



西北地区碳中和 路径及系统性转型探索

落基山研究所

中国科学院生态环境研究中心

碳中和国际研究院

报告 / 2021.09



作者与鸣谢

作者

王喆，落基山研究所
高硕，落基山研究所
李抒苒，落基山研究所
刘琦宇，落基山研究所
严岩，中国科学院生态环境研究中心

其他作者

李婷，落基山研究所

版权与引用

王喆，高硕，李抒苒，刘琦宇，严岩，西北地区碳中和路径及系统性转型探索，落基山研究所，2021

鸣谢

本报告作者特别感谢碳中和国际研究院对本报告撰写提供的洞见观点与宝贵建议。

目录

一、研究背景及意义	4
二、西北省份自身特点与碳中和的难点	6
三、西北地区系统性转型整体思路及重点领域分析	9
(一) 以可再生电力和储能为基础的电力系统转型	10
1. 可再生电力的充分挖潜	10
2. 大规模储能的应用	15
(二) 以高效率低能耗为特点的产业转型	18
1. 以煤炭和化工为核心的工业低碳转型	18
2. 电池梯次利用与回收产业基地的建立	21
(三) 以自然资源为基础的生态系统补偿和转型	23
1. 农业与畜牧业零碳转型	23
2. 沙漠碳汇资源的开发和利用和沙漠化治理	26
四、核心结论及建议总结	31
参考文献	34

一、研究背景 及意义



2020年9月，中国宣布了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的国家战略目标。这一目标的提出不仅为中国实现低碳发展进一步明确了目标和方向，也为各省、市和行业在节能减排和绿色低碳转型方面制定方案、加速行动奠定了坚实的基础。“双碳目标”的提出与落实，意味着中国的能源革命将进一步深化，结合应对气候变化的挑战和低碳发展的机遇，以建立新型电力系统为指引，能源结构、能源供给侧及消费侧都将迎来系统性变革与升级。积极研究并探索国家碳中和目标对于省、市和各行业低碳发展的影响，并从地方的经济发展、产业布局和能源资源禀赋条件入手，定位碳中和路径和重点措施，对促进和贡献于能源的系统性转型和国家碳中和目标的落实有着重要意义。

西北地区是中国能源资源的聚集地之一，不仅拥有大量的煤炭等传统能源和其他矿产资源，也具备丰富的风力资源和充足的光照环境。在能源转型大趋势的推动下，西北地区面临着从大规模高比例传统能源为依托的高耗能产业向新能源逐渐过渡的挑战，与此同时，由于西北地区地广人稀，且可再生能源储量较多，不但自身具备高质量达峰和碳减排、早日实现碳中和的潜力，还能够作为国家新能源的主要基地，为东部地区的碳减排提供支持，从省级和区域的层面为国家系统性转型提供支撑、打造最佳实践。

本报告通过3大系统性转型领域思路探索和6个重点领域的分析，提出西北地区实现碳中和发展路径和关键领域，并从区域角度为国家实现能源系统转型与碳中和提出初步方向与建议。

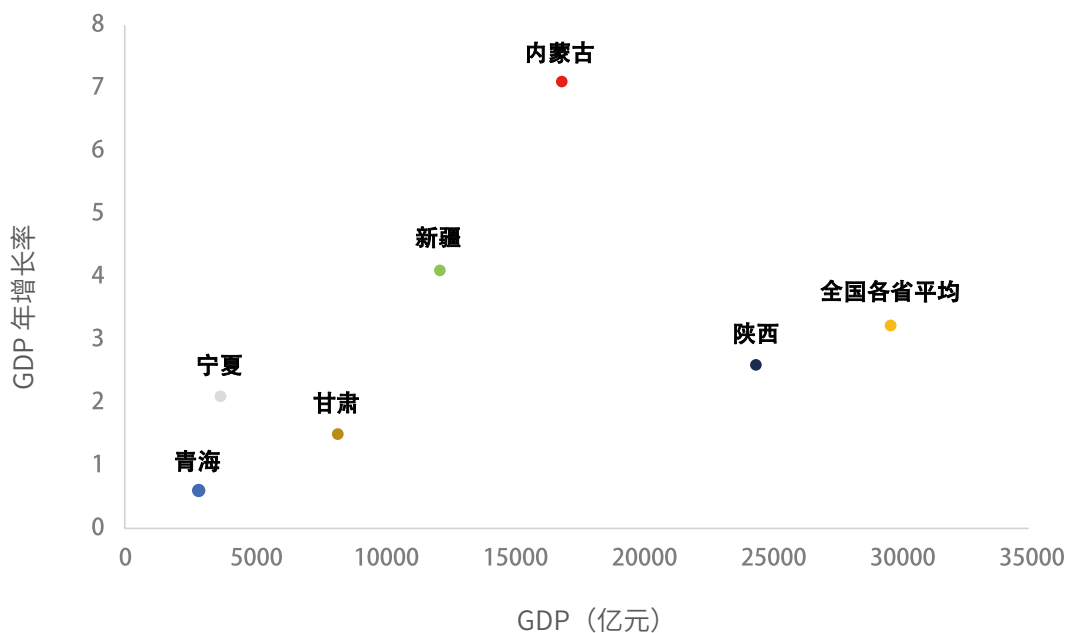
二、西北省份自身特点与碳中和的难点



从地理范畴的角度划分，西北地区主要包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区和内蒙古自治区 6 个省份（考虑到内蒙古在资源禀赋特别是可再生能源和矿产资源方面与其他各省类似，因此在本研究中将内蒙古划入西北地区），总国土面积约为 426.2 万平方公里，占全中国的约 44%。截至 2020 年底，西北 6 个省份的总人口达到了 1.14 亿，占全国总人口的约 8%。由于深居中国西北部内陆地区，西北省份具有面积广大、干旱缺水、荒漠广布、风沙较多、生态脆弱、人口稀少、资源丰富、开发难度较大等特点。

由于西北地区人口相对稀少，幅员辽阔，且各类矿产资源较为丰富，其经济结构仍然是以资源型工业和传统农业为主，其中工业结构以煤炭开采、石油开采和有色金属冶炼为主，主要集中在新疆、内蒙古、甘肃等地；农业结构以灌溉农业、绿洲农业和畜牧业为主，主要集中在青海、宁夏、内蒙古和新疆等地。目前大部分省市都处于从农业化向工业化发展的过程中，但整体增长速度相对较慢。2020 年，西北 6 各省份的地区生产总值约为 7.3 万亿元人民币，其中陕西和内蒙古约占 60%，尽管受到疫情的影响，但各省平均年增长率仍然保持在 5%-6%。

图 1：西北 6 省份十三五期间地区生产总值及年平均增长率



碳中和目标的提出，无疑为西北地区未来经济增长和从农业向工业进一步的转型提出了更大的挑战，但同时也促使西北地区各省提早进行转型路径规划，以期充分利用西北地区的丰富资源、打造独特的系统性转型道路。从目前的状况来看，由于西北地区产业发展对土地、矿产等资源的依赖程度过大，且效率相对较低，其经济发展所耗费的资源、能源以及所产生污染和排放都处于快速增长的阶段，碳中和目标的提出要求各省在达峰之后快速削减排放水平，因此目前西北地区碳中和及能源转型主要面临三方面的挑战。

首先是可再生能源充分利用难度大。西北地区的地理位置和环境决定了其风光资源禀赋相对较好，不仅能够充分满足自身使用的需要，也能够通过大规模输送和调度，一定程度上解决我国其他地区可再生能源替代传统化石能源的转型难题。但由于风光资源本身具有较大的不稳定性，且目前储能等技术的发展阶段相对初期，加之国内电网区域调度系统和市场机制尚未完善，如何通过技术突破、政策助力以及市场优化等方式实现可再生能源在西北本地的充分消纳，并尽可能通过向外输、或通过其他资源和产业调配手段以及市场化的方式，送满足其他省份需求，是西北地区碳中和道路上首先要解决的难题。

其次，产业清洁化转型方向尚不明确。西北地区丰富的煤炭、天然气、金属等矿产资源储量造就了有着扎实的煤化工、石油化工等重工业炼化产业，为当地带来了巨大的经济发展收益。但在碳中和的背景下，上述高碳产业不仅面临着被迫转型的压力，也增加了西北各省潜在的社会经济负担。尽管氢能、锂电池和储能等技术的快速发展为西北地区传统工业提供了转型的出口，但如此庞大的经济体量要全面完成清洁化转型，仍然需要大规模的投入和有效的转型后就业等问题的应对措施。因此西北地区整体产业转型的路线和方式都需要进一步的深入研究。

最后，生态系统综合优化时间紧迫。除了日渐蓬勃发展的工业产业，广阔的土地同样为西北地区带来了成熟的农业和畜牧业，以及大面积的荒漠戈壁。即便是在经济迅速发展的时代，农业和畜牧业仍然将是西北各省重要的产业之一，同时沙漠化的治理也一直

是国家建设生态文明社会的重要举措。在碳中和目标的推动下，如何充分削减农业和畜牧业造成的碳排放，同时综合利用沙漠和森林的碳汇价值，在打造新产业的同时实现生态系统优化和碳中和，是西北地区需要积极探索的重要方向。

面对上述挑战，西北地区不仅需要从自身的经济发展目标和资源禀赋条件出发制定充分有效的战略规划和措施，更需要以碳中和为契机，探索一条从资源依赖型发展模式向以资源为基础，多维度高效低碳发展模式过渡的系统性转型之路，在发展路径和方式上实现根本性的优化调整。其中不仅强调经济增长方式的转变，也要在充分考虑低碳环保目标的过程中大力发展高效率的清洁产业，主要包括以可再生电力和储能为基础的电力系统转型、以高效率低能耗为特点的产业转型、以自然资源为基础的生态系统补偿和转型。

三、西北地区系统性 转型整体思路及 重点领域分析



（一）以可再生电力和储能为基础的电力系统转型

由于中国目前的能源结构仍然以煤炭和石油为主，在未来碳中和目标实现的过程中需要将现有高比例的化石能源替换为零碳清洁能源，因此可再生能源电力的发展就显得至关重要。西北地区具有非常丰富的风光资源，且具备了大规模消纳可再生能源的能力，但仍然面临灵活性以及对外有效输送等挑战。因此，将可再生电力和储能相结合作为基础进行西北地区的电力系统转型，不仅有助于西北省份快速实现碳中和，也能更好地助推其他高电力消费省份实现减排。

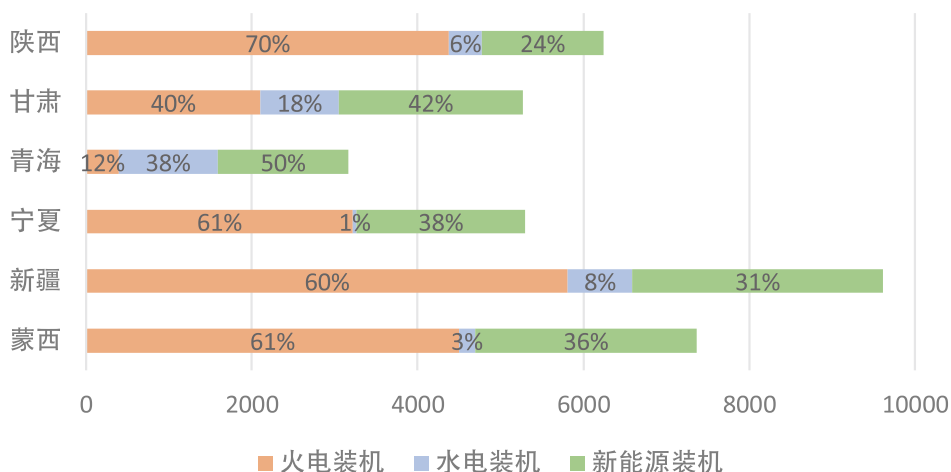
1. 可再生电力的充分挖潜

以温带大陆性气候为主的西北地区，以其晴日多、降雨少、风速大的气候特点，成为了中国风、光资源

最优质的地区之一。国家发展和改革委员会划分的光伏资源分区和风能资源分区中，光伏一类资源区全部位于西北地区的宁夏、青海、甘肃、新疆、内蒙古等5个省区，风能资源全部一类资源区和除张家口、承德以外的二类资源区也全部位于西北地区。

