

专题报告

洞察美国电力市场：结构、交易与价格特征

2024 年 05 月 09 日

电力市场研究专题报告

研究员：颜正野

联系电话：0755 82763240

邮箱：yanzhengye@cmschina.com.cn

执业资格号：Z0018271

随着我国电力市场建设的稳步推进，多元、有序的交易体系已初步形成，并将继续深化。目前，电力期货已被纳入我国期货上市计划，作为战略储备品种，将在服务国家战略与实体经济方面扮演至关重要的角色。此外，电力市场建设与新能源发展亦存在千丝万缕的联系，并深刻影响工业品成本、能源转型节奏、以及实现碳中和目标等。为了深入跟踪与研究中国电力市场，为电力期货上市做好准备，我们将开展一系列专题研究。我们选择美国电力市场研究为首篇。作为全球较为成熟的电力市场之一，尤其是在可再生能源整合和电力期现货交易方面的实践，美国电力市场对我国电力市场的未来发展有一定的借鉴意义。

- **美国电力市场发展概览：**美国电力市场经历了从垄断结构到解除管制的转型过程，形成了一个多元且分散的产业结构。市场参与者包括电力零售商、负载服务实体（LSE）、区域输电组织（RTO）、独立系统运营商（ISO）等。市场运作涵盖日前、实时市场，以及期货市场等，交易所会根据不同电力市场区域、高峰或非高峰时段以及不同的时间尺度等因素来设计电力合约。
- **美国发电与用电情况分析：**发电方面，自 19 世纪末以来，美国电力产业经历了从水力发电到化石燃料发电的转变，而近年来可再生能源的占比显著增长。数据显示，尽管天然气和煤炭依旧是主要的发电来源，但得益于 ITC、PTC 等激励政策和技术成本的下降，风能和太阳能的发展势头强劲。用电方面，电力消费与经济增长保持正相关关系。居民用电量显著受气候变化影响，而商业和工业部门用电量预计将随宏观经济发展而增长。
- **美国的电力市场是分区域性的，覆盖全国但不存在一个统一的全国市场。**PJM 作为最大的区域市场，积极推动需求侧响应，并加速新能源的接入效率以及优化输电规划来应对能源转型挑战。ERCOT 独立运行，以风能发电为主，但在极端天气下显示出其系统的脆弱性。ISO-NE 区域高度依赖天然气，六个州均实施可再生能源组合标准政策。NYISO 负责纽约州的电力供应，较高的人口密度需要完备的输电设施的配合。
- **美国电力市场的交易机制与电价情况：**PJM 市场实施日前市场和实时市场的两级结算机制，并采用节点边际电价（LMP）模型。区域性特点和政策调整导致不同地区的电力定价结构具有显著差异，但都包括能源、容量、可再生能源组合标准（RPS）等部分。历史上，电力价格受经济、燃料成本和国际事件冲击等因素综合影响。未来电价走势或将受到极端天气及新兴因素共同影响而出现波动。
- **风险提示：**
极端天气频发、地缘局势恶化、发电燃料成本高波动等

正文目录

一、	美国电力市场发展概况.....	5
（一）	历史：美国电力改革的三次浪潮.....	5
（二）	参与者：多元、分散的产业主体.....	6
（三）	监管：从传统监管到解除管制.....	7
（四）	交易结构：从远期到日前到实时.....	9
二、	美国发电与用电情况分析.....	11
（一）	供给：发电侧动能切换，但化石燃料仍主导.....	11
（二）	需求：经济增长仍是驱动因素.....	19
三、	美国分区域电力市场概括.....	21
（一）	PJM：美国最大的电力市场，面临能源转型挑战.....	21
（二）	ERCOT：独立运行的电力市场，太阳能装机速度超过风能.....	26
（三）	ISO-NE：高度依赖天然气发电，增长的可再生能源投资.....	28
（四）	NYISO：大城市负荷中心，面临传输硬件条件的挑战.....	29
四、	美国电力市场交易机制及电价变化.....	30
（一）	以 PJM 为例的电力交易机制.....	30
（二）	区域特色和多元要素共同构建电力供应价格结构.....	31
（三）	美国电价历史回顾：能源成本波动主导.....	33

