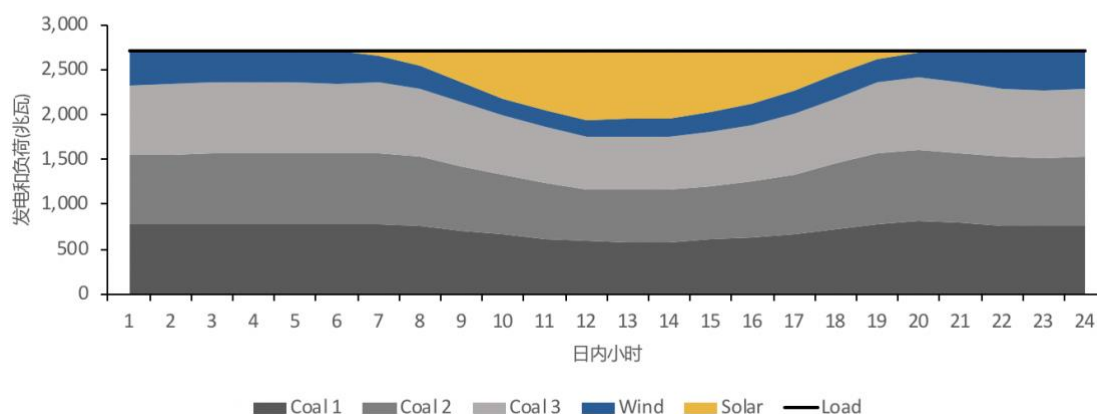
地域1：煤电机组在几乎所有的小时内以最低负荷运行；夜间弃风



地域2：煤电机组在日内以最低负荷运行；日内出现弃光

区域开机组组合：区域调度协调机组安排

煤电机组4停机；没有弃光或弃风



这个方法可能会导致发电机组之间的收入转移，可以通过后期对合同的调整来处理——也就是说，与先前合同约定的补偿有偏差（建议4）。区域优化可以是国资委重组计

划号召的向更高效利用发电资源迈进的新的一步。

建议2：考虑实行分时上网电价

对发电商和其他资源提供补偿的方式会影响其行为。理想的情况是，发电商和电网的其他资源在最需要服务的小时内提供服务而获得补偿。也就是说，奖励与区域优先调度和经济调度相符合的运行。然而，在西北大部分地区，发电补偿机制使发电商无法在优先调度或完全经济调度下维持可行的商业模式。这是因为发电商补偿还很大程度上依赖中长期市场合同和行政设置的度电上网电价。在这个框架制度下，虽然调峰辅助服务市场和其他机制取得了一些进展，发电补偿并没有反映变动的电网条件和系统需求。设计良好和具有竞争性的统一的区域现货市场，可以被视作改革的理想目标。在这种现货市场，区域节点电价会浮动，为区域优化发送有效的价格信号（见建议5）。然而，实施一个设计良好的区域现货市场并非易事，且很可能需要时间。

通过行政手段实施的分时上网电价可以是一个渐进的步骤，有助于合理化发电补偿，并简化如建议1中讨论的区域优先调度的实施工作。这样的上网电价可以在最终形成一体化区域现货市场之前以区域为基础实施。

正如分时零售电价，分时发电上网电价根据时间不同而产生不同的上网电价，需要在计算系统成本（例如，夜间成本更低，白天成本更高）的基础上明确定义出不同时间段。这些可以根据季节进一步区分。

这种根据使用时间而不同的上网电价（假定该电价是基于对系统成本的详细评估）将更好地鼓励各种资源，包括煤电机组、水电机组和储能资源发挥更有效的区域作用。这样，分时上网电价将与区域调峰辅助服务市场形成互补。这也将有助于降低燃煤机组最大化年度运行时间的动机。相反，这些燃煤机组将通过在最需要它们的时间运行来赚取额外的收入。中长期合同应该参考这个分时上网电价来协商（例如，分时上网电价应该被合并入目录电价中）²⁶。

如此预先设置好时段的分时上网电价会是现有方法的一个改进，但是与设计良好、能够根据电网条件的变化而变化以及有准确稀缺电价的现货市场相比会相对低效。同样的，我们在建议5中强调了一体化的现货市场应该仍然是西北地区的一个终极目标。

²⁶ 我们的理解是，分时的零售电价已经体现在“目录价格”政策中，但这里的关键是让发电机组暴露于高峰/非高峰期补偿机制。

建议3：在单个发电集团公司的发电机组组合中，提高在中长期合同下交付发电量的灵活性

几十年来，西北和中国其他地区的调度中心都根据年度运行小时（“年度发用电计划”）对燃煤电厂进行排序（机组组合），所有燃煤机组获得的运行小时数都差不多。这意味着高效低效的发电厂将以相似的小时数运行，从而导致燃料成本高于必要水平。直购电和后来的中长期市场的建立和推广，通过让那些高效且低成本的燃煤机组比低效和高成本的机组更多地签合同、被安排调度，可以帮助提高系统效率。

当前，调度中心调度各个燃煤机组，以便每个机组都能实现月度和年度签订的合同发电量。这种做法会导致偏离经济调度，产生更多的成本和排放。它也可能导致对可再生能源不经济的弃电（例如，如果某月风力发电强度超出预期或者某年有超出预期的水电）。此外，中长期市场自身的低效，例如，如果运行成本较高的机组能够在合同竞争中击败低运行成本机组，则会加剧这些问题并导致高于必要的成本。

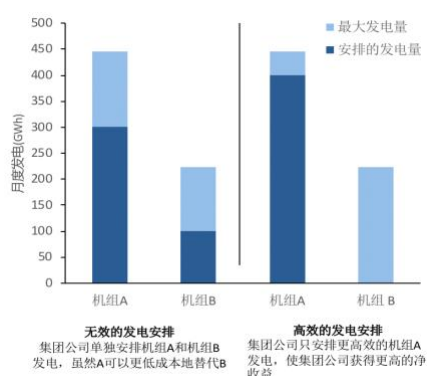
理想情况下，调度中心应避免参考中长期合同做出运行决策。在国际上，许多国家的电力部门都使用金融合同，包括差价合约（CfDs），在这种合约中，合同方同意弥补未来一段时间内合约中现货市场价格与该期间实际出现的现货市场价格之间的差额。金融合同的一个重要方面是，合同不直接影响短期运行（调度）决策。也就是说，系统操作员根据经济调度原则进行调度，且他们通常甚至不知道大多数长期合同的存在。但是，鉴于西北大部分地区尚不存在现货市场，因此我们在此提供了一些更直接的步骤，可以减轻与中长期合同相关的经济调度壁垒。

可以采取的一个步骤是允许燃煤发电集团在其发电机组组合内，以经济的方式安排燃煤机组，这样可以为燃煤机组调度提供更多的灵活性和提高效率。在此建议下，如果某个特定的燃煤发电机组签订了中长期合同，在能够提高系统调度效率的情况下，可以运行同一集团中的另一燃煤机组以履行合同义务。