在构建以新能源为主体的新型电力系统的过程中，西北地区可再生能源的资源优势，以及该地区相对低的电力负荷水平，使该地区成为最有可能率先实现可再生能源大比例接入，甚至100%绿电供应的地区之一¹。2020年，位于西北地区的青海省率先实现了省级电网连续31天100%绿电供应。截至目前，青海省超过90%的发电装机为清洁能源机组，超过60%的发电装机为新能源机组，“十三五”以来累计外送新能源272亿千瓦时²。可以预见，西北地区在迈向本地区电力零碳化供应的同时，将同时为全国其它地区源源不断的输送清洁电力，为全国完成碳达峰和碳中和目标提供有力的支持。

图 2：西北地区 2019 年电力装机情况



（数据来源：2020 中国电力统计年鉴³，内蒙古电力公司网站⁴）

(1) 西北地区电力系统转型的挑战

西北地区当前的电力系统转型，需要解决两个层次的问题：一是如何鼓励和引导可再生能源装机，持续提升可再生能源装机水平；二是如何优化利用现有可再生能源装机，促进现有装机的高水平利用。就第一层次而言，风电、光伏这两个主流新能源发电技术已经成熟，今后的主要挑战已经从过去的技术限制转向经济与市场层面上的考量，现阶段面临的现实挑战是如何在平价时期实现可再生能源的可持续发展。就第二层次而言，应意识到解决西北地区的可再生能源消纳问题既决定了西北地区自身完成“双碳”目标的进程，也关系到全国其他地区的绿电供应和转型进度。具体而言，前者需要应对零碳能源高比例接入后的系统灵活性挑战，后者需要应对可再生能源外送的技术和经济挑战。

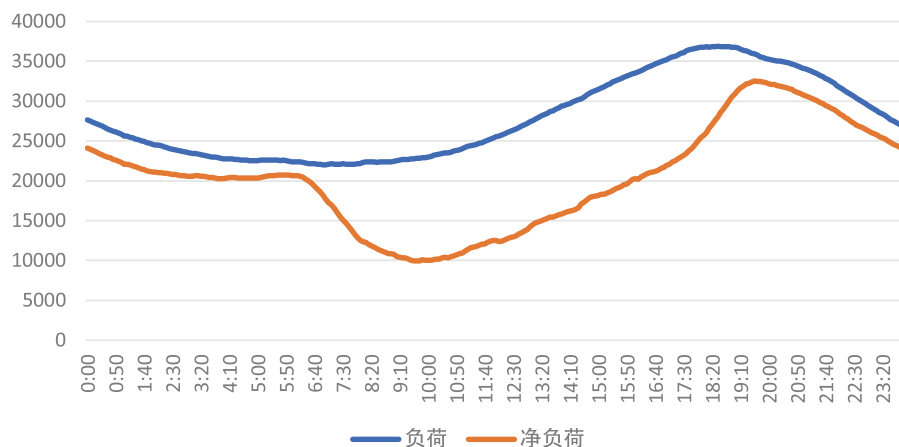
平价时期可再生能源的可持续发展：2021年起，新备案的集中式光伏电站和新核准的陆上风电项目不再享受任何政府补贴，标志着中国新能源发展从过去十余年的政府补贴驱动模式逐步转向需求驱动模式。政府补贴在过去十年新能源发展过程中发挥了至关重要的作用，一方面使中国的风光发电装机在十年间保持了年均约33%增速，并成为了全球新能源装机最多的国家，另一方面也驱动了风光技术全产业链的发展、降低了新能源发电成本，并使中国成为了全球最大的光伏组件生产国和风机制造国⁵。

随着政府补贴的退出，西北地区需要寻找新的驱动力引导新能源装机可持续发展。伴随着电力市场化改革不断推进，政府需要因地制宜地利用市场与行政手段，形成一套利于引导可再生能源投资、利于促进可再生能源消纳的价格机制和管理机制，以确保无补贴条件下新能源的可持续发展。考虑到西北地区既有可再生能源装机水平较高、电力消费水平较低的因素，新能源可持续发展的挑战在西北地区变得尤为突出。

高比例可再生能源接入对系统灵活性的冲击：与传统电源相比，可再生能源波动性和间歇性的特点会增加电力系统的不确定性。传统上，电力系统的不确定性往往来自于需求侧，即电力用户的需求在时间维度上具有任意性和随机性；在供给侧，电力生产与电力传输均由电网调度，具有可控性，从而满足供需双方的实时平衡。随着可再生能源接入比例的提高，供给侧的不确定性显著增加，系统中的可调节机组需要更灵活的应对供需双方不确定性带来的复合影响。

风电和光伏利用风光资源发电，本质上是“靠天吃饭”的被动发电模式，其发电出力水平往往不能根据用电方的需求而调整。加州地区（CAISO）的日负荷“鸭子曲线”（图3）便体现了新能源出力和用户需求在日内时间尺度上的不均衡，新能源的接入使得电力净负荷（负荷减新能源出力）的变化幅度增加，对电力系统的灵活性提出了更高的要求⁶。

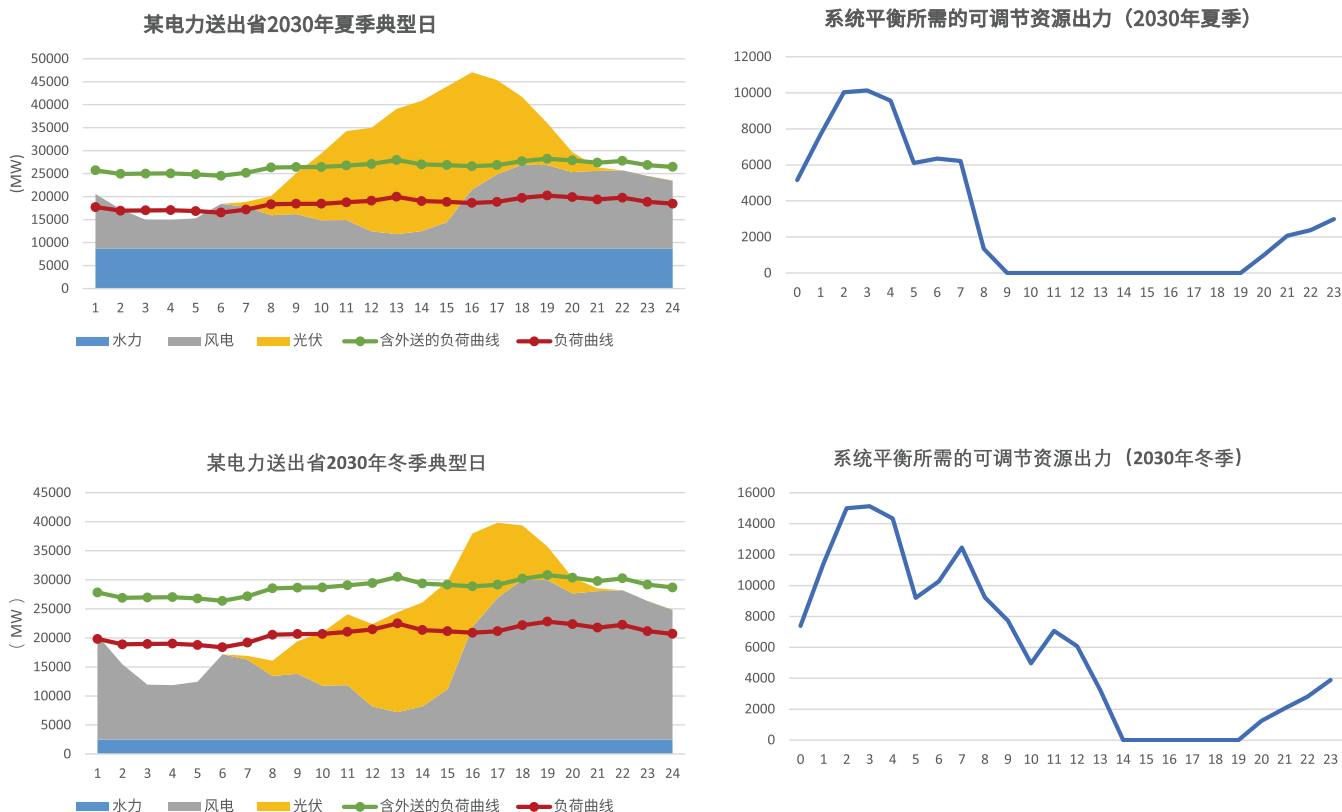
图 3：2021 年 8 月 1 日加州地区电力负荷曲线



在日内灵活性挑战的基础上，西北地区还要关注灵活性需求的季节性特征。下图中展示了对西北某地区冬夏典型日的说明性模拟，可调节资源出力需求在冬季的波动幅度比夏季更大，即冬季需要系统提供更强的灵活性。但是，我国北方城市普遍采用冬季集中供暖模式，随着热电联产模式在西北地区城市集中供

暖中的应用，部分火电机组需要在供热期成为必开机组，以供热需求决定其发电量。这种“以热定电”的模式导致以热电联产机组为代表的可调节机组在冬季的灵活性水平理论上弱于夏季，更凸显了应对灵活性挑战的重要性。

图 4：西北地区某省夏季和冬季典型日负荷及资源出力分布（2030 年模拟）⁷



大规模可再生能源外送的挑战：西北地区优质而丰富的可再生能源不仅能满足本地区生产生活的需要，还可以为其它地区提供绿色电力，促进全国“双碳”目标的实现。新能源电量大规模外送目前面临着经济、技术等方面的多重挑战：远距离特高压输电尚不具备明显的成本优势，尤其在线路利用率水平偏低时，特高压电量难以与负荷侧的本地电量竞争；已建特高压

项目采用定功率方式运行，因此西北地区送电端的可再生能源无法独立完成送电任务，需要搭配其它电源实现外送；新能源跨省跨区传输以省网、区域电网为交易主体，交易的活跃性和合同的灵活性都具有提升空间。西北地区可再生能源外送的挑战是技术与经济的复合挑战，亟待科技与市场相结合的手段加以应对。

(2) 西北地区电力系统转型的思路

综合利用市场手段和价格政策，提高平价时代新能源投资回收的确定性

稳收入：推动建立新能源多年合约体系。随着电力市场的建设和可再生能源电量占比的不断提升，新能源参与电力市场交易将成为长期发展方向。2015年第二轮“电改”以来，我国电力市场建设已经初具规模：中长期市场建设中各省级电网已经积累了丰富的实践经验；电力现货市场方面，第一批8个试点在2020年全部实现了整月结算试运行，2021年又确定了第二批6个试点地区⁸。

我国电力市场建设遵循“中长期市场+现货市场”的组织形式，从目前的实践看，中长期市场以年度交易和月度交易为主，交易的时间尺度均不超过一年，新能源发电企业参与中长期市场时无法确定长时间尺度下的发电价格水平。在电力现货市场方面，由于发电机组基于可变成本进行报价，新能源机组的可变成本接近于零，因此它们本质上是边际成交价格的接受者，难以通过优化出价策略和运营策略来保持自身的盈利能力。同时，随着零边际成本机组的增加，现货市场的边际成交价格预计将呈下行趋势，欧洲部分国家（如西班牙）的电力市场中的新能源发电商已经遭遇了类似问题。

在现有的市场建设思路下，拓展现有中长期市场的组织形式，增加比年度交易更长时间尺度的交易模式，建立多年交易合约，是支持新能源实现可持续发展的重要支撑。建立多年交易合约，目的是在市场条件下在一个较长的时间尺度上为项目提供一个确定的收益水平，降低新能源项目在投资成本回收中的风险。多年合约兼收了当前的电力市场实践与以往新能源全生命周期补贴的优点，前者以市场方式对资源加以配置，后者确保了长时间尺度下的价格水平。由于项目初期的现金流比远期现金流更能影响项目内部收益率水平，市场条件下的多年合约可以尝试以5-10年为时间尺度进行实践。这一设计在大幅提高项目投资回收确定性的同时，又同时为买方提供了远期调整交易对象、降低购电成本的灵活性。