图表目录

图 1: 加州太阳能发电高峰期造成的净负荷鸭子曲线 (GW)	6
图 2: 美国电网运行结构 (非管制区域)	7
图 3: 批发市场 (供给侧) 和零售市场 (需求侧)	8
图 4: 美国 PJM 辅助服务市场演变	8
图 5: 以 PJM 为例的能源市场、辅助服务市场和容量市场	9
图 6: 美国电力交易机制	9
图 7: 北美电力产品期货合约成交量 (份)	10
图 8: 美国 PJM 电力市场交易流程图	11
图 9: 美国主要能源发电历史格局: 从煤炭主导到多元能源并行 (TWh)	12
图 10: 1950-2023 年可再生能源发电量显著增长 (TWh)	12
图 11: 美国近十年太阳能月度发电量 (TWh)	13
图 12: 美国太阳能累计安装量 (GWdc)	13
图 13: 美国每年新增装机结构	13
图 14: 美国太阳能光伏定价趋势 (右轴-\$/Watt) 和装机量 (GWdc)	14
图 15: 美国近十年风力月度发电量 (TWh)	15
图 16: 美国近十年天然气月度发电量 (TWh)	15
图 17: 美国亨利中心天然气 2004-2024 年平均价格走势 (美元/MBtu)	16
图 18: 美国天然气生产及净进口情况 (Bcf)	16
图 19: 美国天然气消费情况 (Bcf)	16
图 20: 美国近十年煤炭月度发电量 (TWh)	16
图 21: 美国煤炭生产及净出口情况 (千万短吨)	17
图 22: 美国煤炭消费情况 (千万短吨)	17
图 23: 美国近十年核能月度发电量 (TWh)	17
图 24: 可运行核电容量 (Mwe)	18
图 25: 美国近十年水力月度发电量占比	18
图 26: 美国近十年异常干旱情况占比 (%)	18
图 27: 美国不同能源发电量预期 (TWh)	19
图 28: 美国 2024 新增装机容量 (GW)	19
图 29: 美国用电量历史趋势 (万亿千瓦时)	20
图 30: 美国经济同比增速和用电量同比增速 (%)	20
图 31: 美国各行业用电消费占比变化	20
图 32: 美国近十年采暖度日数	20
图 33: PJM 的操作权限	22
图 34: 美国 PJM 需求侧响应历史	23

图 35: DR 注册客户负荷减少方法	23
图 36: DR 注册业务板块	23
图 37: PJM 容量市场中承诺的需求响应容量	24
图 38: PJM 分燃料历史容量变化 (MW)	25
图 39: 计划中的 PJM 容量变化 (MW)	25
图 40: 按燃料类型划分的 PJM 排队容量	25
图 41: PJM 互连区域每年新增高压 (345 kV+) 输电线路里程	26
图 42: 2023 分燃料得克萨斯州发电情况 (GWh)	26
图 43: 2021 年 2 月 7 号-18 号 Texas 电力需求、生产情况 (GW)	27
图 44: 得克萨斯州每年电力容量 (GW)	27
图 45: 得克萨斯州每年太阳能装机情况 (MW)	27
图 46: 2023 新英格兰地区发电量结构	28
图 47: 六个州的可再生能源份额制 RPS (%)	28
图 48: 纽约州新输电项目	29
图 49: 2000-2023 年纽约州发电能源历史	29
图 50: PJM 日前电力市场交易流程图	31
图 51: PJM 实时电力市场交易流程图	31
图 52: PJM 互连区域的电价组成部分占比	32
图 53: 纽约地区的电价组成部分占比	32
图 54: 1998 年至 2023 年美国电力平均零售价格 (分/千瓦时)	33
图 55: 2023 年美国批发电价	34
图 56: 2024 年美国批发电价预测	34
表 1: 美国电力市场改革历史文件	6
表 2: 美国电力期货合约设计	10
表 3: EIA 与 ICE 选定的枢纽和每日批发现货价格名称	11
表 4: 美国国家层面可再生能源激励政策	13
表 5: 美国投资税抵免政策 (ITC) 税收抵免变化	14
表 6: 美国对本土光伏贸易保护措施	14
表 7: 美国电力市场分地区概览	21
表 8: PJM 的职能与限制	22
表 9: PJM 的运营市场和服务	22
表 10: DR 注册所有者/公司类型	24
表 11: ISO-NE 区域的电价组成部分占比	31

一、美国电力市场发展概况

从托马斯·爱迪生的珍珠街电站到塞缪尔·因萨尔塑造的受监管公用事业公司，以及 20 世纪末的纵向一体化垄断格局，美国电力行业在其初创的百年历程中，经历了技术和制度翻天覆地的革新。

（一）历史：美国电力改革的三次浪潮

在 20 世纪 60 年代，美国的电力供应几乎完全由垂直一体化的公用事业公司掌控，这些公司负责从发电到输配电直至消费者的整个流程。这种模式下，单一的公用事业公司在其服务区域内独占管理和运营输电设施的权利，形成了所谓的“传统监管”市场格局。