举个简单的例子，假设一家发电集团，其机组组合包括高效的600 MW燃煤机组（A机组）和低效的300 MW燃煤机组（B机组）。在7月份，每个机组的最大发电量分别为446 GWh和223 GWh²⁷。该集团已签订中长期合同，分别为A机组300 GWh和B机组100 GWh。将A发电机组安排发电400吉瓦时（见图4）将有助于集团降低运行成本并增加利润，同时履行合同义务，还可以使调度更接近经济调度，节省系统成本并减少排放。

²⁷ 24小时满负荷运行31天。

图4. 灵活安排合同示例



鉴于中国西北地区许多电厂都是共享所有权结构，这种以机组组合为基础的方式调度煤电机组，需要各电厂股东达成收益共享协议。例如，在上面的例子中，如果B机组的60%由A机组的大股东持股，40%被另一个集团持有，大股东将建立机制确保B机组的少数股东不会因运行A机组而不是B机组的决定而受到损害。

鼓励各发电集团以更整体的方式（减少以单个发电机组为决策的过程）考虑并在其机组组合内更灵活地安排燃煤发电，可以使各发电集团适应在现货市场环境下签订合同、安排发电、管理发电和储能资源的组合。

建议4：在事后的基础上重新分配中长期合同款项以支持高效调度

深化可再生能源优先调度，例如通过这些资源的区域优化（见建议1）很可能会导致（月度或者年度）发电量和收入从有中长期合同的火力发电商转移到可再生能源发电商。例如，在无法预期的高水电年或者太阳能发电大规模扩张的年份，经济调度这些资源会减少火力发电，即使火力发电商签订的中长期合同发电量超过在经济调度下需要来自火电的发电量。这类“转移”一直是阻碍中国调度改革的一个因素。

在良好设计的现货市场，由于边际成本低，高于预期的水电或新建可再生能源发电会在调度排序中替代现有的火力发电。现有的火力发电商不会由于调度变化导致的发电减少或更低的现货市场价格得到补偿。然而，在近期，电力现货市场在西北地区还没有运行之前，调度改革可能需要额外的机制来解决发电商之间收入转移的问题。

一个解决发电商之间收入转移的方法是通过“收入分享机制”，在事后的基础上重新分配发电商补偿。这种机制会允许火电发电商当其发电量小于中长期合同签订发电量时，赚取一部分可再生能源发电商增加的收入。这种机制可以通过行政手段确定（例如，50/50比例）或通过额外的月度拍卖来实施。拍卖可以体现出燃煤发电商通过不发电来节省燃料成本，从而在拍卖中，燃煤发电商可以对合同款项中减少的金额竞标，与中长期合同“价差”形式类似。这个机制与发电权交易有相似之处，不同的是此机制中调度决定交易而不是交易决定调度。

例如，假设中长期合同下的燃煤总发电量比月度合同电量少100 GWh，以消纳额外的100 GWh的水电、太阳能和风力发电。根据中长期合同，电力交易所会从中长期市场用户方收取费用，电力交易所会与西北电网一起，利用收入分享机制来解决任何合同签署的发电量和实际电表测量的发电量之间的差别。如果水电、太阳能和风能发电由于额

外的调度可能会赚取3000万元²⁸，按50/50的分享机制会分配1500万元到火力发电商和1500万元给水电、太阳能和风能发电商。

建议5：继续发展现货市场，以形成区域现货市场为目标，或许可以借鉴美国“RTO”区域电力市场的经验

在甘肃试点的基础上发展区域电力现货市场，有助于解决西北地区面临的几个挑战：可再生能源发电选址和并网、储能评估和调度、热电联产的高效运行、输出限制、产能过剩和煤电退役。西北地区的区域协同运行历史悠久，为区域电力市场的建立奠定了基础。

区域现货市场的发展需要时间，从现在开始着手考虑区域市场的关键因素、作用和责任是有益的。最近，睿博能源智库为南方电网地区（该地区被选为建立中国第一个区域现货市场）准备了一些建议²⁹，我们在这些建议中借鉴了美国区域输电组织（RTO）的一些经验³⁰。正如在该报告中详细解释的那样，我们建议西北电网考虑建立具有美国RTO特征的区域现货市场，该市场将包括以下特征：

- 一个单一的区域系统运行商（调度中心）和市场运行商（这两家机构都可以是西北电网有限公司的一部分，也可以单独成立），监管统一区域“现货市场”（日前和实时电能量和辅助服务市场）。
- 基于区域经济调度原则（理想情况下将排放成本内部化）和所有资源（包括需求响应和其他分布式资源）的公平竞争原则，制定详细的 RTO 规则。
- 强大的市场力监控和缓解机制，包括用于采集发电机组运行成本信息的机制。国资委重组计划实施后，由于发电所有权高度集中，这对西北地区尤为重要。
- 用“金融”的方式处理合同。调度中心将不再监控或尝试根据中长期合同进行调度。

²⁸ 基于100 GWh， 300 元/MWh。

²⁹ 详见Dupuy等人(2020)。

³⁰ 中国几个省份正在发展的现货市场大致类似于“独立系统运营商(ISO)”和“区域输电组织(RTO)”市场，这些市场覆盖了美国约三分之二的地区，只不过大多数ISO/RTO是区域性的，覆盖了美国多个州。因为术语“ISO”和“RTO”在美国几乎是同义，我们在本文描述美国ISO/RTO市场时都简单用RTO表示二者。更多ISO/RTO的信息，可见 Hurlbut, D., Zhou, E., Porter, K., & Arent, D. (2015). *‘Renewables-friendly’ grid development strategies: Experience in the United States, potential lessons for China.* (NREL/TP-6A20-64940). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64940.pdf>. (中文版 <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66729.pdf>). 也可见Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2015). *Energy primer: A handbook of energy market basics.* <https://www.ferc.gov/market-oversight/guide/energy-primer.pdf>

- 统一的区域性规则来分摊区域输电成本³¹。
- 统一的区域输电规划过程。

甘肃省作为该地区先行的现货市场试点，建议在市场设计中考虑到以上几点。鉴于甘肃的发电所有权集中和输电限制，从一开始，缓解市场力和运行成本信息收集将至关重要。我们还建议在相邻区域电力市场之间进行强有力的协调，包括在市场设计和流程以及在市场运行方面的协调。

协调国资委在促进高效发电行为和可再生能源并网方面的作用

建议6：协调国资委煤电重组与更广泛的电力行业改革

国资委煤电重组政策对于实现高度优先的国家目标来说，是柄双刃剑。国资委有充分的理由更密切地参与到电力行业改革的工作中，并支持国家发改委和能源局推进的电力行业改革——特别是发电商补偿的改革。对于国资委、国家发改委和国家能源局来说，如何实施精心设计的发电商补偿机制、奖励高效行为，是一个明确的交叉领域。换句话说，除了在其权限下改善国有企业的财务状况，国资委可以与国家发改委和能源局在市场和政策机制改革这些重要的方面一起合作，来影响发电商的补偿和行为。这个共同改革工作的一个重要目标是确保发电商通过经济有效的行为来获利，以支持国家在电力行业减排、降低成本和增加可靠性的目标。国资委可以与国家发改委和能源局合作，推动电力行业改革举措，例如包括本文提议的区域经济调度（见建议1）和实施良好设计的现货市场（建议5）。