稳支出：加快明晰有偿辅助服务、容量补偿等政策，保持价格政策的稳定性。传统电力系统中，发电机组可以同时提供电力（千瓦）和电量（千瓦时）。新能源机组大量接入后，电力系统的特点转变为电量多、电力少。有偿调频服务和容量补偿等措施是电力系统应对这一新特点、保证电力供应充足的价格手段。由于有偿辅助服务、容量补偿等价格机制的建设仍在进行中，其成本的规模、承担方、承担比例均具有不确定性。我们建议西北地区加快明晰有偿辅助服务、容量补偿等政策，并保持政策的稳定性，为可再生能源发展建立更清晰的成本信号。

优化电源主体的可预测性与调节能力，发掘非电源主体的灵活性资源

现有火电机组：通过技术升级和市场设计提高火电机组的灵活性。煤电机组、天然气机组和水电机组是目前我国电力系统灵活性的主要提供者。就西北地区而言，煤电机组是现阶段西北地区电力系统灵活性的首要来源。我国西北地区燃煤机组，尤其是近年来新建的超超临界发电机组，在发电效率方面处于全球领先水平，但在机组灵活性方面仍有进行技术改进的空间。通过技术改造，机组的平均每分钟爬坡速率可以从铭牌容量的1%-2%提升至2%-5%，纯凝机组的最小负荷可以从铭牌容量的50%-60%降至30%-35%⁹。为了促成灵活性改造，还需要完善包括现货市场、调峰辅助服务在内的市场设计，以确保灵活性改造的投资成本可以被合理回收。

风电与光伏发电：提高新能源发电出力曲线的预测精度。由于新能源出力的被动性，其预测精度将深刻影响系统的灵活性需求和系统运行的安全性。目前，国际实践已经可以将光伏和风电出力预测的平均绝对百分误差（MAPE）控制在5%以内，当前我国MAPE水平约为10%-20%，仍有一定的优化空间。完善天气信息采集系统、提高数据质量、优化预测算法和软件等方式可以有效提高预测精度、提高风光资源日前预测的准确性，降低对系统灵活性资源的需求，助力应对电力系统的灵活性挑战。

表 1：光伏和风电出力预测的平均绝对百分误差对比¹⁰

年份		CASIO		中国
		2015	2019	2019
风电	日前	6.2%	5%	~10%-20%
	实时	2.7%	1.1%	-
光伏	日前	6.4%	4.2%	~10%-20%
	实时	3.7%	1.6%	-

可调度零碳电源：因地制宜，加快推进光热发电技术应用

西北地区晴朗、干燥的自然气候特点，为可调度零碳发电技术——光热发电——的应用提供了发展空间。光伏发电和光热发电技术都基于对太阳辐射的利用。前者虽然出力水平受太阳辐射的直接影响，但它可以同时利用直接太阳辐射和散射太阳辐射发电，在多云或阴天时也可以产生电量。后者仅可以使用直射太阳辐射，这使得这类技术对适用区域有更严苛的气候条件要求，但这一技术更接近于现有的火电发电技术，具有发电出力水平可调节，发电时间与日照时间部分脱钩的优势。

西北地区的气候条件与光热技术的区位要求天然契合，加快光热技术在西北地区的应用，既可以解决本地区发电资源灵活性和充裕性的问题，也可以促进光热发电技术的进一步发展。根据国际可再生能源署（IRENA）的统计（图 5），光热发电的度电成本已经由 2010 年的每千瓦时 0.34 美元下降到 2020 年的 0.108 美元（约合人民币 0.70 元）¹¹。但这一成本水平依然高于西北省区的煤电基准价，考虑到国家层面光热发电补贴退坡的因素，西北地区各省区可以结合自身情况适当出台省级光热发电补贴政策，促进光热发电技术在西北地区更好更快应用。

图 5：光热发电技术度电成本



非电源主体：建立健全多元化储能体系，挖掘需求侧灵活性资源

传统电力系统中，电力调度机构通过调节电源出力水平为电力系统提供灵活性。随着可调节电源比例的降低，电力系统中的其它主体有必要承担更多的灵活性责任。

储能技术是西北地区大比例可再生能源接入电力系统后的必选项。储能技术颠覆了传统上“发一输一配一用”的电力系统模式，解构了发电与用电之间的实时同步关系，允许电源与负荷之间存在一定的时间异步性。包括传统抽水蓄能技术、新型化学电池技术、P2X+ 燃料电池技术等各项技术差异化的储能特点，将为解决季节性新能源消纳、系统灵活性等挑战提供多元化的可能性。我们将在下一部分单独对各类储能技术的发展进行详细讨论。

发挥用电侧的灵活性也是高比例可再生电力系统中的一个可选项。现阶段，需求侧灵活性在西北地区与东南沿海地区具有明显不同的作用。东南沿海地区作为电力负荷中心，需求侧调节的优先目的是应对用电高峰期的电力缺口；而西北地区各省区，电力装机较为充足，需求侧调节的优先目的应为降低需求曲线与供给曲线的异步性，从而降低对可调节电源的灵活性依赖。

健全市场机制，依托技术升级，激发跨省跨区输电活力，在更大范围内配置资源

大力推进灵活的跨省跨区交易既是解决西北地区自身的电力系统运行和新能源消纳问题的手段，也可以更好将西北地区的零碳电力输送到中东部地区，促进全国碳达峰和碳中和行动。在西北地区外送电的市场机制方面，一是要建立健全跨省跨区中长期和现货交易机制，二是要充分利用可再生能源消纳配额制及相关交易。前者将直接激发跨省跨区合同的灵活性，为西北可再生能源电量外送提供增长空间；后者从需求侧激发跨省跨区采购与消纳的需求，扩大负荷中心省区对西北可再生能源的市场需求。在外送技术方面，在现有特高压技术基础之上，示范性应用柔性直流技

术，对输电线路进行灵活性赋能，使西北地区的可再生能源能够更安全可靠的送出。

2. 大规模储能的应用

与传统火电相比，可再生电力有输出不稳定、发力不可控的缺点。随着西北地区电网中可再生电力的比例不断提高，如何保证电网的稳定可靠，同时尽可能充分利用可再生电力、不大量弃风弃光，是可再生电力发展过程中需要解决的首要难题之一。

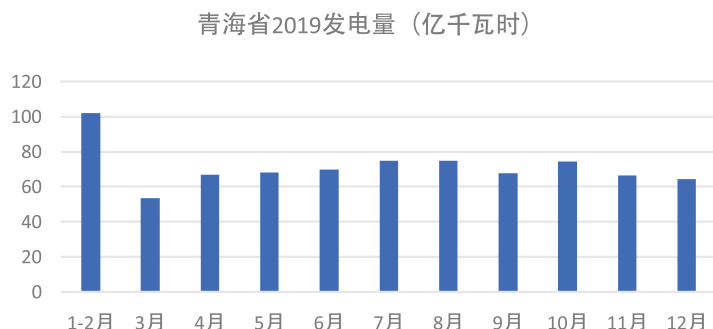
(1) 储能在西北地区的重要作用

储能系统可以帮助西北地区电网实现削峰填谷、平滑负荷，同时也是重要的调整频率、提高电网稳定性的手段。

首先，储能系统可以帮助电网提高稳定性。在传统电网中，常规发电机组可以通过利用发电机自身转动惯量、调动快速响应机组、调节机组出力等方式应对用户侧的负荷波动，避免出现频率扰动。但以光伏为代表的新能源发电机组本身难以提供转动惯量，且无法做到全天候的快速响应，只能依赖电网中的其他调频资源。不仅如此，新能源发电机组本身的出力情况也会不断变化，带来电源侧的波动。这一问题在冬季更加明显，西北省份在冬季大多需要火电厂进行热电联产，火电厂无法灵活安排发电，调峰能力大大下降，对电网稳定性带来更大的风险。在这种情况下，以飞轮、电池为代表的储能系统可以充当缓冲层，为电网提供关键的稳定性。

第二，储能可以提高电网调峰能力，充分利用风光发电量，解决发电侧出力和用户侧负荷不匹配的问题。在发电侧，新能源出力日夜变化明显，无法人为控制，更无法针对用户侧负荷曲线进行调整。另外，由于西北省份季节变化明显，新能源发电量不仅会在单日内大幅波动，在季节尺度上也会出现较大浮动，以青海省为例，省内新能源发电量高峰通常出现在 7-8 月，发电量低谷出现在 1-3 月，低谷发电量比高峰下降超过 30%（图 6）。

图 6：青海省 2019 年发电量（亿千瓦时）

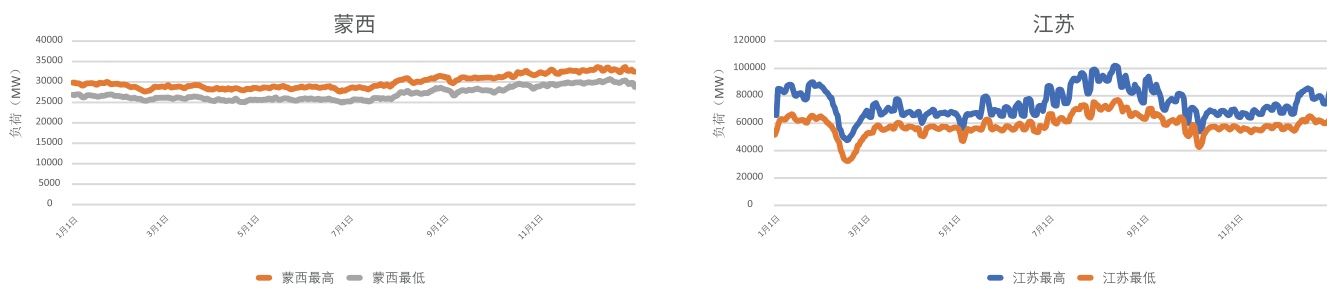


西北省份发电量高峰出现在夏季，低谷出现在冬季¹²

最后，储能的开发和利用有助于增强西北地区电力向外输送的稳定性和能力。在用户侧，虽然西北省份本身电力需求曲线平缓，日夜、季节波动不明显，但由于西北省份还承担了对外输出电力的责任，因此其电力负荷很大程度上受到电力输送目的地省份的影响。在此基础上，在跨省输送电力时还必须考虑跨省通道的输送能力。新能源大发、发电量超出外送能力时，

输送线路可能无法满足电力输送需求，可能出现外送通道断面受阻的情况，这也会造成弃风弃光。因此西北省份的电力调峰不能仅仅止步于匹配发电侧曲线和本地用户侧曲线，还必须配合外部用电大省的需求，提高西北电网的电力外送能力，使西北省份的新能源资源得到充分的利用（图 7）。基于这些原因，西北省份相比普通东部省份更依赖储能。

图 7：蒙西和江苏典型用电负荷曲线



虽然西北省份负荷曲线较为平缓，但由于承担了电力外送的任务，必须考虑其他省份的用电曲线¹³

(2) 未来西北地区适合发展的主要储能技术方向和趋势

不同的应用场景适合不同的储能技术，西北省份未来将需要多种储能技术共同发展、互为补充。

目前在国内储能领域，主流方式为抽水储能和电化学储能，前者占到了我国电力储能项目装机规模的

90%，后者近几年增长迅速。抽水储能放电时间长，储能周期长，灵活性强，是电网侧储能的理想选择。但在西北地区建设抽水储能电站难度较高。西北地区气候干燥，降水量较小，蒸发量较大，缺乏适宜建设抽水储能的自然条件。再加上冬季冰冻期长、河流泥沙量大，西北地区建设抽水储能项目的难度被进一步拉高。因此作为替代和补充选项，西北省份可以考虑发展电化学、储热、氢能等多种新型储能方式。

以锂离子电池为主的电化学储能可以胜任电网调频、短时间跨度调峰等需求。虽然根据测算，电化学储能的度电成本是抽水储能的2倍左右，但其建设不受自然条件限制，应用方式和场景灵活多样，在发电、电网、用户侧都可以发挥作用，尤其适合分布式的小型储能项目，因此有机会成为西北省份的主要储能形式。电化学储能电池主要来自报废的电动汽车，这些动力电池经过检测、筛选和重新组装后最终在储能系统中实现梯次利用。

而对于较长时间跨度的调峰需求，储热和新能源电力制氢将是合理的储能选择。储热是一种多用于用户侧的储能技术，其原理是使用热泵将冷热分离，分别储存在冷源和热源中，在房屋温度变化、需要制冷/制热时再将其释放。储热的优势不仅仅在于它可以实现超长时间的能量储存，还在于其中储存的热能往往可以直接利用，不必再次转换为电能。西北省份由于气候干燥，昼夜温差大，季节间温度变化大，因此对制冷和制热都有大量的需求。夏季储存的热能可以供冬季使用，白天储存的热量可以供夜晚使用，节省电能的同时还避免了火力发电被热电联产需求锁死的情况。