1. 第一次改革浪潮：打破垄断、引入竞争

1978 年，《公用事业监管政策法案》（PURPA）的颁布标志着美国电力行业首次向竞争机制转型。许多司法管辖区以两种形式引入竞争：

- 一是通过监管定价，促进了独立发电商之间的竞争，允许公用事业公司无需自行投资昂贵的发电设施，便能获取所需电力；
- 二是在多个州进行了行业重组，将发电、输电和配电业务分离，以激发市场竞争，使消费者能够通过市场途径获得成本更低的电力。

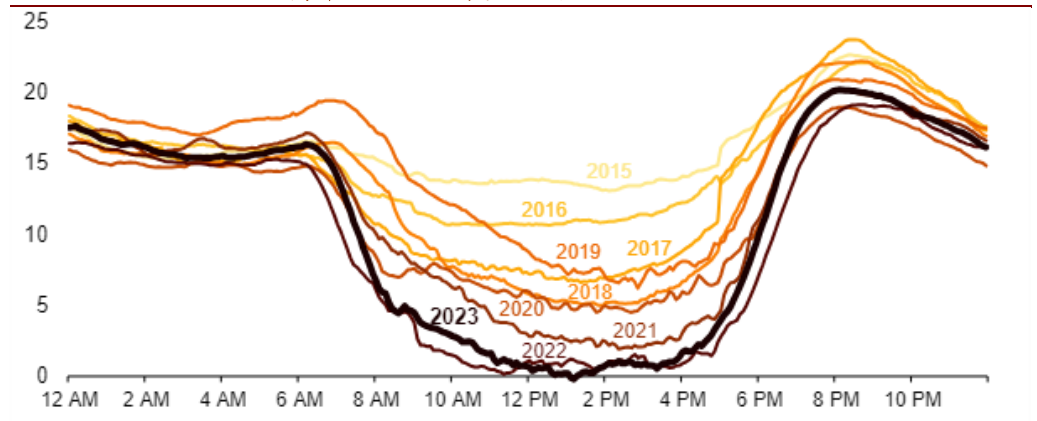
这一时期，市场逐步摒弃传统的垂直垄断模式，转而鼓励电力公司在更加自由化的环境中提供多样化的产品和服务，以降低成本。

2. 第二次改革浪潮：追求经济效率、持续改进市场

2001 年加州电力危机之后，市场设计者认识到电力市场设计是一个持续的过程，而非一次性的任务。随着计算能力的增强，以及对市场运作和需求的深入理解，市场设计者实施了一系列渐进式的改进措施。其中一个逐步改进的领域是市场的地理扩张，即利用邻近地区的互补燃料组合、负荷的短期多样性，以及日益增长的可再生能源输出。

以加州市场为例，加州午间时段的净负荷鸭子曲线凸显太阳能发电过剩现象，这导致电价下降，甚至出现负电价。邻近州可以优惠价格吸纳加州的过剩电力。这种市场现象促进加州 ISO 市场快速增长，其影响范围最终覆盖美国八个州及加拿大的不列颠哥伦比亚省，构筑起一个广泛的区域电力合作网络。

图 1: 加州太阳能发电高峰期造成的净负荷鸭子曲线 (GW)



资料来源: EIA、招商期货

3.第三次改革浪潮：整合需求侧、可再生能源和分布式资源

美国在经历了前两次以电力基础设施拆分与私有化为核心的改革后，目前正处于第三次改革的关键时期，该改革不仅聚焦于实现环境目标，特别是通过发电过程的脱碳来应对全球变暖问题，而且还涵盖能源供应、存储和智能控制技术方面的突破性创新问题。

表 1: 美国电力市场改革历史文件

年份	重要法案和命令
1977 年	《能源部组织法》: 联邦能源监管委员会(FERC)是一个独立机构, 监管输电和批发电价
1978 年	《公用事业监管政策法案》(PURPA): 鼓励热电联产、整合可再生资源、增加发电竞争
1992 年	《能源政策法案》: 赋予 FERC 允许开放输电接入的权力
1996 年	888 号命令: 推广独立系统运营商(ISO)概念, 为批发市场参与者建立竞争
1999 年	2000 号命令: 明确鼓励公用事业公司加入区域输电组织(RTO)
2005 年	《能源政策法》: 加强竞争性批发市场的框架
2007 年	890 号命令: 改革了开放输电接入规则
2008 年	719 号命令: 改善运营储备短缺期间的需求响应
2011 年	1000 号命令: 监管委员会为大型输电项目提供新框架, 重点关注可再生能源
2011 年	745 号命令: 确保需求响应资源作为发电资源的替代方案, 并按照能源市场的 LMP 向其支付费用
2020 年	841 号命令: 消除分布式和用户侧储能参与电力市场的障碍
2020 年	2222 号命令: 更好地使分布式能源(DER)参与电力市场
2022 年	《通胀削减法案》: 鼓励资本和私人企业开发和部署清洁能源技术