此外，国资委的考核指标和目标为塑造发电企业的行为至关重要——理想情况下，这些考核指标和目标应该与电力行业改革目标相统一。国资委在2019年12月公告中提出的目标之一是“平均设备利用小时明显上升”。然而，该目标与电力部门改革的重要目标——改善机组调度，增加电网灵活性并减少可再生能源弃电——目标相违背。这是因为电网上的每个资源都应该只在价值最高时才发电，国资委的目标与该想法不一致。简而言之，如果国资委利用运行小时数作为评价单个发电企业或单个发电机组的指标，这可能会减慢电力行业改革步伐，损害经济调度、阻碍降低成本和排放目标。

如果换个方式看这个问题会发现，年度发电运行时间正逐渐失去作为发电机组盈利

³¹ RTO式的方法会甄别出区域输电对整个区域都是有益的。输电成本可以基于月度或者年度用电高峰需求分摊到该RTO内的全部省级电网公司（并最终到所有需求侧），而不是现在普遍应用的基于千瓦时跨省交易来分摊。这将有助于确保输电费用不会掩盖位于不同省份的不同发电资源的相对运行成本。更多讨论可见Dupuy等人(2020)。

能力或发电机组对经济附加值贡献的代表作用。的确，如果电力部门的改革实施得当，那么燃煤发电机组将通过在相对罕见的高价值时期（即风能和太阳能发电量低且需求高的那些分钟和小时）内运行获得补偿，实现最大化利润，例如提供调峰服务满足需求和调节可再生能源出力的变动。在这个改革后的电力行业，发电机组的盈利能力和出力最大化将不再一致。相反，燃煤电厂将通过追求一种商业模式，即每台发电机组只在需要时运行，从而实现利润最大化。

我们建议国资委审查所有国有发电企业的指标，激励经济高效行为，并支持政府提出的包括发展清洁能源在内的电力行业改革目标。我们在此提供几条具体建议，其中一些适合国资委自行开展，另外一些也许需要与发改委和能源局共同合作：

- 消除所有基于年度满负荷运行小时数评估单个发电机组的考核指标或目标。最大化燃煤发电机组满负荷小时数不符合经济调度和电力行业改革的其他原则，应鼓励发电厂的管理人员按照经济调度进行调度，并支持可再生能源并网。
- 要认识到，由于电力行业改革还不完善，发电机组的盈利能力并不完全和高效低排放的运行相一致。换句话说，在现有电力行业政策和市场框架下，能够盈利的发电商可能并不一定是高效运行的。一旦电力行业改革和碳交易机制得到很好的实施，发电机组的盈利能力将更好地与高效灵活运行保持一致。在国际上，电力市场设计的黄金标准是设计出符合政策目标且给予发电机组动力高效运行的市场。但是，电力部门的改革是一个渐进的过程，目前西北地区（以及中国其它地区）的改革工作还远远没有完成。这意味着，就目前而言，用发电机组的盈利能力来衡量发电机组是否高效、清洁地运行，仍然是一个不完美的方法。
- 直到电力行业改革完美地实施——这个过程可能需要许多年——国资委可以为发电企业设计和实施除盈利能力之外的指标，这可以帮助激励例如减排等政策目标。我们的建议包括：
 - 可以制定一套对发电机组的评价指标，考量燃煤机组是否符合现有排放标准。2015年，生态环境部发布了一项标准，要求所有燃煤机组到2020年达到二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)的“超低”排放标准³²。随后，燃煤发电企业投入了大量资金装置污染控制设备，但有一些调查报告表明可能存在不准确汇报结果的问题³³。国资委可以制定针对这些

³² 环境保护部，国家发展和改革委员会，国家能源局(2015年12月). 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm. 根据生态环境部政策，具备改造条件的机组应该满足PM, SO₂, NO_x 排放分别达到10, 35 和50 毫克每立方米的标准。注：为了满足这些与燃气机组排放相似的排放标准，要求移除污染物效率比市场上商业化的要高很多，比如美国。

³³ Karplus, V., Zhang, S., & Almond, D. (2018). Quantifying coal power plant responses to tighter SO₂ emissions standards in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115: 7004-7009.

排放的指标（如果目前还没有的话），将有助于促使发电机组更好地合规。

- 可以制定一套对西北地区每个发电集团资源组合实施碳强度和总碳排放的指标，以支持国家 2030/60“双碳”及 2030 年区域可再生能源目标。

规划能源转型，鼓励合理的投资和退役决策

随着国资委重组计划的实施，以及西北地区朝着减碳和可再生能源目标相一致的非化石燃料发电资源的转型，建立一种科学、透明的可靠性规划方法将有助于确保燃煤发电机组退役不会影响可靠性，同时确保成本最低的资源组合。

这些目标所暗示的燃煤发电容量的减少有可能会受到煤炭行业利益相关者的反对。他们会提出关于在未来几年至几十年退煤路径以及在此时间段替代资源组合性质的问题。特别是，关于可靠性的争论将会重复出现，尤其是当系统资源出现紧张的时间。透明和详细的规划流程可以帮助解决这些有争议的辩论，并确保合理对待新的煤电投资。

建议7：合理化识别需要淘汰的燃煤发电机组的过程

国资委、国家发改委、能源局共同参与的相互协调的区域退煤工作将为实现2030目标铺平道路。2021年，国资委计划在西北地区淘汰大量中央发电集团所有的煤电，这需与未来几年实施更广泛范围的可持续减少煤电容量的努力相一致。工作内容最好集中在淘汰较小、较旧、更低效的燃煤机组，类似于过去20年常用的方法，但是应该关注区域作为一个整体而不是逐个省考虑淘汰煤电机组。

国家发改委和国家能源局在制定和实施淘汰落后煤电产能方面具有丰富的经验，包括在“十一五”发起的并在“十三五”规划中继续提出的“上大压小”政策³⁴。虽然比起西北地区需要退役的煤电产能还有差距，但这些工作积累了非常有益的经验³⁵。这些规划中使用的基于指标的行政管理方法（例如，基于平均发电煤耗、使用年限以及是否符合二氧化硫、