氢能是最灵活的长时间跨度储能形式，新能源电力生产的绿色氢能在我国实现2060碳中和目标的计划中将扮演重要角色。在新能源电力大发时，电厂可以将多余的电力用于电解水，通过储存产生的氢气实现能量的跨季度储存。同时，氢气在未来还将被大规模应用于冶炼、化工、交通等多个领域。西北省份通过发展制氢产业，不仅可以充分利用新能源大发时产生的额外电力，还可以依托较为廉价的氢能源发展冶金、化工等产业。不过目前电解制氢的技术尚未成熟，能量转换效率十分有限，氢能应用也方兴未艾，因此氢能更适合作为西北未来的储能选择，出现在中长期规划中。

(3) 西北地区发展储能的重点措施

综合来看，西北的储能发展目标大致为：发展以抽水、电化学为主导的储能技术来调峰调频、保证电网稳定性，用储热和氢能缓解季节性电力差异带来的

压力，同时发展氢能配套产业充分利用可再生能源资源。但目前，西北储能产业发展仍然面临储能成本机制不明确、新型储能技术不成熟、储能项目融资难等问题。为了能够更好地在未来发挥储能的优势，增强清洁电力供给的稳定性和灵活性，助力西北地区实现碳中和的同时，为其他电力需求大省提供强有力的支撑，西北地区需要从价格机制的设计、技术突破以及投资引导等3个主要方面积极引导和完善市场的建设。

完善价格机制，确保储能企业利益：首先，西北地区必须完善储能价格机制，填补储能项目经济补偿方面的空缺。在当前的政策要求下，新能源发电企业必须按照自身装机量搭配一定量的储能资源，用以保证电网稳定性。但是由于我国电力市场制度在该方面的欠缺，储能项目没有足够的盈利渠道，储能投资无法得到相应的经济回报，因此许多新建储能项目仅仅是为了满足政策要求，实际处于入不敷出的状态。甚至对于一些已经建成的储能项目，发电企业也尽量少用甚至不用，以此来降低维护和使用成本。这不仅降低了新能源电力企业的效益，更阻碍了储能系统的大规模应用，影响了新能源电力的最大化利用。为了激发储能市场的活力，西北省份应当完善价格机制，通过试点容量市场、储能里程成本核算等手段，给予储能项目应有的经济补偿，真实反映储能资源价值。

积累储能技术，布局多样化储能体系：未来西北省份的储能系统必然是能够覆盖不同需求场景的、多种储能技术互相补充的多样化组合，但目前除了传统的抽水蓄能外，其他储能方式或是技术上不成熟，或是成本上不经济，都无法大规模应用。这就意味着以电化学、氢能为代表的新型储能的普及需要技术的进步来推动。西北省份应当开展广泛的技术合作，为新型储能技术提供试点和实验的平台，实现技术积累。

为储能项目提供绿色金融方案，降低项目融资难度：储能项目在电力系统中发挥着类似于蓄水池的作用，帮助电网平衡供需、保证电网安全稳定，提高了新能源电力的利用率，带来了实际的经济效益和环境效益。在适当的价格机制下，储能项目能够产生稳定、可预测的现金流，帮助企业规避风险。但同时，储能项目通常前期投资大、项目周期长、投资回报慢，对

于普通企业和投资者来说缺乏吸引力，这就给储能企业增加了融资难度。为了解决这一问题，西北省份应当为储能项目提供绿色金融方案，以较低的利率为储能企业提供贷款，帮助新建储能项目获得投资。

（二）以高效率低能耗为特点的产业转型

在丰富的煤炭、石油、天然气以及各类矿产资源的支撑下，煤化工、石油化工等重工业一直是西北地区经济发展的重要支柱。然而面对碳中和的压力，西北地区不仅需要大胆探索氢能、锂电池回收和梯次利用等清洁低耗能产业作为转型出口，也需要在转型的过程中从优化石化产品需求入手，提升生产制造效率，同时结合碳捕获和封存等末端处理技术，在产业转型的带动作用下完成碳中和目标。

1. 以煤炭和化工为核心的工业低碳转型

（1）西北地区主要重工业特点及低碳转型挑战

西北地区的煤炭、石油、天然气等矿产能源资源丰富，基于其能源和资源优势，以能源化工为代表的重工业是西北地区经济发展的主要动力。在各类化石能源中，西北地区煤炭储量占全国 30% 以上，主要集中在新疆、宁夏和陕西；石油储量占全国 20% 以上，主要集中在陕西；天然气储量占全国 50% 以上，主要集中在陕北地区。在工业结构上，以陕西为例，其煤炭、油气等能源化工长期占据全省支柱地位，2019 年，陕西能源化工产业总产值超 1 万亿，占工业增加值比重达到 54%，占全省 GDP20% 左右。另一代表性省份甘肃的支柱产业包括石油化工、装备制造、有色冶金、能源电力等，多年以来，甘肃的重工业比重一直高达 85% 左右。西北地区产业结构中传统能源和重化工业占比较高，低碳转型无疑将对地区的经济发展带来较大的影响。

首先，西北地区煤化工产业聚集，产能规模大，而煤化工生产具有高碳排放的特征。相比于石油 1.6-2.0 的氢 / 碳原子比，煤的氢 / 碳原子比较低，仅为 0.2-1.0，因此，在煤气化制甲醇、烯烃以及煤的直接和间

接液化过程中，均会有大部分碳以二氧化碳的形式释放，以达到产品的氢 / 碳比。从原理上看，这部分的过程碳排放无可避免，且煤同时也承担了燃料的作用，燃烧时释放二氧化碳。据测算，煤间接液化制油、煤直接液化制油、煤制烯烃和煤制乙二醇的吨产品二氧化碳排放量分别为 6.5 吨、5.8 吨、11.1 吨和 5.6 吨，而我国的现代煤化工产能规模较大，一批示范工程已商业化运行。2019 年，全国现代煤化工行业中煤制油、煤制烯烃、煤制甲醇、煤制乙二醇、煤制天然气等产品产量分别约为 746 万吨、908 万吨、6216 万吨、316 万吨、43 亿立方米，而这些产能大多集中于西北地区。

此外，如何守住战略要塞同时满足碳中和新需求，也是西北地区低碳转型过程中的一大挑战。西北地区是全国重要的能源基地，具有举足轻重的战略地位，以宁夏宁东、内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林为核心的能源化工“金三角”地区，是我国现代煤化工产业发展的聚集高地。新疆的准东、伊犁、吐哈、和丰等煤化工基地也已具规模。中国面临着多煤少油的问题，长期以来石油的对外依存度较高。以煤代替石油为原料制造化工基础产品，可以保障国家能源安全。未来，发展煤化工将依然是国家的战略需求，仍需实现有序、健康的发展。这决定了，在碳达峰、碳中和新要求下，对煤化工产业不能简单地限制或取缔，而应结合国家战略需求，通过技术进步、效率提升等手段，推动煤化工行业的低碳发展。

（2）煤化工等重工业低碳转型的潜力分析

尽管西北地区以煤化工为代表的重工业低碳转型存在一系列挑战，但从煤化工排放特征和西北地区可利用的低碳资源看，该地区具有巨大的低碳转型潜力。

首先，由于基地生产大型化、集成化优势，西北煤化工生产具有物料充分利用、能效系统提升的优势。西北地区是我国煤化工生产的重要基地，为了充分发挥规模效应，煤化工生产规模较大，且各环节生产联系紧密，集成化特征明显。基地和园区是西北地区煤化工生产的主体单位，生产环节的集成大大有利于余热余压综合利用，以及上下游生产环节的物料充分互

供，从而减少能源和资源的消耗，降低碳排放。

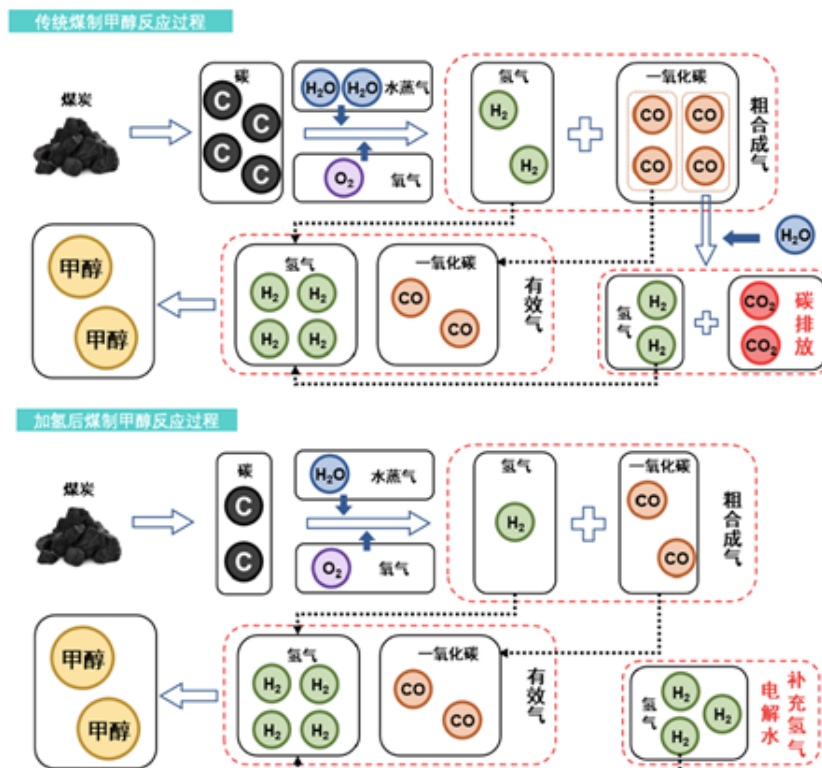
除此之外，西北地区煤化工的低碳转型潜力还表现在颠覆性技术利用的优越条件上。现代煤化工的碳排放具有浓度高、集中度高的特征，使得碳捕集、利用和封存（CCUS）的减碳潜力巨大。煤化工生产中高浓度且较为集中的碳排放可显著降低碳捕集的成本。同时，捕获的二氧化碳还可以作为原料利用到一些化工生产环节中，实现降碳目的。煤化工生产中，浓度较高的二氧化碳主要是工艺过程排放，浓度可达到65%-95%。排放浓度较高，会减少对二氧化碳提纯的投入，降低后续处理的难度和成本。在集中度方面，煤化工生产中单个排放源的排放量较大，大型煤化工装置的二氧化碳排放通常达到百万吨以上。排放源的集中，使得二氧化碳更方便富集，降低和后续处理连接的难度。从作为原料利用的角度看，二氧化碳还可用于甲醇等主要化工产品的生产，实现碳的循环利用。

西北地区拥有煤炭和绿氢双重资源禀赋，绿氢耦

合煤化工生产也是煤化工行业低碳转型的重要抓手。

在煤化工生产中，由于原料煤的碳氢比较高，多余的碳将以二氧化碳的形式排放。以绿氢为原料耦合到传统煤化工过程中，可通过调节合成气适宜的碳氢比，大大减少甚至避免了过程中的碳排放（图 4.1）。例如，宝丰能源打造的绿氢示范项目，200MW 光伏、100MW 电解槽生产绿氢量达到 1.6 亿方 / 年，全部补入现有甲醇生产，有望减少碳排放 24 万吨以上，节省原煤消耗 10.5 万吨。西北地区可再生能源资源丰富，绿氢和煤化工生产结合更具备了优越的条件。中国零碳电力资源分布主要集中在西部和北部地区，其中“三北”地区风能资源占中国风能资源的 90% 以上，西部和北部地区太阳能资源占总体的 80% 以上。此外，由于大量的弃风弃光现象，西部和北部多数省份已经引入了降低可再生能源成本的价格机制。西北地区也是国家“十四五”规划的若干大型清洁能源基地的所在地（图 4.2），例如新疆清洁能源基地、河西走廊清洁能源基地、黄河上游清洁能源基地等。西北地区利用其可再生电力生产绿氢具有优越的成本竞争力。