资料来源: 公开资料整理、招商期货

(二) 参与者：多元、分散的产业主体

美国电力供应涉及多个关键参与者，以发电、输电和配售电公司之间的市场份额较分散为特征。以下是对这些市场参与者角色和职责的简要梳理：

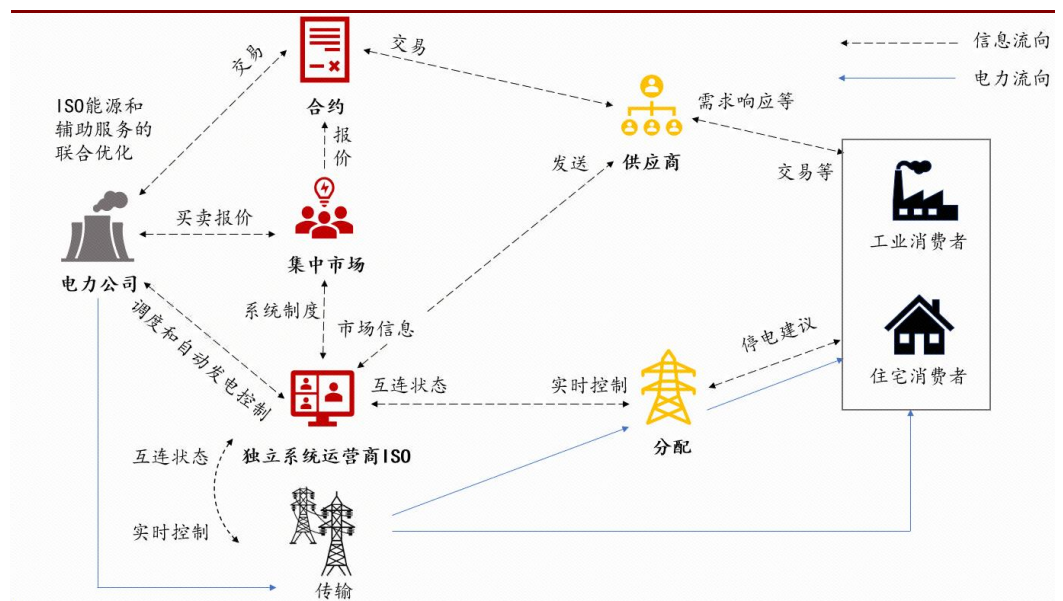
- **电力零售商**: 在电力市场放松管制的地区，电力零售商通过购买批发电力并向消费者销售来运营，通常不拥有配电基础设施。电力传输和配电通常仍由当地的垂直一体化公用事业公司或配电公司负责，这些公司按照公共事业委员会(PUC)或类似

机构设定的价格向所有消费者提供服务，而电力零售商则提供供电合同。

- **负载服务实体 (LSE) / 当地供电公司:** 在特定地理区域内向最终用户销售和分发电力的公司。它们可能是垂直一体化电力公司的一部分，也可能是独立运营的实体，专注于配电和零售环节。
- **区域输电组织 (RTO) 和独立系统运营商 (ISO):** 负责大范围电网运营的组织，它们确保电网内的电力生产与需求之间保持平衡，同时促进电力市场的公平竞争。RTO 和 ISO 不拥有电网中的物理资产（如发电厂或输电线），但负责监管电力的流动和交易。它们为发电厂、输电公司、配电公司和最终用户之间的交互提供框架和规则。
- **监管机构:** 联邦能源监管委员会 (FERC) 负责监管跨州的电力交易、批发电力市场、电力传输。公共事业委员会 (PUC) 或公共服务委员会 (PSC) 负责监管本州内的电力零售市场以及消费者保护。