<https://www.pnas.org/content/pnas/115/27/7004.full.pdf>

³⁴ 见2007《关于加快关停小火电机组若干意见》以及2017《关于推进供给侧结构性改革 防范化解煤电产能过剩风险的意见》。

³⁵ 能源局也有一个“煤电规划建设风险预警”，但它是作为管理或限制煤电投资的监管框架，而不是为了大规模降低煤电产能。此外，它在以合理的方式管理投资方面存在问题。它没有明确考虑长期资产风险，且在某些情况下，用于计算指标的假设是不透明的（请参见Yue, L., Kahrl, F., Dupuy, M.(2019). 降低中国新煤电项目投资战略. <https://www.raponline.org/knowledge-center/strategies-china-reduce-risk-new-coal-power-plant-investments-cn/>）。此外，有时能源局发出的风险预警与一些国家政策元素相矛盾。能源局2020-2030风险预警中并未阻止陕西（除了“蓝天保卫战”指定的关键区域）和新疆建设新的燃煤发电项目。能源局(2020年2月). 关于发布2023年煤电规划建设风险预警的通知. http://www.nea.gov.cn/2020-02/26/c_138820419.htm

氮氧化物和颗粒物排放控制法规的指标），可以成为制定2021年国资委目标以及2030/60目标一致的，滚动更新不断淘汰燃煤发电流程的基础。这个持续进行的流程可以由国资委、国家发改委、能源局和省政府官员的代表组成的专门委员会主导完成³⁶。

最终，行政淘汰制度可以在充分发展的碳排放市场和良好运作的区域现货市场的基础上，转变为更市场化的淘汰制度。但是，正如其他国家的经验所示，有效设计和实施这些市场机制可能需要很多年。

这些新的市场力量可以越来越多地推动现有煤电机组的退役。在新的电力市场中，发电公司将评估现有燃煤机组的“继续运行”成本，也就是说，发电企业要维持商业运营需要支付的成本（见下方框）。发电公司可以将这些成本与预计的电力市场收入相比较。每当发电公司发现单个现有燃煤机组的继续运行成本预计将超过市场收入，则会自愿淘汰这些燃煤机组，从而改善公司的总体财务状况。

电力市场的继续运行成本和淘汰决策

继续运行成本通常包括所有的可变成本和一小部分固定成本。可变成本包括燃料成本，排放成本（比如排放权成本），以及可变的运行和维护(O&M)成本。固定成本不取决于发电机的出力水平，继续运行的固定成本包括固定维修成本（包括设备更新投资成本）、固定税务成本、保险费、一部分劳动成本和工厂土地的租金。“沉没”的投资成本不包括在继续运行成本中。

在设计和监管良好的市场构架中，为了确定某个机组是否应继续运营，发电机组所有者将在一段时间内将其预测的市场收入（元/千瓦-年）与其预测的继续运行成本（元/千瓦-年）进行比较。如果成本超过收入，则所有者有可能淘汰该机组。例如，如果一个燃煤机组预测的平均市场收入为500元/千瓦-年（250元/兆瓦时，2000小时），接下来几年的成本为550元/千瓦-年（200元/兆瓦时可变成本+150元/千瓦-年固定运维成本），则机组所有者可能会决定淘汰该机组。

新实施的国家碳排放交易系统，将是更基于市场导向煤电退役机制的重要组成部分。理想情况下，碳排放交易系统将发展为具有绝对年度排放上限的总量控制和交易机制，生态环境部将确定每年在规划时期内允许的CO₂排放总量（理想情况下不仅是电力部门，而是整个经济体），通过配额（许可）交易允许灵活地合规。与之前所述的行政淘汰方法相比，至少从理论上讲，这将导致更有效地确定要淘汰的燃煤机组：相比由政府机构指定淘汰决策来说，发电公司将拥有更多的自主权和灵活性。

在这种更加以市场为基础的环境中，二氧化碳配额定价将影响燃煤发电的淘汰决策。即使二氧化碳价格小幅上涨，也会大大增加煤电成本，并对淘汰煤电产能产生重大

³⁶ 最近的一项研究基于能效和环境绩效等几个指标，确定了每个省份最适合立即淘汰的燃煤发电机组。See Cui, R., Hultman, N., Jiang, K., McJeon, H., Yu, S., Cui, D., Edwards, M., Sen, A., Song, S., Bowman, C., Clarke, L., Kang, J., Yang, F., Yuan, J., & Zhang, W. (2020). *A high ambition coal phaseout in China: Feasible strategies through a comprehensive plant-by-plant assessment*. Center for Global Sustainability. https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2020-01/1.13.2020_AHighAmbitionCoalPhaseoutInChina_EN_fullreport%20.pdf

影响。例如，配额成本每增加100元/吨CO₂，煤电成本就会增加225-250元/MWh³⁷。

建议8：根据最低成本规划确定新的资源投资组合

前面的建议讨论了识别出需要淘汰的燃煤发电机组，接下来讨论合理化投资决策的问题，以便投资者选择经济有效的新清洁能源资源组合。对西北地区未来的发电和储能资源组合进行规划和投资，将是该地区电力行业转型的重要部分。由于电力行业摆脱对煤电的依赖将导致西北地区发电结构的根本转变，随着转型的开展，需要谨慎的规划流程来支撑和评估新资源组合。一方面是为应对大量波动性可再生能源并网和释放分布式能源（包括需求响应）的潜在价值的挑战进行规划。欧洲、印度和美国为应对这些挑战也在进行类似的完善规划方法的工作。

长期以来，中国的五年规划在制定国家产业和环境政策方面发挥了重要作用，为决定发电投资和淘汰的总量和类型提供了高水平指导。同时，中央和省级政府还分别发布了针对具体资源的政策和法规，包括固定上网电价（FiT）、可再生能源配额、碳排放交易机制、储能发展计划、节能政策等等。不断完善五年规划进程，并将该进程与针对具体资源的政策和法规进行协调，是规划单位所面临的一个挑战。幸运的是，能源局在2016年规划政策提出了一些非常有用的综合原则，为完成这些任务打下良好基础³⁸。通过运用高级的规划模型来预测负荷、进行可靠性评估和成本最低的容量扩充，将非常有助于支持强化五年规划³⁹。

特别是，完善的五年规划过程应着力解决以下具有挑战性的问题：

- 资源组合优化——达到最低成本的同时，保持高水平的系统可靠性所需要的非化石能源发电以及不同种类的储能（技术、持续时间）和需求响应的数量和地点应

³⁷ 假设排放系数为0.9t CO₂/MWh，净效率为35-40%。

³⁸ 国家能源局(2016). 关于印发《电力规划管理办法》的通知。

http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201606/t20160606_2258.htm. 更多讨论详见Dupuy, M., & Xuan, W. (2016). 从电力规划看煤电产能过剩和可再生能源弃电的问题. https://www.raonline.org/blog/excess-coal-generation-capacity-and-renewables-curtailment-in-china-getting-with-the-plan_cn/