图 8：传统煤制甲醇过程和加氢后的煤制甲醇过程对比



2. 电池梯次利用与回收产业基地的建立

在对煤化工等高碳行业进行转型的基础上，西北地区同样需要建立更适合自身特点的新型产业，以顺利完成产业转型的过渡，并尽可能减少对经济发展造成的负面影响。如前文所述，电化学储能是未来西北省份储能产业的发展重点。电网级别的储能项目将需要大量的锂离子电池，而电池的来源、处理等都将是西北省份需要解决的问题。西北省份可以借此机会引进电池制造、回收产业，推动梯次利用制度和平台建设，在助力新能源汽车产业发展、促进新能源电力并网、出力碳中和的同时充分利用当地资源，形成电池全生命周期产业链，从而充分消纳工业产业转型产生的经济和就业缺口，并进一步助力碳中和目标的实现。

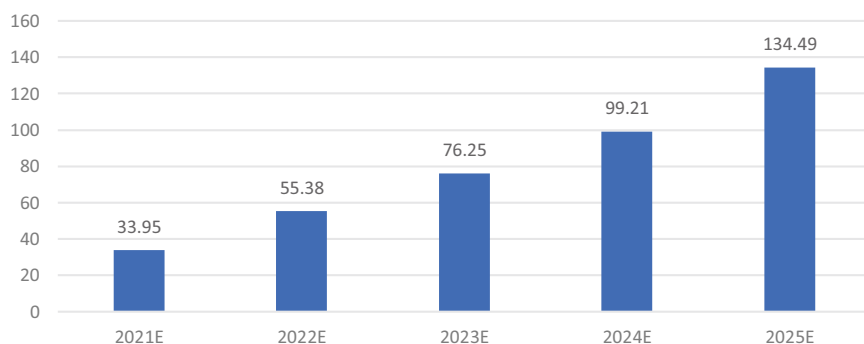
(1) 电池回收产业经济前景广阔，梯次利用是电池回收的关键一环

在西北省份寻求发展电化学储能的同时，电动汽车产业也在急切地为退役动力电池寻找回收利用渠道。

过去几年中，我国电动汽车产业完成了从无到有、从小到大的快速发展。2021年，在碳中和目标的推动下，电动汽车销量在短短半年之内就打破了此前全年的销量纪录。电动汽车的普及使得原本主要用于小型电子设备的锂离子电池有了更广阔的市场空间。据统计，我国2020年仅用于电动汽车的锂离子电池装机量就达到了63GWh，一些机构更是预测到2025年时，中国动力电池装机量将超过400GWh¹⁴。

庞大的装机量同时带来了巨大的电池回收压力，当电动汽车内部的动力电池能量逐步衰减，能量降至原先80%之下时，这些电池就将退役。退役的电池并非一无是处，虽然不再适用于电动汽车，但仍然可以被新能源发电企业、工厂厂房、通讯铁塔等用作储能手段或备用电源，也即实现动力电池的梯次利用。而无法梯次利用的电池也可以被拆解回收，其中的金属元素可以被提取后再利用。据估计，到2021年底，全国就将有大约26GWh的电池被淘汰，而到2025年，这一数字可能会达到134GWh，市场规模350亿元¹⁵。

图 10：动力电池退役规模预测（GWh）



目前，全国范围内电化学储项目较少，动力电池梯次利用机会不足，大部分淘汰动力电池会被直接拆解回收。动力电池中的锂、镍、锰、钴等金属有很高的回收价值，但如果算上拆解回收以及在环境、安全方面的投入，动力电池回收企业的利润率往往非常低，甚至有时入不敷出。这就直接影响了淘汰动力电池的价值，进而拉低了电动汽车的残值，增高了电动汽车的全生命周期成本，阻碍了行业发展。

但如果退役电池可以得到适当的梯次利用，比如被应用于电网级储能项目，那么电池中剩余的80%能量就可以继续发挥作用并创造价值。根据光大证券报告推算，在适当的价格机制下，一吨退役磷酸铁锂电池在3年的梯次利用中，不仅可以完全覆盖自身成本，还可以盈利2万至5万元。因此动力电池能否充分梯次利用，是电池回收产业在经济上是否可行、动力电池产业能否健康发展的关键。

(2) 电池梯次利用及拆解回收的主要挑战

动力电池的拆解回收和梯次利用所面临的最大挑战在于电池种类多样，没有统一的处理办法。动力电池虽然都可以划归“锂离子电池”的类别，但由于不同厂商生产的电池在类型、技术路线、化学成分、电池结构方面都不相同，因此在回收利用和梯次利用时必须对不同来源的电池采取针对性的处理措施。不仅如此，即使两枚动力电池电芯在生产过程中完全相同，也还是有可能因为使用强度、循环次数的不同而产生差异。

若要实现动力电池的梯次利用，同一储能站、同一模组中的电池必须保持高度的一致性，这就要求储能站充分了解每一枚电芯的生产工艺、使用情况和健康状态。虽然目前我国已经建立了新能源汽车国家监测与动力蓄电池回收利用溯源综合管理平台，但由于数据完整性有限，企业之间信息不透明等问题，储能企业还是主要依赖检测手段来确定电池的状况。这一过程不仅耗费大量时间精力，也提高了电池梯次利用的成本。而一旦有一致性较差、健康程度较低的电池混入储能系统，整个系统就将会面临极高的安全风险。在国家能源局组织起草的《新型储能项目管理规范（暂行）（征求意见稿）》中，就要求在电池一致性管理技术取得关键突破、动力电池性能监测与评价体系健全前，暂停新的电化学储能项目建设，足以见得一致性问题的严重性。

电池种类多样同样会给电池拆解回收带来挑战。回收企业需要针对每一种电池类型单独设计处理流程，这不仅大大增加了回收成本，还使得部分流程难以实现机械化，降低效率的同时增加了人身伤害的风险。当回收企业无法发挥规模效应、提高盈利能力时，废旧电池就有可能流入到没有回收资质的低成本作坊中。这些作坊由于不考虑环境污染和生产安全等问题，盈利能力反而比大型合规企业更高，收购电池时也能给出更诱人的价格。这些问题造成了严重的环境污染和资源浪费。

(3) 西北地区发展电池梯次利用和回收产业的形势及未来发展建议

西北省份拥有全国最大的储能装机需求。虽然目前抽水储能仍然占据市场中的统治地位，但随着锂离子电池价格下探以及安全性能增强，未来电化学储能装机量有望与抽水储能相当。到2025年，西北省份总电化学储能装机量将可能超过10GW，电能量超过20GWh。为了更好地发挥西北地区巨大的锂电池在储能和回收利用方面的市场潜力，并以此为基础建立完整的产业链，在促进低碳转型的同时扩大西北地区产业发展的优势，西北各省可以通过建立电池梯次利用标准、针对性开展试点示范以及完善下游回收处理产业三个方面进行布局。

引领建立动力电池梯次利用标准与模式：要想实现如此大规模的电化学储能装机，动力电池一致性差的问题必须首先得到解决。西北省份凭借过去几年中应用退役动力电池的经验，以及未来庞大的应用需求，可以引领动力电池退役回收产业，率先建立动力电池梯次利用标准和模式。西北储能企业应当主动联合动力电池生产厂商、整车制造厂商、国家动力电池监测平台等，搭建数据共享网络，实现动力电池的全生命周期可追溯和追踪，使得储能企业获取、收集、重组退役电池的成本和难度大大降低，也避免了黑作坊式电池回收的问题。解决好动力电池梯次利用问题不仅有助于提升电网稳定性、降低储能成本，更有助于提高电动汽车残值，加速电动汽车普及，使整条产业链获利。

开展大批量动力电池拆解回收试点项目：西北省份电化学储能系统的规模效应同样有利于电池拆解回收产业。由于动力电池在进入储能系统时已经做过筛选和一致性检验，因此当储能项目电池逐步退役时，回收企业可以稳定地获得大量同质、同类的锂离子电池。同一处理工艺下，电池集中处置使得其回收边际成本得以降低，企业盈利能力也相应提高。凭借这一优势，西北省份可以尝试开展拆解回收项目试点项目，引进全国优势回收企业，形成全国同一种类电池集中梯次利用、集中拆解、集中回收的商业模式。

结合锂金属处理产业建立完整产业链：西北省份发展电池回收的另一大优势在于，西北拥有全国 80% 的锂矿储量，位于锂电池产业链的最上游，锂金属处理相关产业已经相对成熟，可以与电池拆解回收、金属再生企业形成合力，发挥区域内产业链集中互补的优势。根据 BNEF 预测，天然锂矿产量到 2026 年左右将不再能够满足动力电池市场的爆发式需求增长，报废电池的拆解与回收将成为锂金属的主要来源之一。届时，西北凭借自身完整的锂金属产业链，将牢牢把握住动力电池产业的核心。

(三) 以自然资源为基础的生态系统补偿和转型

1. 农业与畜牧业零碳转型

农牧业经济的低碳化转型是实现“碳中和”目标的重要组成部分。中国是世界上四大文明古国之一，一直以来的高碳化经济发展模式，是中国农牧业发展所面临的重要问题。西北省份一直是我国重要的畜产品供给与消费地，而区域农业发展一直受限。近年来，伴随着经济发展与人口增长，过度放牧、耕地的过度使用等人类生产生活活动，加剧了区域碳汇功能的弱化程度。在当前的背景下，对西北地区农业畜牧业碳减排增汇关键路径、技术与模式进行探讨显得尤为迫切。

(1) 西北地区农业和畜牧业特点、分布及减排潜力

西北地区农业和畜牧业的主要类型及分布

由于客观的历史地理因素的影响，西北地区农业发展落后于全国的平均水平，耕地面积仅占本区域总面积的 4.5%。本地区农业以旱作为主，类型主要以灌溉农业、绿洲农业为主，其中灌溉农业主要分布在南疆、宁夏回族自治区的河套地区，绿洲农业主要分布在甘肃省河西地区、新疆维吾尔自治区天山山麓，河西走廊、宁夏平原以及塔里木盆地和准噶尔盆地的边缘。地区主要作物以小麦（青稞）、甜菜、豌豆、棉花、水稻为主，其中新疆是重要的温带水果产地和棉花产地，并与内蒙古一道，是重要的糖料作物产地。

西北地区草原面积广阔，草地资源占全国总量的三分之二，适合发展畜牧业的面积占到了区域总面积的 35%；同时，西北地区家畜品种资源异常丰富，拥有 20 多个优良地方牲畜良种，如三河马、三河牛、新疆细毛羊等。¹⁶得天独厚的区位优势和丰富的生物资源使得西北地区一直是我国重要的畜产品供给与消费地。¹⁷我国六大草原牧区中的四个（内蒙古、青海、新疆、甘肃）均分布于本区域。其中内蒙古牧区集中分布在贺兰山以东，主要由呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原组成；新疆牧区则集中在天山、阿尔泰山，夏季牧场在林带以上，冬季牧场则在山麓地带。^{18, 19}

图 11 西北地区农业空间分布图

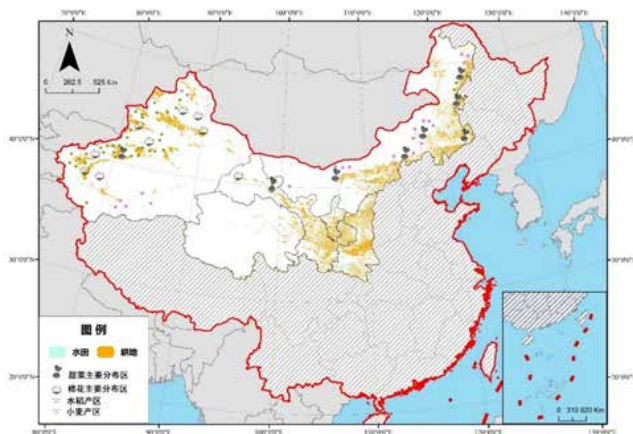
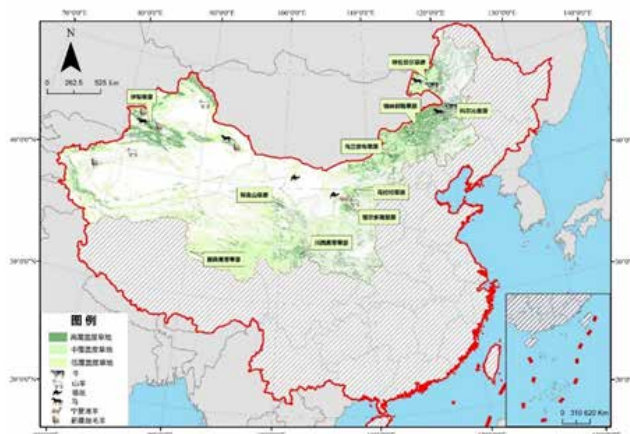