这些参与者通过各自的职责和相互间的协作，共同维护美国电力系统的高效、安全和可靠运行，构成电力市场运作的复杂但高效的生态系统。

图 2: 美国电网运行结构（非管制区域）



资料来源：公开资料整理、招商期货

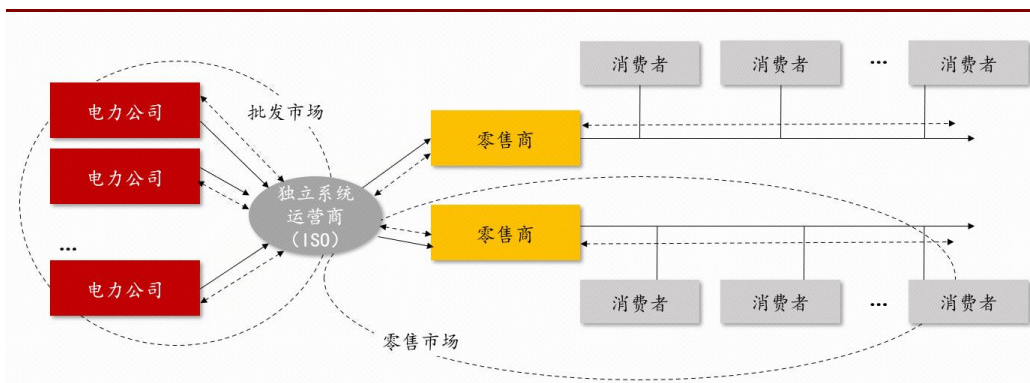
（三）监管：从传统监管到解除管制

在 20 世纪 90 年代之前，美国的电力公司多为受监管的垂直一体化企业，拥有发电厂和输电网络。这些公用事业公司作为垄断经营者，客户只能从其购买电力。州监管机构控制电价，确保电力公司能收回成本并获得合理回报，同时防止过高收费。在这种商业模式下，消费者承担着较高的电力价格风险，因为电力公司通过电力销售价格回收建设发电设施的投资成本。无论其发电效率如何，均能确保成本得到回收。例如，南卡罗来纳州的电力客户为从未建造的核电站付费。目前，这类公司仅满足美国约三分之一的电力需求。

自 20 世纪 90 年代起，美国多个州开始放宽对电力行业的管制。此次放松管制最主要的

成效体现在引入竞争性的批发市场，以及在零售市场中引入竞争机制，即客户可自行选择零售商。

图 3：批发市场（供给侧）和零售市场（需求侧）



资料来源：公开资料整理、招商期货

在这个结构下，发电站出售电力，而负载服务实体（LSE）购买电力并转售给消费者。与受管制市场相比，发电厂的投资风险由电力供应商承担，这样有助于激励供应商寻求成本效益最高的电力解决方案。

放松管制后，RTO/ISO 取代公用事业公司成为电网运营商，并成为电力批发市场的运营商。运营商通常运行三种市场来决定这些服务的批发价格：能源市场、容量市场和辅助服务市场。

- **能源市场：**用于协调日常电力生产的拍卖。在能源市场中，电力供应商根据特定的价格出售其发电厂的电力合约，LSE 竞标这些合约以满足消费者的需求。供应商的出价按价格从低到高进行排列。当提供的电量与需求量相匹配时，市场“出清”，发电厂根据每兆瓦时的市场定价收费。RTO/ISO 主要运行两个能源市场：日前市场和实时市场。
- **辅助服务市场：**旨在维护电网的频率稳定，并在发电机组发生故障或停机时，提供必要的短期备用电源。
- **容量市场：**用来确保电网在任何给定时间都有足够的发电能力来满足消费者的需求，包括在高峰负荷时期。它是一个补充机制，专注于电力系统的可靠性和安全运行，而不仅仅是即时的电力供应。RTO/ISO 定期组织容量拍卖，电力零售商在这些拍卖中竞购必要的发电能力，以满足其客户预期的电力需求，并加上额外的安全边际。