³⁹ 有关这些主题在国际和美国背景下的更多讨论，请参阅以下参考资料：Ringkjøb, H.-K., Haugan, P. M., & Solbrekke, I. M. (2018). A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 440-459, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002> Kahr, F., Mills, A., Lavin, L., Ryan, N., Olsen, A., & Schwartz, L. (2016). *The future of electricity resource planning* (LBNL-1006269). Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1006269.pdf>; Fisher, J., Santen, N. R., Luckow, P., de Sisternes, F., Levin, T., & Botterud, A. (2016). *A guide to clean power plan modeling tools*. Synapse Energy Economics, Inc. <https://www.synapse-energy.com/sites/default/files/Guide-to-Clean-Power-Plan-Modeling-Tools.pdf>; and California Public Utilities Commission (2014). *Collaborative review of planning models*. <https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6626>

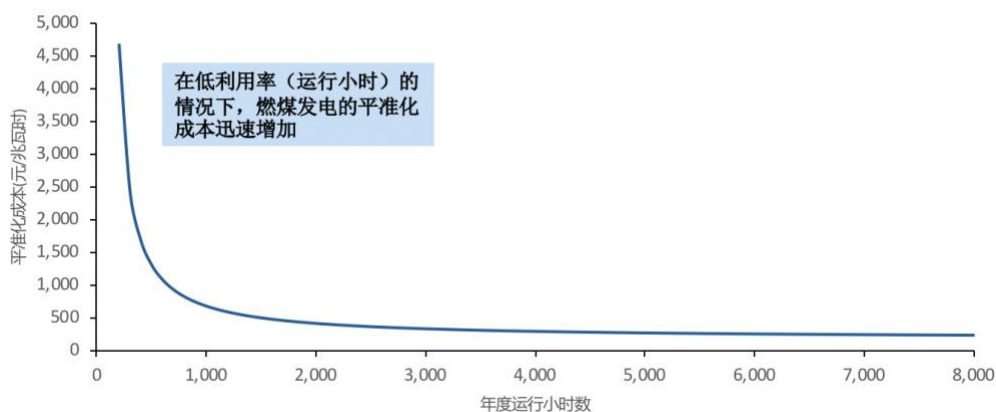
该是什么？除了考虑到发电资源的选择，还应该考虑到储能、需求响应和节能投资，在区域层面上，总成本最低的资源组合是什么？

- 大型资源与分布式资源——互连到高压输电的发电和储能投资（即，大型资源）和互连到配电系统的用户的投资（即，分布式资源）之间应如何保持平衡？
- 输电投资——如何决定输电投资，特别是考虑到储能和输电之间的可替代性？

建议制定区域性五年规划，包括为省级政府制定的非化石燃料发电、储能和需求侧管理等目标。国家发改委和能源局可以定期评估这些目标的“方向性”遵守情况，以确保投资与规划一致。理想情况下，该过程应包括对五年规划的期中评估和调整方案，以适应预测、技术和技术成本的变化。

为满足资源充足需求，可能会不断出现新建燃煤项目的提议。此外，煤炭行业的利益方可能会继续提出新的煤电将是满足灵活资源需求的最佳选择，以支持可变的可再生能源。值得注意的是，即使不考虑全部排放成本，相对于其他选择而言（包括可再生能源、储能、需求响应和有针对性的节能措施），本节中描述的规划流程也可以用来评判为满足资源充足性需要进行新燃煤发电的投资是否相对昂贵。此外，如西北地区最近的情况一样，新的煤电投资很可能会继续降低所有燃煤发电的运行时间，这意味着新燃煤电厂会面临低“有效”年度运行小时数和高平准化能源成本（元/兆瓦时）⁴⁰。图5说明了在较低的年度运行时间下，煤电平准化成本（包括固定成本）的非线性增加。

图5. 不同年度运行小时数情况下一个燃煤机组的平准化成本示例



注：假定可变成本= 175元/兆瓦时，固定成本= 450元/千瓦-年

⁴⁰ 在经济调度下，更新的、更高效的机组将在现有机组之前被调度，这意味着它们每年的运行时间将相对较高。然而，如果需求增长仅限在高峰时段，新煤电机组的电能量利润在大多数时段可能会很低。这意味着，这些机组的净成本（固定成本减去年电能量利润，以元/千瓦时-年为单位）将与其只运行少量的运行小时数的情况类似。

在国际上，煤电由于其固定成本较高，因此并不是低利用率（低容量系数）发电的经济有效的解决方案⁴¹。从历史上看，在美国，高峰需求通常是由需求响应和单循环燃气轮机（CT）提供的，它们的投资成本相对较低。在一些州，电池储能如今已成为单循环燃气轮机的一种成本有效的替代选择，并且这种趋势随着电池成本的下降还会继续。旨在减少峰值需求的能效投资也可以具有很高的成本效益。

作为一个长期目标，理想的做法是在区域现货市场结构下以反映市场价格的方式实施更精细的资源规划过程。在建议5中，我们建议西北地区最终的区域现货市场应采取美国RTO的形式。在这种RTO结构下，区域市场定价和RTO规划将在引导投资方面发挥关键作用。RTO规划包括资源充足性规划和输电规划。RTO规划旨在确保，即使投资决策逐渐分散化的情况下，批发市场仍能保持可靠的电力供应，具有充足的竞争力，并具有经济有效水平的输电阻塞。

在市场投资模式中，生产者将基于对新资源的净市场价值的评估（见方框），并结合区域现货市场价格的长期预测，进行投资。对于国有企业而言，这些评估将成为他们为银行贷款和项目建议书进行尽职调查的一部分。

基于市场的资源评估示例

一家发电公司正在考虑投资一个 50 兆瓦的电池储能设施。设施年安装成本（含融资）800 元/千瓦-年。他们通过咨询公司，获得了预测的未来 20 年每小时电量和辅助服务市场的价格。

通过内部模型评估，公司根据市场价格预测调度拟投资的电池储能设施，确定其为公司带来的收益（净收入）。如果 20 年净收入的年化现值超过 800 元/千瓦-年，投资的预期收益将超过预期成本。

该分析得出了投资的预期净市场价值（收益减去成本，包括排放成本）。因为不同种类资源的价值和成本可能非常不同，这种方法可以对不同种类的资源进行一对一比较。例如，发电公司正在比较电池储能设施和 600 元/千瓦-年的燃气涡轮机（CT）的投资。如果电池储能设备预计净收入（年化现值）为 1000 元/千瓦-年，而燃气涡轮发电设备预计净收入为 500 元/千瓦-年，那么公司应该投资电池（200 元/千瓦-年净市场价值），而不是燃气涡轮机（-100 元/千瓦-年），即使涡轮机成本较低。

允许市场定价在指导资源投资决策方面发挥更重要的作用，但并不一定要取代五年规划。长期资源规划仍然可以帮助银行、电力供应商和买方设定较长期的预期。使用市场定价来指导投资的主要目标是使发电投资对技术成本和电力系统成本的变化更加敏感，减少协调资源规划和项目批准之间的行政难题，并通过为发电公司在开发资源组合方面提供更多灵活性来鼓励创新。