图 12 西北地区畜牧业空间分布图



西北地区农业和畜牧业主要排放来源和减排潜力

农业活动释放的三种最常见的温室气体分别是 N_2O 、 CO_2 、 CH_4 。 N_2O 农业温室气体排放量中所占的比例约为 36%，是土壤和粪便中的氮被微生物分解所产生的一种副产物，往往是农业生产中过度使用富氮复合肥料造成的；在农业生产中， CO_2 排放占农业温室气体排放的 14%，伴随着土壤中有机物有氧分解时释放出来，而在这个过程中往往与农业“有机土壤”的排水和耕作过程相关。 CH_4 通常在农作物、牲畜饲料或粪便等有机物无氧分解的过程中产生的，占农业温室气体总排放量的 50% 左右。肠道发酵、即家畜消化有机物，是最大的 CH_4 排放源，也是整体农业排放的最大来源。畜牧业温室气体主要来源于畜禽肠道 CH_4 和粪便管理过程中产生的 CH_4 和 N_2O 。反刍动物是 CH_4 排放的主要来源，全生命周期 CO_2 当量排放量达 55.25%。²⁰

近年来，西北地区因农业畜牧业造成的温室气体排放有所增加，与本地区相对落后，粗放的农牧业生产模式密不可分。就目前而言，西北地区可以从提高农牧业生产技术的科技化水平、提倡科学规模养殖、优化畜禽养殖结构、以及发展循环生态农业的角度，提高本区域减排增汇的效率。²¹ 以此观之，西北地区农业和畜牧业仍有巨大的减排空间。

西北地区农业和畜牧业减排的主要挑战和障碍

农业灌溉用水反弹间接提升本区域的碳排放效率：农业灌溉用水反弹是指预期节水量被新增的农业灌溉用水所抵消，是目前西北地区普遍存在的现象，造成碳排放不降反升。一方面节水技术的发展提高了水源的利用效率，但在某种程度上也进一步促进了灌溉农业用地面积的增加；另一方面，作物产量的增加以及规模化种植发展所增加的用水需求抵消了该过程中的潜在节水量。^{22, 23} 在这两个过程中额外的人力、电力、机械、肥料的消耗造成碳排放量的增加抵消甚至超过了管理技术进步所减少的碳排放量。此外，加大灌溉用水后，区域灌溉面积增大，造成本地区富含“有机土壤”耕地有机物有氧分解的规模和程度增大，也加大了本地区 CO_2 的排放量。

农牧业作业模式转变增强了本区域温室气体排放能力：西北地区畜牧业的饲养模式正由传统的低生产力的农户散养模式向高生产力集约化养殖模式转变。规模化养殖所带来的牲畜数量的增长与西北地区普遍落后的代谢产物处理技术、匮乏的技术和管理能力形成显著的矛盾，势必增强了本区域温室气体的排放能力；再次，规模化畜禽养殖增加以及生活水平提高带来的垃圾数量增加造成了农业及畜牧用地的污染，西北地区由于长期的资金紧缺、农户居住分散、收运成本较高、技术和管缺乏等，往往无法对此有力的处置，致使污染所带来的温室气体排放规模会进一步加剧。²⁴

草原土地利用形式的转变对区域碳循环造成极大的影响：西北地区无序开垦和过度放牧的事件频发，无形中改变了草地地区土地利用形式，影响了区域的碳循环效率。开垦和过度放牧行为极大的减少了地表的生物质量，以至于在遭到破坏的草原上，仅有 20%-50% 的地上初级生产力以枯叶或粪便的形式重新回到土壤中。这同时加强了土壤的呼吸作用，进而增加了土壤向大气所排放的碳，一旦草原被开垦或存在过度放牧行为，腐殖层的有机碳就会快速氧化，并以二氧化碳的形式释放出来，草原有可能从碳汇变为碳源。²⁵

(2) 农业和畜牧业低碳发展转型的主要解决方案和建议

养殖模式优化措施

调整产业结构，从源头出发减少碳排放：① 在保证粮食安全的前提下，结合自身优势，减少高投入、高消耗的农作物种植，培育新型农业品种，增加高产、高效吸收氮的农作物。结合研究发现，玉米的碳成本最低、碳效率最高，因此可适当增加玉米种植；② 增加饲草补给量、减少畜牧养殖数、创新收入来源，由自然粗放放牧向舍饲半舍饲集约化转变，整合资金建设高标准养殖小区及良种化、高产化和规模化的优质饲草料生产基地；③ 在科学测算草地资源环境承载能力的基础上合理规划布局畜牧产业，转变传统放牧方式，缩短放牧时间，减少牲畜存栏量，加大草地生态管护便于草地恢复生产力；④ 在生态保护前提下，出台相关政策鼓励牧民从事涉旅产业，支持牧户开办茶

馆、餐厅、民宿等产业以增加收入。²⁶

完善养殖规范，避免生产过程大量排碳：① 坚持“测土配方施肥、精准农田施肥、有机-无机配施”三大技术并行，科学合理施肥，权利提高肥料利用效率，减少农田碳排放；② 坚持合理灌溉，借鉴“小麦”的《农业灌溉用水定额》政策实施情况，合理制定其他作物的“农业灌溉用水定额”标准；③ 加大村镇环境整治的力度，实现化肥、农药、地膜、牲畜粪便等污染物合理使用、规范处理；④ 提高牲畜生产率及资源利用效率，通过土地节约效应恢复退化草原，提高区域的碳汇能力。²⁷

构建循环发展模式，首尾相衔合理用碳：① 农田内部可采用秸秆还田的方式实现碳循环（图 1-3），能增加土壤有机碳，提高土壤肥力；²⁸ ② 构建“畜禽粪便循环利用”模式，降低碳排放；③ 建立沼气池研发新清洁能源，为农户家庭生活和生产提供能源，有效处理牲畜粪便，加大资源的循环力度；④ 农牧结合采取“四位一体”模式（图 1-4），以沼气为纽带将沼气池、畜禽舍、厕所和日光温室有机结合在一起，实现碳循环。^{29, 30}

图 13 秸秆综合利用模式

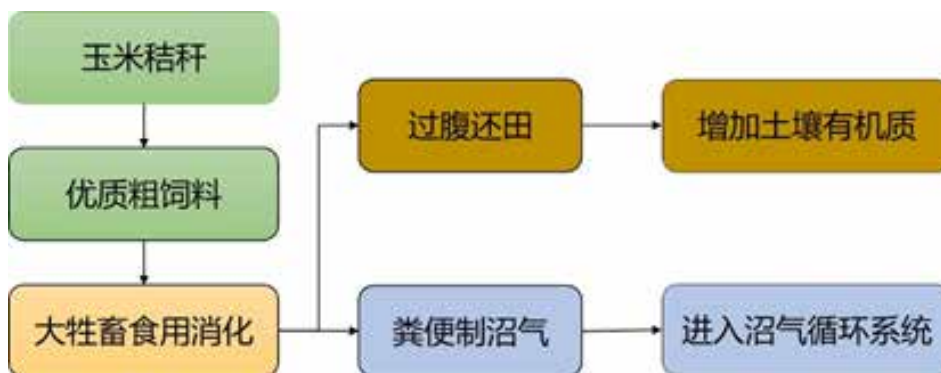
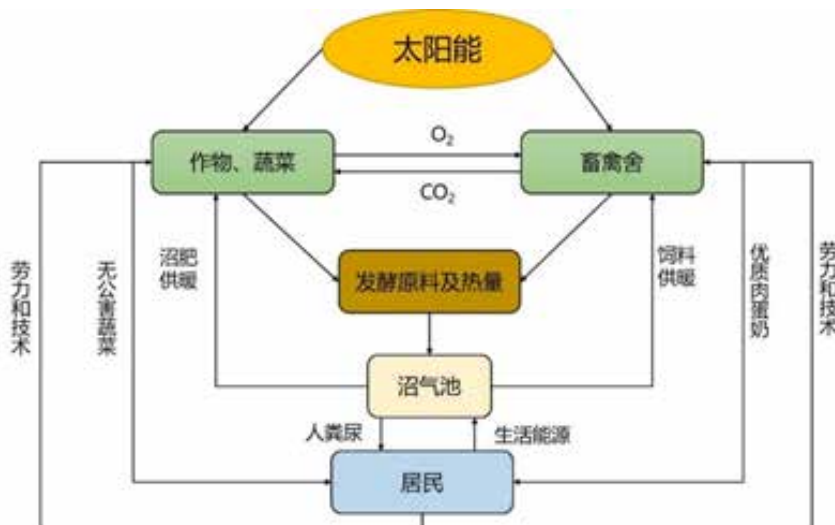


图 14 “四位一体”农村能源模式



营养物质的优化设计和使用

完善日粮中的氨基酸配比和使用饲料添加剂从而提高饲料中蛋白质利用率：如酶制剂、益生元和益生菌能够起到提高消化酶活性、维持肠道菌群平衡、改善日粮适口性，减缓肠胃排空和速度等作用，从而提高营养物质消化利用率；另一方面，要推广黑水虻等腐生性生物在分解牲畜粪便污染中的应用，腐生性生物能够取食禽畜粪便和生活垃圾，生产高价值的动物蛋白饲料，具有繁殖迅速，生物量大、食性广泛、吸收转化率高、容易管理、饲养成本低、动物适口性好等特点。利用腐生性生物分解畜禽粪工艺既可以有效降解粪便中有机物，而且其副产物往往是优质的蛋白质饲料来源。相比于微生物分解，以黑水虻为代表的腐生性生物在提高分解动物粪便效率上具有诸多优势。

分布式光伏和生物质等能源的开发利用

充分利用西北地区丰富的光照资源及农业生物质资源为农村地区、社区、牧区提供清洁能源，能够有效降低温室气体排放，优化能源结构。同时，考虑到光伏、生物质等可再生能源密度低，建议采取分布式供能方式。首先，分布式生物质能源开发能节省电网建设、运行成本；其次，分布式生物质能源开发能够提高供电可靠性和韧性，通过就地开发与消纳，解决农村与牧区的用能需求；最后，生物质能源开发还能大规模处理农林废弃物的有效方式。为用户提供电、蒸汽，通过能源梯级利用，将生物质就地消纳；最后，我国对农林废弃物发电主要采取“以能源补贴为主、辅以环境效益补助（综合利用税收优惠）、并允许其无限制电量上网”的鼓励机制，在农村地区广泛开展分布式生物质电站建设，对农村地区能源结构的调整和资源环境保护具有重要意义。^{31, 32}

(3) 西北地区农业畜牧业转型措施对国内其他省市的借鉴意义

持续推进农业绿色发展，协同实现碳减排。绿色发展与碳减排具有高度一致性，要继续推进化肥农药减量增效、畜禽粪污、农业废弃物和剩余物资源化利用；推进山水林田湖草系统治理、综合治理，稳步提升农村地区生态系统质量和稳定性；调整优化农牧业生产

结构，转变农业经营方式，实现营养物质的优化设计和使用，加强区域代谢产物的处理能力，减少温室气体排放，发挥农村地区在碳汇方面的功能作用。^{33, 34}

加快构建农业碳排放核算方法体系，探索进入碳交易市场。有必要尽快启动农业碳排放和优化管理措施的减排增汇核算的方法学研究，形成一套管理部门、生产主体、碳交易主体公认的核算方法体系，为农业减排增汇进入碳市场奠定方法基础。要充分利用农业减排成本相对较低的优势，将农业碳减排纳入碳交易市场。初期可在农业绿色发展基础较好、营商环境优良、改革精神足的地方，以县为单位，选择村集体经济组织、专业大户、合作社等规模较大、组织程度较高、市场意识强的主体，率先开展农业管理技术措施减排增汇效果核算评估培训。³⁵