图 4：美国 PJM 辅助服务市场演变



资料来源：公开资料整理、招商期货

图 5：以 PJM 为例的能源市场、辅助服务市场和容量市场



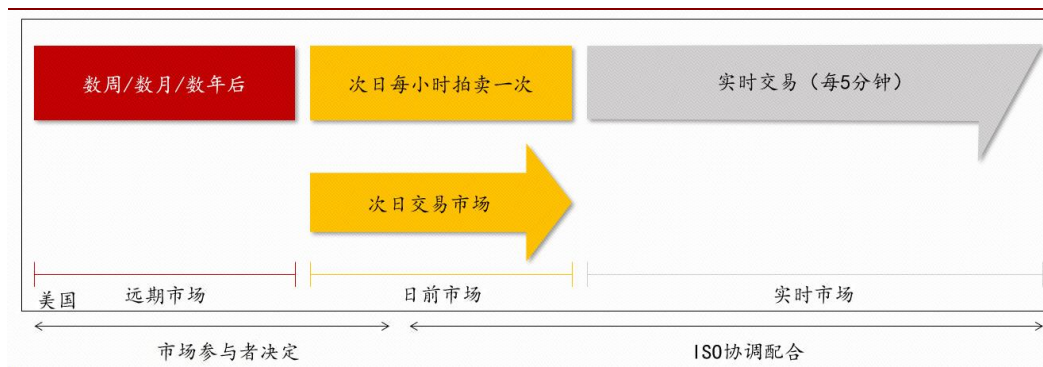
资料来源：PJM、招商期货

并非所有州都严格归入上述传统监管和解除管制中任一类。实际上，许多州选择在维持某些部分监管的同时接受放松管制的某些方面。

（四）交易结构：从远期到日前到实时

从交易时限的角度，美国电力市场可以细分为远期（包括期货）市场、日前市场和实时市场。远期市场涉及的交易基于双方合同，合同期限可以根据双方协商决定，范围从一个月到 30 年不等，涵盖全天或特定的高峰/非高峰时段。相比之下，日前市场和实时市场的交易则更为灵活，主要针对即将发生的电力需求，按小时计价和交易。为保证发电机能够提前准备运行，实时市场仅处理市场中 5% 的电力需求，而其余 95% 的电力交易则是通过日前市场和远期市场来完成的。这种多层次的市场结构旨在确保电力的高效生产和供应，同时满足不同消费者的需求。

图 6：美国电力交易机制

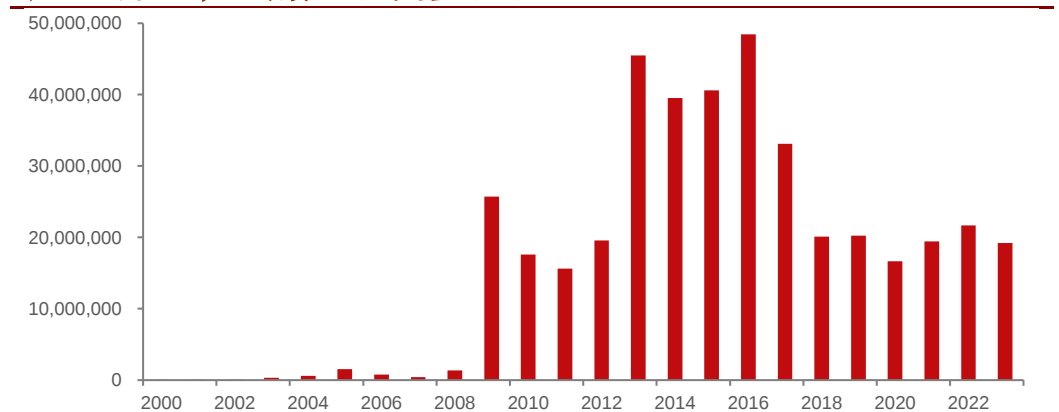


资料来源：公开资料整理、招商期货

1. 期货市场

电力期货市场是指以特定的价格进行买卖，在将来某一特定时间开始交割并在特定时间段内交割完毕，以电力期货合约形式进行交易的电力商品。美国电力期货交易主要是在以下几个交易所进行：纽约商品交易所、纳斯达克期货交易所、Nodal 交易所和 ICE 美国期货交易所。纽约商品交易所提供美国所有枢纽按月或按日的电力商品套餐，包括 PJM、MISO、NYISO、ISO-NE、ERCOT、CAISO 等的月级和日级的峰荷和非峰荷电力期货，以及 NYISO 电力容量期货。纽约商品交易所也提供美国主要市场的期权产品服务。

图 7：北美电力产品期货合约成交量（份）



资料来源：FIA、招商期货

表 2：美国电力期货合约设计

ISO/RTO	合约示例	合约名称
PJM	PJM PPL Zone Peak Calendar-Month Day-Ahead LMP Futures	PJM PPL 区域高峰月日前定价电价期货
ISO-NE	ISO New England Connecticut Zone Off-Peak Calendar-Day 5 MW Day-Ahead LMP	ISO 新英格兰康涅狄格区非高峰日日 前定价电价
CAISO	CAISO NP15 EZ Gen Hub 5 MW Peak Calendar-Day Real-Time LMP	CAISO NP15 EZ 发电中心 5MW 高峰 日实时定价电价
ERCOT	ERCOT South 345 kV Hub 5 MW Off-Peak	ERCOT 南部 345 千伏枢纽 5MW 非高 峰时段
NYISO	NYISO Zone G Day-Ahead Off-Peak Calendar-Month 5 MW	NYISO G 区日前非高峰月定价 5MW
MISO	MISO Indiana Hub Day-Ahead Off-Peak Calendar-Day 5 MW	MISO Indiana Hub 日前非高峰日定价 5MW