⁴¹ 例如 Gilbert M. Masters, 2013, *Renewable and efficient electric power systems* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

建议9：对区域近期系统可靠性进行严格的定期更新的分析（备用容量研究）

随着电力行业经历快速且巨大的转变，决策者和利益相关者可能都存在一些关于如何维护可靠性的问题和担忧。在中国和其他国家，都经历过管理电力系统供应“紧张”和“松弛”的艰难时期，引发了一些争论。此外，在国家能源局、国资委和地方官员都扮演着重要角色的情况下，协调不同政策制定者就这些议题作出的具体决定，也是一项挑战。

就像在美国和其他一些国家看到的那样，对于整个区域实施严格的、持续的可靠性规划流程，对回答这些议题并确保电力行业转型过程中没有可靠性问题有很大帮助。系统可靠性规划的目的是对电力系统是否具有充足的资源进行一个短期的评估——发电、储能和需求侧资源（包括需求响应）——来可靠地满足峰值电力需求⁴²。这个分析考虑到主要的变量：天气、发电机组意外停运、每年或每小时水电、风电和太阳能发电的波动以及风能和太阳能发电的不确定性。可靠性规划经常基于天气年份和平均停电事件的中位数做出假设，虽然气候变化也在挑战着这些假设背后的逻辑。

无论是在国际上还是在中国，电力系统运营商和规划者经常使用经验法则来评估可靠性。然而，随着电力系统变得越来越复杂，发电资源和负荷越来越多样化，经验法则在评估可靠性方面变得越来越没有意义。例如，对于火电厂来说，在拥有资源（如，水电，风电，光电）和需求（如，冬季或者夏季高峰期）更大季节性波动的系统下，它的年度运行小时数（容量系数）就不是一个好的可靠性指标，因为由于这些系统波动一些机组需要在低容量系数下运转。据我们了解，这是国家能源局关于煤电投资的“煤电规划建设风险预警”制度的一个主要考虑因素。然而，评估电力系统可靠性最有效的方法是通过严格的可靠性研究。

在北美，系统可靠性规划以备用容量研究为中心。备用容量研究通常包括年度和年内对三个问题的分析和公开报告：（1）现有备用容量的估计，（2）预测的备用容量，以及（3）在可靠性目标的基础上，设置目标备用容量水平⁴³。对电力公司和其他发电所有者来说，通过这些研究进行可靠性规划，为关停或淘汰发电机组打下了基础。即使在美国、加拿大和其他电力市场发达的地区，这种类型的可靠性规划也非常重要。图6⁴⁴显示了阿

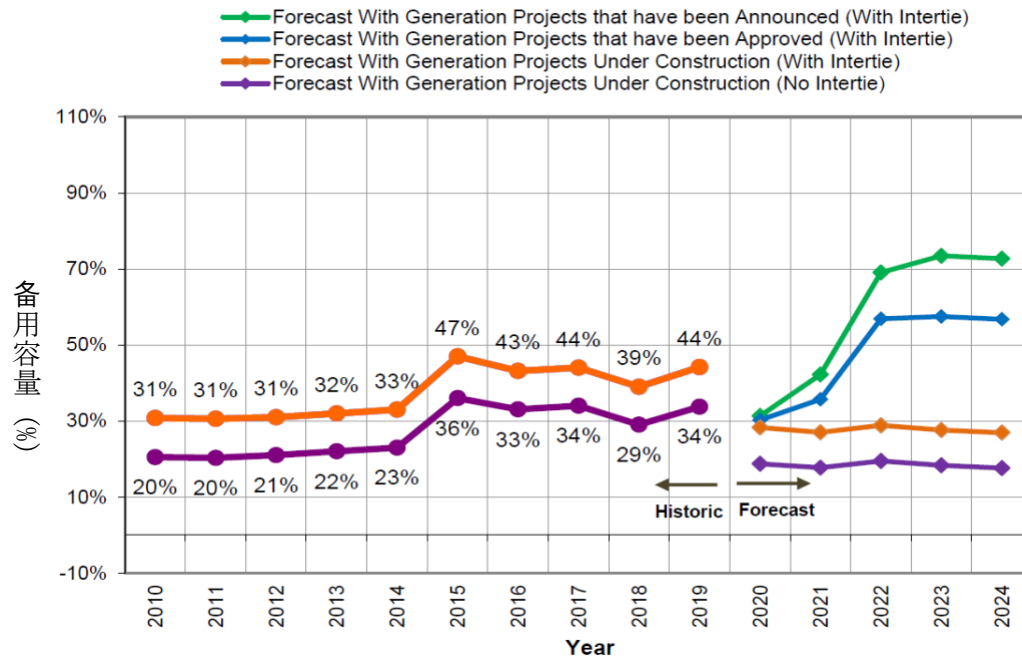
⁴² 可靠性规划涵盖供电充足性和安全性。本节的重点是充分性。

⁴³ 这个可靠性目标可以是失负荷预期(LOLE)目标，但也可以包括其他指标。

⁴⁴ Alberta Electric System Operator. (2020, November). *Long term adequacy report*. <https://www.aeso.ca/download/listedfiles/2020-11-LTA-Final.pdf> For more AESO reports and associated information on AESO reliability studies, see <https://www.aeso.ca/market/market-and-system-reporting/long-term-adequacy-metrics/>.

尔伯塔省电力市场备用容量的定期预测⁴⁵。随着可靠性问题和无意的偏见时而显现，北美备用容量规划研究的具体细节和方法也在不断演变⁴⁶。

图6. 2010-2024年，阿尔伯塔互联电力系统预测的备用容量



来源: Alberta Electric System Operator. (2020, November). *Long Term Adequacy Report*

同样，2016年国家能源局颁布的《电力规划管理办法》，为实施这一过程搭建了良好的框架⁴⁷。这样一项正在进行的研究将有助于在政策制定者和利益相关者之间就淘汰大量煤电的艰难过程建立共识，并将有助于减轻对可靠性和系统供应“紧张”时期的担忧。换句话说，定期的可靠性研究如果做得好，就能指出问题可能出现的时间，并让政策制定者调整法规和市场规则，以迅速解决问题。这样，可靠性规划将非常有助于支持西北区域朝着2030和2060年的目标转型。

西北地区电力系统的一些特点使可靠性规划和评估变得复杂化，这些特点包括大量

⁴⁵ 阿尔伯塔从2015年开始就有了较高的备用容量，这表明有必要关停或淘汰过剩的发电产能。阿尔伯塔省与加拿大其他省份的电网互连相对有限，这在一定程度上解释了为什么它的备用容量比北美其他地区普遍要高。