2. 沙漠碳汇资源的开发和利用和沙漠化治理

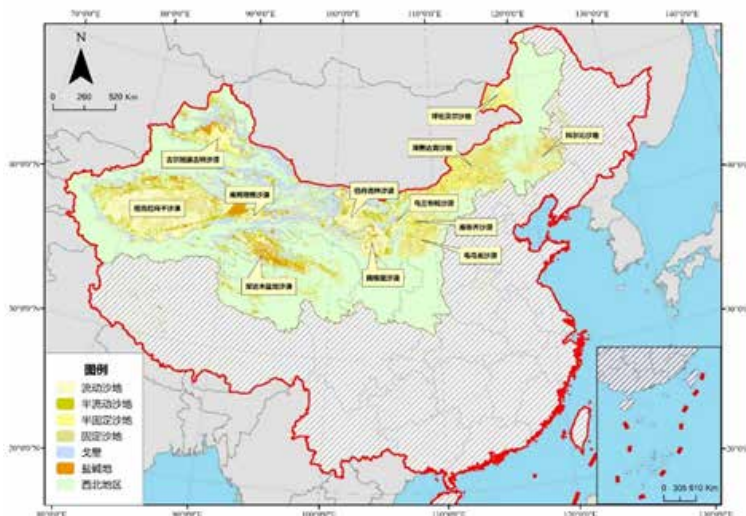
西北省份气候干旱，沙漠、半沙漠地形占比较大。这些土地植被稀少、人迹罕至，通过碳汇资源的开发和生态补偿等措施不仅能够对西北地区碳中和的实现提供支持，也可以起到优化生态环境，减缓沙漠化趋势的作用。

(1) 西北省份沙漠主要分布特点和沙漠化主要问题的现状

西北地区沙漠主要分布和特点

西北干旱区是中国沙漠最为集中的地区，沙漠化土地面积为 163.7 万 km²，约占全国沙漠总面积的 80%。就西部地区各省市沙漠化土地面积而言，以新疆面积为最大，依次为内蒙古、西藏、甘肃、青海；从沙漠化土地的程度类型看，西部地区轻度沙漠化面积 27.02 万 km²，占西部沙漠化土地 16.8%；中度沙漠化面积 15.37 万 km²，占西部沙漠化土地 9.6%；重度沙漠化面积 118.70 万 km²，占西部沙漠化土地 73.6%。³⁶ 由此，我国西北地区的沙漠以重度沙漠化为主，自西向东有塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠、柴达木沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠及库布齐沙漠等八大沙漠。

图 15 西北地区沙漠空间分布图



西北地区沙漠沙漠化主要问题的现状

荒漠化发生面积大：西北地区为我国荒漠化发生和发展的主要地区，且极重度、重度和中度荒漠化面积大，治理难度大，同时预示着在措施到位的情况下，治理潜力巨大。

气候干旱、生态环境脆弱、敏感：西北地区气候干旱、风沙活动剧烈，对气候变化敏感，在不合理的人为活动下极易发生荒漠化。多数全球气候变化研究结果显示，目前我国西北地区气温增加明显，但部分地区降水呈增加趋势，气候变化对土地荒漠化影响的不确定性增强。

不同程度荒漠化土地面积变化显著：尽管荒漠化土地面积持续缩减，轻度以上荒漠化土地面积减小，但由于有新的荒漠化土地发生，总体面积缩减不大。

化石能源开发活动增加：数量多，面积大的能源开发活动可能会对荒漠化带来新的不利影响，但同时能源开发的收入可能反哺荒漠化防治工作，有利于荒漠化土地治理。

导致土地荒漠化的原因仍然存在：尽管国家实施了一系列土地荒漠化治理法律法规和政策措施，但导

致土地荒漠化的原因仍在。如农业生产用水挤占生态用水，部分地区土地滥垦仍不同程度发生，过度放牧未完全遏制等，给荒漠化治理带来较大不利影响。

生态补偿机制有待建立和完善：西北地区人口持续增加，加之不断提高的生活水平，对环境的压力日渐增加，但总体上西北地区第二、三产业发展缓慢，生活水平的提高仍很大程度上依赖第一产业。其次，降低沙尘、固碳等生态服务功能未得到有效经济收益转换，急需开展碳交易、生态补偿等生态功能和经济功能的合理转换。

沙漠资源潜在利用方式和措施

荒漠化主要是由于社会经济发展对资源环境的巨大压力所导致，西北地区资源环境承载力有限，单纯依靠当地资源难以满足日益增长的高质量生活与可持续发展的需求，发展不直接依赖土地资源的第二、三产业，乃至探索国家层面生态补偿的可行性和方式方法势在必行。立足于西北地区社会经济和资源环境的可持续发展，沙漠和沙地资源的现状和潜在利用方式和途径总结如下：

发展区域可持续发展生态 - 生产范式指导下的沙地大农业（农业、牧业、林果业、中草药）：考虑当

地自然条件，建设集农田防护林、高效节水灌溉、高产优质作物品种、粮果、果蔬、粮药、粮草等高效农牧业体系，以较小面积的高效农牧业体系，维持当地人民基本粮食需求，产出牧草基本满足畜牧业需求。其中的高效中草药、林果可获得一定经济收入。同时严禁过度放牧，逐步推行舍饲。在此模式支持下，其余大面积土地可以得到休养生息，逐步自然恢复。

沙地特色植物资源：西北地区分布有许多特色名贵中草药和食用植物资源，如肉丛蓉、锁阳、干草、麻黄、发菜等。在严控过度干扰的条件下，发展沙地特色植物资源，提升经济发展水平。

沙漠风电和光电产业开发：西北地区光能资源和风能资源丰富，宜发展规模风电和光伏产业，一是满足当地能源需求，替代传统樵采，降低荒漠化风险；二是通过西电东送，为国家双碳战略贡献西北力量，同时获得较大经济收入。

沙漠和沙地文化休闲旅游：西北地区分布有许多壮美的沙漠风光，如被《国家地理》评为中国最美沙漠的巴丹吉林沙漠，具备开展沙漠文化和科技休闲旅游的条件。

沙区矿产资源开发：西北地区是我国的能源中心之一，矿产开发有助于提升经济，减轻对土地资源的压力，但开发过程中需注意合理开发，避免造成新的荒漠化问题。

助力国家双碳战略：研究表明，土地荒漠化造成了极大的碳库损失，恢复荒漠化土地将极大发挥西北广大地区的碳库作用，同时恢复荒漠化土地，能够为其它地区提供诸如减少沙尘等生态服务功能，为实施生态补偿创造条件。

(2) 西北地区沙漠碳汇资源的开发和沙漠化治理措施

沙漠碳汇资源的潜在总量和开发利用措施

经中国科学院新疆生态与地理研究所李彦团队一

项最新研究证实，存在于沙漠（荒漠）下的地下咸水层是沙漠中重要的碳汇之一。³⁷ 荒漠边缘区绿洲或荒漠土壤呼吸释放的 CO₂，并不像别的地区那样完全返回大气，而是部分被盐碱性的土壤水溶解吸收；这些被溶解吸收的 CO₂ 在灌溉洗盐过程中被淋洗进入地下水层，并随着地下水运动水平输送而进入广饶的沙漠下，最终汇集在浩瀚沙漠下形成地下咸水层，储存于其中的 CO₂ 则形成碳汇初步估计，这个碳库总量（全球）高达 1000 亿吨，是陆地上植物、土壤之外的第三个活动碳库。

此外，治理沙漠化，植树造林，加大该区域生态补偿的力度，也是促使西北地区沙漠碳汇功能提升的重要手段。如 2005 至今，亿利资源集团在内蒙古库布齐沙漠开展沙漠植树种草、修复生态项目，共绿化面积达 6000 多平方公里，碳汇造林 200 万亩。经估算，库布其沙漠造林项目在 2005 年至 2025 年之间的预计二氧化碳减排当量可达 607.9 万吨。

利用生态补偿等手段解决沙漠化问题的措施

沙漠化问题的治理是非常复杂的系统工程，需要全民动员、政策扶持、制度保障以及资金支持，针对沙漠化治理的社会效益大但投入资金回收困难的问题，生态补偿手段的重要性凸显。生态补偿的机制本质上是利益补偿的机制，也是一种合理的矛盾协调机制，通过合理和规范的制度设计，实现中央与地方、地方与地方、地方与个人之间的利益转移，进而实现利益的合理配置。^{38, 39} 在土地沙漠化综合治理中，不仅需要中央财政资金的直接投入、项目补贴等形式，还需要转移支付、横向补偿等多手段、多层次地建立保障体系，以实现沙漠化治理的根本目标。

加强生态补偿立法的力度：要统筹协调东部和西部，尤其提升东部地区对西部生态补偿的认识，明确东部和西部是经济发展的共同体，具有一致的社会利益和经济利益。加强对生态补偿的立法也就是建立和完善生态补偿机制的根本保证，确保能够长期、稳定地通过财政转移支付、横向补偿等手段，加强对西部沙漠化治理的支持。

创新生态补偿的机制与途径：需要建立多层次、跨区域的沙漠化治理生态补偿平衡机制，国家尺度可以通过税、费、补贴等形式开展补偿，流域和区域尺度上探索横向补偿的机制和途径，并建立和完善生态补偿的财政制度，确保补偿机制的效益能够切实落到具体的沙漠化治理工程或项目。并引入多元化的资本筹措方式，设计合理的机制和制度吸引外部资金、社会资本等的投入，完善市场机制。

完善生态补偿的政策体系：发挥政府和市场的双重调控作用，不仅保障国家财力投入的有效性，还要通过积极的政策措施保障市场经济的调控作用，推动沙漠化治理的经济效益提升，积极拓展沙漠化治理的市场渠道和盈利模式，动员社会力量投入，建立真正的长效治理机制。

以西北地区为例，总结构建中国生态补偿和沙漠碳汇典型示范

案例一：社会资本支持下的毛乌素沙漠治理

毛乌素沙地是中国四大沙地之一，也是京津地区主要风沙源之一。毛乌素沙地横跨内蒙古鄂尔多斯市南部、陕西省榆林市北部、宁夏回族自治区盐池县东北部之间，根据 1994-1996 年全国沙漠化普查结果，

毛乌素沙地总面积为 7.8 万平方公里，占全国沙区总面积的 4.25%，其中沙漠、沙漠化土地总面积 6.07 万平方公里，占毛乌素沙地面积的 77.45%。

毛乌素沙地在治理过程中，除了采用传统的沙漠化治理的手段外，充分利用政策机会和中央财政、各方社会资本支持，探索沙漠化治理与农业发展结合的治理模式。建立集沙漠观光旅游、高效节能、环境改善、沙漠化治理为一体的生态农业模式，并坚持在农林牧之间科学选择、不同类型作物合理配置与轮作、农业与非农经济活动齐头并进等原则，建立体现毛乌素当地社会经济、气候与自然特征的多功能农业生产系统。此外，毛乌素沙地的治理还体现了社会资本的力量。“蚂蚁森林”互联网公益活动、中国绿化基金会等社会公益活动和组织引入社会资本，调动互联网人群低碳生活的积极性，不仅推动了义务植树成为一项群众性运动，还与国家绿化工程、纵向补偿等相辅相成，共同构成了毛乌素沙地治理的资源保障体系。经过近 70 年的坚持治理，毛乌素沙地实现了由整体恶化向整体好转、沙退人进、局部良性循环的历史性转变，也为我国其他沙地的综合治理尤其是多层级资源保障体系的建设提供了参考依据。

图 16 宁夏毛乌素沙地营造的柠条林



图 17 蚂蚁森林梭梭林样地



案例二：中卫腾格里沙漠化综合治理

中卫市位于宁夏中西部，地处宁、甘、蒙三省区交界，西北两面被腾格里大沙漠包围，属典型的干旱半干旱地区。常年受到沙漠侵袭、沙化严重，沙漠曾一度逼近到距离城区仅4到5公里的地方，是腾格里沙漠的前沿阵地。为抵抗沙漠化侵袭，中卫市始终坚持加快造林绿化，搞好沙区综合治理作为改善生态环境，促进碳减排的重要手段。

20世纪50年代，为保障横穿腾格里沙漠的包兰铁路行车安全，中卫人民创造了麦草方格治沙技术和包括固沙防火带、灌溉造林带、草障植物带、前沿阻沙带、封沙育草带“五带一体”的铁路防风固沙体系，在横穿腾格里沙漠的包兰铁路两侧构筑了60公里的防风固沙林带，保证了铁路畅通无阻。治沙成果受到联合国环境规划署的肯定，获得“全球环境保护500佳”称号，发明的享誉世界的麦草方格治沙法荣获国家科技进步特等奖。