资料来源：PJM、ISO-NE、CAISO、ERCOT、NYISO、MISO、招商期货

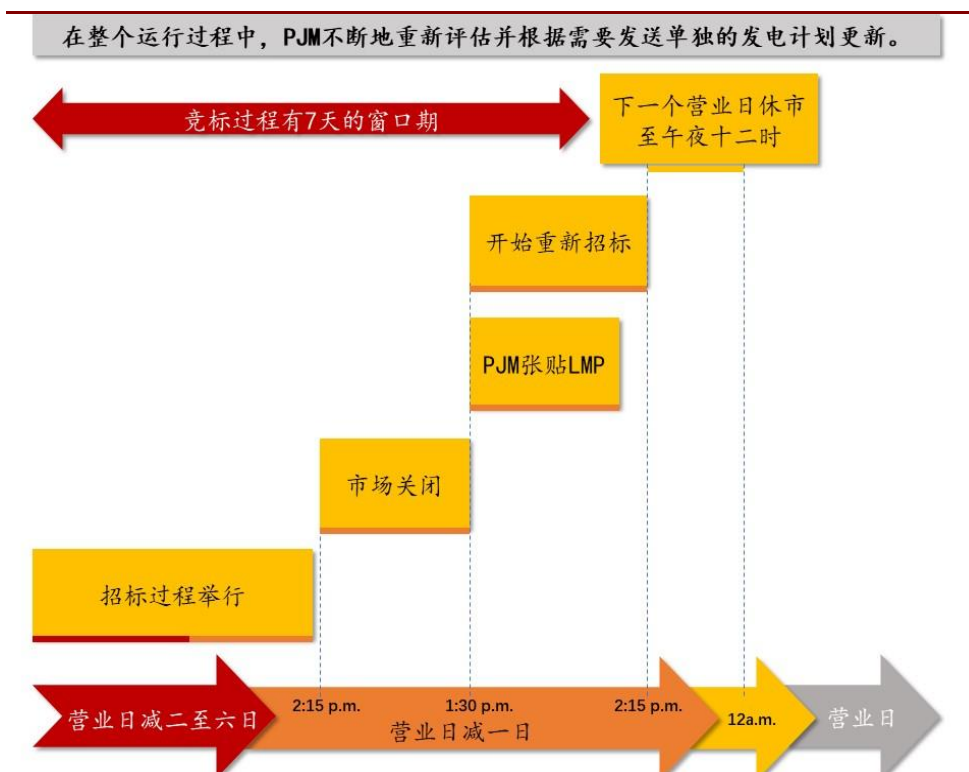
2. 日前和实时市场

以 PJM 为例，在日前市场，电力的价格是根据预测的下一日电力需求和供应以及预定的交易来提前计算的。电力参与者在日前市场进行交易，以锁定次日的电力价格和数量，这有助于他们减轻价格波动的风险并提前规划他们的电力需求。

PJM 的实时市场是一个现货市场，即采购的产品可立即交付，其中当前价格（称为节点边际电价）根据实际电网运行状况每五分钟计算一次。实时能源价格发布在 PJM 运营

数据网页上，买家和卖家之间的交易按小时结算。

图 8：美国 PJM 电力市场交易流程图



资料来源：PJM、招商期货

表 3：EIA 与 ICE 选定的枢纽和每日批发现货价格名称

地区	电力中心名称	ICE 电力产品名称
新英格兰	Mass Hub	Nepool MH DA LMP 峰值
PJM	PJM 西	PJM WH 实时峰值
中西部	印第安纳 Hub	Indiana Hub 实时峰值
德克萨斯州	ERCOT North	ERCOT North 345KV 峰值
西北	Mid-C	Mid-C 峰值
北加州	NP-15	NP15 EZ Gen DA LMP 峰值
西南	Palo Verde	Palo Verde 峰值
加州南部	SP-15	SP-15 Gen DA LMP 峰值

资料来源：EIA、招商期货

二、美国发电与用电情况分析

（一）供给：发电侧动能切换，但化石燃料仍主导

1896 年，37MW 的尼亚加拉水力发电厂的投运标志着美国现代电力工业的开端，水力发电也在随后的半个世纪中的新增发电能力中占主导地位。

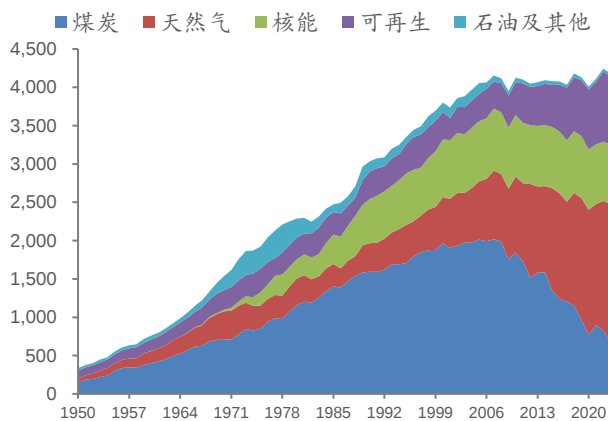
20 世纪 60 年代，蒸汽轮机和涡轮发电机技术的进步以及大量廉价化石燃料的出现，将新增产能转向煤炭和天然气。