⁴⁶ 2021年2月，得克萨斯州ERCOT地区的能源危机引发了公众对ERCOT资源充足性规划过程的广泛讨论。在撰写本文时，对此次危机得出强有力的结论还为时过早，而且似乎电力系统资源充足规划过程的问题并不是导致危机的关键。然而，对危机的详细分析可能表明，ERCOT的资源充足规划有一些有问题的假设，导致了风险的低估。特别是，规划过程可能没有考虑到气候变化导致的更极端的冬季风暴的可能性。参见M. Dupuy (2021). 对美国得克萨斯州能源危机的一些初步想法。 <https://www.raponline.org/blog/some-early-observations-on-the-texas-energy-crisis/>

⁴⁷ 国家能源局(2016). 关于印发《电力规划管理办法》的通知。 http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201606/t20160606_2258.htm. 更多讨论详见Dupuy, M., & Xuan, W. (2016). 从电力规划看煤电产能过剩和可再生能源弃电的问题。 https://www.raponline.org/blog/excess-coal-generation-capacity-and-renewables-curtailment-in-china-getting-with-the-plan_cn/

的热电联产，大量的电量输出以及仅用于外送的连接在高压直流输电上的发电机组，一个水电大省（青海），间歇性太阳能和风能发电的快速增长，以及较大的区域负荷和资源多样性。严谨的备用容量研究可以帮助应对这些复杂性。为了获得区域负荷和资源的多样性收益并将输电限制考虑进来，西北电网公司可能最适合牵头这项研究。在北美，年度和季度可靠性研究通常会向公众公开，通常伴随着验证结果所需要的详细数据。这些报告由监管机构、利益相关者和独立的市场监测机构进行审查和评论⁴⁸。我们建议西北地区也可以参考这种做法。

西北电网的备用容量研究可以包括历史备用容量的年度报告，未来备用容量的年度预测（例如，未来五年），以及基于可靠性指标和失负荷概率（LOLP）研究的目标备用容量水平。作为分析的一部分，研究将确定出满足备用容量目标所需的燃煤发电量。国资委、发电公司和电网公司可以利用这一信息来核实，在不降低可靠性的情况下，可以在给定年份淘汰的现有过剩煤电产能的数量。如果研究表明在未来几年会有可靠性担忧，那么就是时候采取相应的行动了，例如扩大需求侧管理项目。

备用容量研究也将是继续发展电力批发市场的重要基础。正在制定和完善电力市场设计的政府部门可能会发现，备用容量的研究在确保电力市场设计产生预期结果方面非常有帮助。在北美，该研究往往阐明了市场规则的变化如何影响备用容量和可靠性⁴⁹。

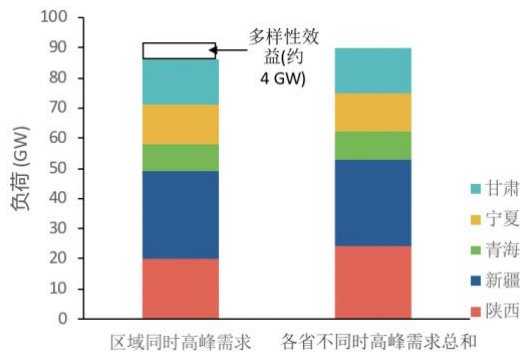
西北地区备用容量研究可以包含两个有助于降低维持可靠性成本的因素：（1）从区域角度考虑区域负荷多样性的好处，以及（2）严格考虑水电、太阳能、风能、储能和需求侧资源对可靠性的贡献。

⁴⁸ 例如，关于得克萨斯州主电网的资源充足性研究的报告和数据可以在这里获得：

<http://www.ercot.com/gridinfo/resource>

⁴⁹ 例如，得克萨斯州ERCOT电网的一份备用容量报告量化了具体市场机制中被称为ORDC(运行备用需求曲线)最近的变化是如何影响预期备用容量的。详见Carden, K., & Dombrowsky, A. K. (2021, January 1). Estimation of the market equilibrium and economically optimal reserve margins for the ERCOT region for 2024: Final. Electric Reliability Council of Texas. http://www.ercot.com/content/wcm/lists/219844/2020_ERCOT_Reserve_Margin_Study_Report_FINAL_1-15-2021.pdf. 相关版本和资料可在此获得：<http://www.ercot.com/gridinfo/resource>.

图7. 2019年西北地区负荷多样性效益示意图



负荷多样性的好处是，根据区域同时高峰需求而不是根据省级不同时高峰需求的总和进行可靠性规划，从而节省成本。区域同时高峰通常总是小于省级不同时高峰的总和，这使得系统需要保留较少的资源来满足可靠性目标。在西北地区，主要的负荷多样性优势体现在夏季高峰的陕西和冬季高峰的其他四个省份之间。我们估计，2019年区域负荷多样性收益约为4

吉瓦，这意味着每年可节省成本约20亿元人民币（3亿美元）（见图7）⁵⁰。

要获得这些效益，就需要建立一套可以促进各省之间资源共享的机制，例如西北电网促进的运行备用容量的区域共享以及实时能源平衡机制。最终，我们建议这些共享机制的设计和实现可以成为实施区域现货市场的重要方面⁵¹。

水电、储能和需求响应都是能量有限的资源，而太阳能和风能都是容量和能量有限的。这意味着这些资源对电力系统可靠性的贡献将是概率性的，并将随着渗透率而下降，但它不会为零。如果不考虑这些资源对可靠性的贡献，将导致产能过剩和成本上升，并可能加剧该地区目前煤电的产能过剩。

在美国，太阳能和风能发电的容量可信度以前通常是利用高峰时期的容量系数来计算的，但系统运行商越来越多地使用有效负荷承载能力（ELCC）方法来计算⁵²，同时规

⁵⁰ 这是基于典型的省级负荷曲线的近似的估计。国家发展和改革委员会（2019年）国家发改委关于做好2020年电力中长期合同签订工作的通知https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201912/t20191230_1216857.html。附录为各省典型负荷曲线<https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201912/P020191230336066090861.pdf>。

成本节省按照年化容量成本约为450元/kW-yr估算。

⁵¹ 我们建议，对于这样的现货市场，美国RTO是一种不错的模式。根据此模式，西北电网的区域电力市场应包括：一系列用于分配区域输电成本的统一区域规则，一个统一的区域输电规划流程，一个单独的区域系统运营商和单独的区域市场运营商（尽管这些不一定是相同组织的部分）来监督统一的区域市场。关于南网区域电力市场的讨论，详见Dupuy et al., 2020。

⁵² 例如已经应用的案例，见 Midcontinent Independent System Operator (2019, December). *Planning year 2020 wind & solar capacity credit*.

<https://cdn.misoenergy.org/2020%20Wind%20&%20Solar%20Capacity%20Credit%20Report408144.pdf> 也可见

Milligan, M., & Porter, K. (2008). *Determining the capacity value of wind: An updated survey of methods and Implementation* (NREL/CP-500-43433). National Renewable Energy Laboratory.

<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43433.pdf> 以及 Madaeni, S. H., Sioshans, R.,

& Denholm, P. (2012). *Comparison of capacity value methods for photovoltaics in the Western United States*.