按照国家建设全国防沙治沙综合示范区的总体要求，中卫市借助国家实施的三北防护林、退耕还林、

天然林保护、封禁保护、世界银行贷款和德国复兴银行贷款等项目、积极鼓励和支持企业投资大力开展防沙治沙建设，通过营造生态防护林、发展生态经济林、实施封山育林、扎设草方格和营造灌木林等措施，加大腾格里沙漠东南缘、南山台、环香山地区中部干旱带等沙化区域的综合治理力度。开发建设了10万亩北干渠系新灌区和近成活率提高了25%，使防沙治沙成本降低了27%左右，在综合资本、多角度生态补偿方面提供了良好范例。

目前，这一防沙治沙模式已大面积推广应用于内蒙、甘肃、青海等地进行治沙造林中。2017年，中卫市林业生态建设局和宁夏香岩产业集团公司获得“全国防沙治沙先进集体”。从2008年开始，中卫启动碳减排基地，宁夏石化经过5年时间，造林1550亩，扎草方格100多万平方米。据估算，每年可吸收大气中二氧化碳2360吨。2018年，中卫市在沙地新植林木800余亩，以河北场、桧柳为主树种的树木3.6万余棵。两块林场相连成片，碳减排基地林场规模变大，为沙漠前沿阵地筑起一道绿色天然屏障，抵挡风沙的同时固碳潜力巨大，为国家实现“双碳”目标做出贡献。

图 18 宁夏中卫构建防风固沙体系（草方格）



图 19 宁夏中卫治沙成效



四、核心结论及 建议总结



西北地区在我国经济社会发展的整体战略中一直占据着重要地位，其快速高质量发展不仅是我国国民经济持续增长的重要保证，更是优化全国生态环境、实现可持续发展的迫切要求。“十二五”和“十三五”期间，西北地区保持了以农业农产品和资源型产业为核心的经济发展动力，而且已经逐步开始了向高效率、低耗能方向进行产业转型的进程。碳中和目标的提出，为西北地区提供了新的能源和产业系统性转型的思路和驱动力，而西北地区在各个领域开展转型工作的先行先试也将打造全国碳中和转型工作的典型示范。

经过对西北地区现有产业和能耗排放等特征的分析，可以总结出西北地区实现碳中和目标的主要挑战仍然集中在如何最大限度发挥可再生资源禀赋优势、实现电力系统的全面可再生能源化，如何从资源密集型高耗能工业向清洁高效产业转型、从而控制工业碳排放，以及如何优化利用生态系统资源、建立碳汇和生态环境保护体系这三个方面。

从碳中和的整体目标出发，要解决西北地区所面临三个主要方面的障碍，首先不能只依靠电力、工业或生态系统各自的努力，而是需要各行业之间实现相互协同和配合，才能更有效实现各领域总体优化和碳减排。例如，电力系统全面可再生能源化的实现，不仅需要从电力供给的角度淘汰煤炭资源，也要综合考虑西北地区煤化工和其他相关产业的相互影响，为退出煤炭后的产业和经济发展提供高效的转型出口。

同时，不能只依靠西北地区自身的努力，而是需要更好地与全国其他省市地区形成相互支持的机制，才能更好地发挥西北的资源优势为全国碳中和助力。例如，电力系统的可再生能源消纳和清洁高效产业转型等问题，既要求西北地区大力发展可再生电力和氢能等替代产业，也需要与东部沿海省份等地区协调，将更多的可再生电力输送到东部地区，并结合东部地

区动力电池使用需求较大的优势，在西北建立动力电池储能和回收处理的新型产业，打破产业转型的困局。

在这一系统性转型大思路的指导下，本研究为西北地区提出了以可再生电力和储能为基础的电力系统转型、以高效率低能耗为特点的产业转型、以自然资源为基础的生态系统补偿和转型等以碳中和为目标的三大领域综合优化转型建议。

其中电力系统转型方面，一方面仍然要通过建立电力现货市场、完善可再生能源价格机制和政策激励等方式缩小可再生电力与传统能源电力之间的成本差距，增强可再生能源的优势和竞争力，另一方面要逐步优化风光等可再生能源的预测，同时通过外省输送等方式增加消纳渠道，并借助抽水蓄能和电化学储能等储能方式的大力发展，弥补其灵活性方面的不足，最终实现电力系统的全面可再生能源化。

在产业系统转型方面，由于西北地区煤炭资源储量丰富且成本相对较低，在碳中和转型的过程中首先要明确煤化工等相关产业的中和目标和方案，同时以此作为指引，一方面大力发展绿氢的生产和碳捕获封存技术，对煤化工产生的二氧化碳进行控制，另一方面加速产业的全面转型，借助电子科技、新能源汽车、动力电池的回收梯次利用和末端处理、电化学储能等新型产业的快速发展，在尽可能少地影响经济发展的情况下逐步替代原有的煤化工等高耗能产业，实现产业的清洁化和零碳化。

最后在生态系统转型方面，考虑到农业和畜牧业一直是西北地区的重要支柱型产业，在碳中和转型的过程中需要从动物和作物养殖结构的调整、低排放营养物的使用、农业畜牧业生态系统自身碳循环以及光伏和天然气等可再生能源重复利用的方式综合减少碳排放，同时结合沙漠化治理和碳汇资源库的建立等角

度综合优化沙漠等生态系统的环境现状，并实现通过生态系统自身的优化发展减少碳排放的目标。

西北地区以碳中和为目标的系统性转型思路不仅为其自身各行业和领域“双碳”目标的实现开辟了更为有效的道路，也为中国其他区域和省市碳中和的实现路径打开了新的思路。纵观全国各地区能源转型和碳中和的路线图，电力、工业产业、交通建筑等能源消费侧以及生态系统的碳汇资源都是必须要完成转型工作的重点领域。在碳中和的新时代背景下，各行业、各能源品种乃至各地区之间的节能减碳工作已经无法作为独立的个体展开相应的工作，而是需要在相互配合、相互协同的基础上打造一种新的合作机制，从系统最优的角度出发，统筹规划和调配系统中各个环节的资源，通过各行业、各地区以及各解决方案之间的相互补充推动系统整体转型的进程，并最终完成全国碳中和的总体目标。

如本文所述，西北地区以其丰富的资源和巨大的发展潜力，非常有希望成为以系统性转型助力碳中和实践的示范地区，不仅为自身的能源和产业转型做出良好的铺垫，也为中国碳中和宏伟目标的实现奠定了最坚实的基础。

参考文献

1. 青海连续 31 天实现全清洁能源供电, https://www.cenews.com.cn/company/202008/t20200819_954709.html
2. “绿电 7 月在青海”系列活动助力青海率先实现碳达峰, <http://www.chinanews.com/ny/2021/07-20/9524528.shtml>
3. 中国电力企业联合会, 《2020 中国电力统计年鉴》
4. 内蒙古电力(集团)有限责任公司企业简介, <http://www.impc.com.cn/lmsy/qygk/qyjj/index.htm>
5. 国新办举行中国可再生能源发展有关情况发布会, http://www.nea.gov.cn/2021-03/30/c_139846095.htm
6. 加利福尼亚独立系统运营商, <http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/default.aspx#section-net-demand-trend>
7. 落基山研究所, 《电力增长零碳化(2020-2030)中国实现碳中和的必经之路》
8. 电力现货试点改革推进 新能源将逐步参与市场交易, <https://www.caixin.com/2021-05-10/101709346.html>
9. 落基山研究所, 《电力增长零碳化(2020-2030)中国实现碳中和的必经之路》
10. 落基山研究所, 《电力增长零碳化(2020-2030)中国实现碳中和的必经之路》
11. 国际可再生能源署(IRENA), Renewable Power Generation Costs in 2020, <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
12. 2019 年 1-12 月青海省发电量产量及增长情况分析, <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/200324-2fa746b0.html>
13. 国家发展改革委《关于做好 2020 年电力中长期合同签订工作的通知》
14. 中金点睛《锂电设备还有哪些超预期因素?》
15. 前瞻产业研究院《2020 年中国动力电池回收行业市场现状及发展前景分析》
16. 孔蕊. 变化环境下西北地区草地地上碳储量演变及驱动力分析 [D]. 南京林业大学, 2020.
17. 刘琴. 西北地区饲料及畜牧业与现代信息技术融合的思考 [J]. 大豆科技, 2019(05):78-80.
18. 柳泽新. 西北农区畜牧业生产力评价及发展潜力研究 [D]. 西北农林科技大学, 2017.
19. 闫文杰. 西北牧区草食畜牧业生产力评价及发展潜力研究 [D]. 西北农林科技大学, 2017.
20. 庄明浩, 贡布泽仁, 张静, 等. 草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望 [J]. 生态学报, 2021(24):1-8.
21. 冉锦成, 马惠兰, 苏洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究 [J]. 江西农业大学学报, 2017,39(03):623-632.
22. 段鹏. 灌溉对农田温室气体排放影响研究进展概述 [J]. 西藏农业科技, 2021,43(02):72-76.

23. 张惠茹, 许航, 宋健峰. 西北地区农业灌溉用水反弹的影响因素分析 [J]. 灌溉排水学报, 2021,40(08):129-135.
24. 曾宪芳. 西北干旱区县域农田生态系统碳足迹研究 [D]. 中国科学院研究生院 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
25. 黄晶, 薛东前, 唐宇, 等. 西北地区村镇建设与资源环境主要矛盾及协调路径 [J]. 生态与农村环境学报, 2021,37(07):861-869.
26. 赵攀, 王帅, 刘志颖. 农业农村“碳达峰、碳中和”路径分析与金融服务的政策建议 [J]. 农银学刊, 2021(03):4-8.
27. 杨春, 熊学振. 用高质量绿色发展推进畜牧业碳达峰和碳中和 [N]. 中国畜牧兽医报, 2021-04-18.
28. 谭瑞虹, 郭康权, 胡国田, 等. 西北地区农业生物质秸秆热特性分析 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2018,46(10):147-154.
29. 姚桂蓉, 张政民, 陈年来, 等. 西北地区农村节能减排效果求证及对策研究——以张掖市甘州区明永乡中南村为例 [J]. 安徽农业科学, 2009,37(15):7169-7172.
30. 李治兵, 沈涛, 肖怡然, 等. 西北地区农业生态和经济系统协调发展研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2020,41(12):237-244.
31. 安娜. 农村能源低碳转型怎么“转”? [N]. 经济参考报, 2021-09-13.
32. 张世亮, 戚桓瑜, 颜鲁薪. 太阳能技术在我国西北地区智能化温室大棚中的应用 [J]. 农家参谋, 2020(21):152-153.
33. 黄晶, 薛东前, 唐宇, 等. 西北地区村镇建设与资源环境主要矛盾及协调路径 [J]. 生态与农村环境学报, 2021,37(07):861-869.
34. 窦红菊. 我国西北地区农业产业化发展存在的问题及对策 [J]. 农业科技与信息, 2017(17):13-14.
35. 金博. 西北地区碳排放峰值预测及碳减排金融支持 [J]. 农村经济与科技, 2021,32(02):20-21.
36. 苏志珠. 中国西部地区沙漠化现状及防治建议: 土地覆被变化及其环境效应学术会议, 中国云南昆明, 2002[C].
37. Li et al, 2015, Hidden carbon sink beneath desert. Geophysical Research Letters, doi:10.1002/2015GL06422
38. 春梅. 沙漠化地区耕地生态补偿机制研究 [D]. 内蒙古师范大学, 2011.
39. 刘拓. 中国土地沙漠化及其防治策略研究 [D]. 北京林业大学, 2005.
40. 吕志祥, 高兵桃. 生态补偿制度与土地沙漠化治理研究 [J]. 安徽农业科学, 2009,37(32):15907-15908.

西北地区碳中和路径及关键领域探索, 落基山研究所, 2021.



除特别标注, 图片均来自istock.



北京市朝阳区景华南街5号远洋光华国际C座16层
06、07、08A单元

www.rmi.org

© July 2021 RMI. 版权所有。Rocky
Rocky Mountain Institute® 和 RMI® 都是注
册商标