National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54704.pdf>

划者和系统运行商也更多的使用该方法来计算储能的容量可信度⁵³。随着储能在美国部分地区成为边际容量资源，确保准确计算储能的可靠性贡献变得越来越重要。

建议10：完善储能的批发定价和运行模式

帮助可再生能源并网一直是部署储能的重点，从近期来看，不论是国际上还是中国及其西北地区，储能最重要的价值是避免新建火电的需求。在近期内，制定出上网电价和运行模式，将对西北地区储能作为容量资源发展其商业模式至关重要。从长期来看，区域电力现货市场可以帮助协调储能投资和调度。

在西北地区，储能已经可以参与调峰辅助服务市场。这为同时布局储能与发电提供了动力，然而，却可能限制储能在电力系统中的价值。西北能源监管局和行业参与者正在探索鼓励独立储能的模型，从而为电力系统提供更广泛的价值⁵⁴。

在当前的机制作用下，西北地区独立储能面临的三个问题是：

1. 如何对其进行补偿？
2. 如何运行以使其价值最大化？
3. 如何收回成本？

在短期内，标杆上网电价可以解决第一个问题，根据电价设计（见表1），可以采用不同的运行模式（问题2）。随着时间推移而降低的标杆电价也将为储能技术的不断创新和降低成本提供激励。

表1. 储能电价和运行模式的潜在方法

储能电价	单位
基于容量成本	元/千瓦-年
基于电能量成本	元/兆瓦时
分时	元/兆瓦时

对于基于容量成本和基于电能量成本的电价方法，电网公司将可以灵活地运行储能设施，以确保大电网系统的可靠性并最小化其成本。要确保电网公司运行储能的激励措

⁵³ 举例包括 NYISO 以及 California Public Utilities Commission. 概述可见 PJM. (2020). *ELCC rules at other ISO-RTOs*. <https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/task-forces/ccstf/2020/20200407/20200407-item-05-elcc-at-otherisortos.ashx>.

⁵⁴ 这里的重点是连接在用户电表前面并被视为大系统资源的储能，即“电网侧”储能。电池和蓄热装置也可以位于“用户侧”，并通过零售或批发电价来激励，但不是这里的重点。

施与系统利益保持一致，可能需要强化目标，其中可能包括对可靠性、燃料成本和弃电的改善目标（例如，可再生能源弃电量和消纳量的双降双升指标）。强化目标将使电网公司有更多动力通过储能充电和放电提供系统利益⁵⁵。

分时上网电价（如建议2中讨论的那样）减少了电网公司运行储能的潜在动机问题，但需要明确定义的时间段，并与系统成本合理匹配（例如，晚上成本较低，白天成本较高）。储能所有者将得到充电和放电价格之间的差价，并考虑充放电损失。如果没有明确定义的成本时间段，并且电价和系统成本之间不匹配，电网公司运行储能可能会增加系统成本。

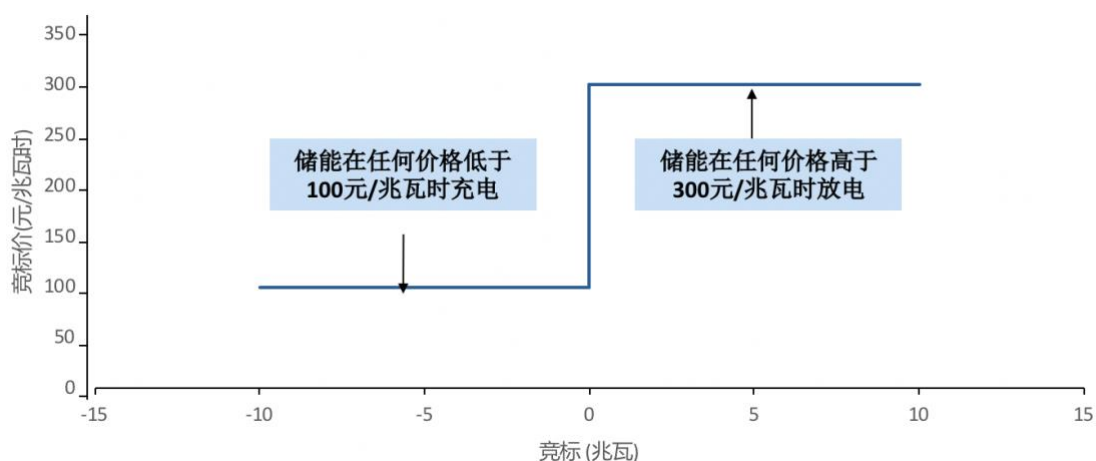
从储能设备所有者的角度，基于容量成本、电能量成本，以及分时上网电价的主要区别在于各自承担的风险不同。基于容量成本的价格（元/千瓦-年）可能导致比储能所有者预想的更多的设备运行小时数和更快的退化。而基于电能量成本和分时上网电价，则可能无法使储能所有者回收成本，如果设备的运行时间比所有者预想的要少。

通过电价补偿储能成本（问题3）并不能直接从工业和大型商业用户那里回收——零售商和直购电大用户没有动力签署储能合同，而是通过中长期合同买电。由于储能具有可靠性价值，从所有用户那里收回储能支付款项是合理的，这表明可以允许电网公司通过输电价格回收储能费用。

从长期来看，现货市场可以起到最大化储能系统利益的激励作用。储能利用从负MW（充电，负荷）到正MW（放电，发电）的竞价曲线在日前和实时电能量及辅助服务市场竞价（见图8）。在美国电力市场中，日前和实时电能量和备用容量市场的联合优化有助于高效利用储能资源，联合优化方法能够保证参与备用市场不会损害储能所有者的利益。

⁵⁵ 储能的一个重要系统利益是成本套利，最终是燃料成本套利。然而，电网公司没有动力降低燃料成本，因为他们实际上并没有看到这些成本。由于中长期合同的不平衡通过统一的电价按月结算，电网公司在中长期市场没有套利机会。电网公司运行储能的主要动机将是对跨省价格差异进行套利，并通过为没有中长期合同客户服务降低成本。

图8. 储能设备的电能量竞价曲线示例图



结论

世界各地的决策者正在制定新的脱碳目标，并考虑实现这些目标所需作出的具体政策和监管方面的改变。本文围绕电力行业运行、煤炭资产退役和规划流程改革这三个主题，在借鉴国际经验的基础上，就西北地区如何制定决策做了探讨，并提出了一系列建议。一同作用，这些建议可以作为该地区清洁能源发展和并网以及淘汰燃煤发电的路线图。实施这些领域的改革并非易事，因此，本文就当前可行的具体措施和长远的理想政策提出了建议。随着西北地区的政策制定者在这些领域取得进展，就这些主题进行国际交流会有更大意义。



RAP[®]

Energy Solutions for a Changing World

Regulatory Assistance Project (RAP)[®]

Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No. 19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
邮编: 100004
raponline.org

© Regulatory Assistance Project (RAP)[®]. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY-NC 4.0).