进入 70 年代和 80 年代，核能凭借其高效的能源产出，在市场中占据一席之地。

从 21 世纪初期开始，天然气以其低廉的成本和丰富的储量，逐渐取代煤炭成为主导能源，并有效填补核电由于新投资匮乏而留下的产能空缺。

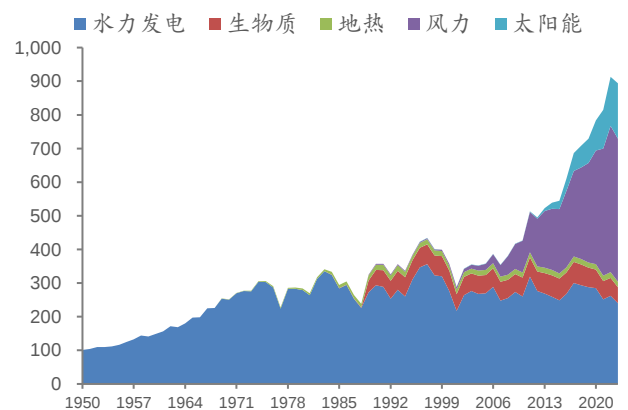
为实现电力部门的脱碳计划，政府通过为可再生能源发电提供补贴，促进发电结构向绿色能源的转变。同时，风能和太阳能发电成本的显著降低，使得这些可再生能源技术自 2000 年代初起，成为新增产能的主要来源。

图 9：美国主要能源发电历史格局：从煤炭主导到多元能源并行（TWh）



资料来源：EIA、招商期货

图 10：1950-2023 年可再生能源发电量显著增长（TWh）



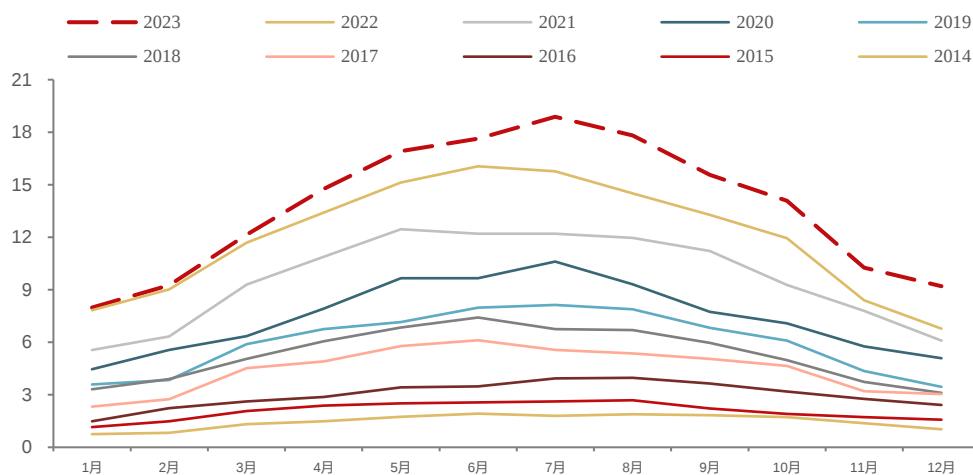
资料来源：EIA、招商期货

近十年来看，美国发电量较为稳定，大体维持在 4100TWh 左右。其中，依赖化石燃料（即天然气和煤炭）的发电占比显著下降，从接近 70% 的高位减少到不足 60%。2016 年，天然气发电超越之前一直占据主导地位的燃煤发电，成为最主要的发电来源，紧随其后的是核能、水力以及其它可再生能源发电。核能和水力发电的产量占比相对稳定，核能发电的比例在 20%，水力发电在 7% 左右。另一方面，除水力发电外的可再生能源的发电量占比增长显著，从 2001 年的 2% 增长到 2023 年的 16%。

1. 国家激励政策助力，太阳能与风能引领增长

2023 年，美国的光伏发电量实现显著增长，达到 165TWh，与 2022 年相比增长 13%，过去十年的年均增长率保持在 44%。光伏发电在美国总发电量中的占比也有所提升，从上一年的 2.8% 增长到 3.3%。

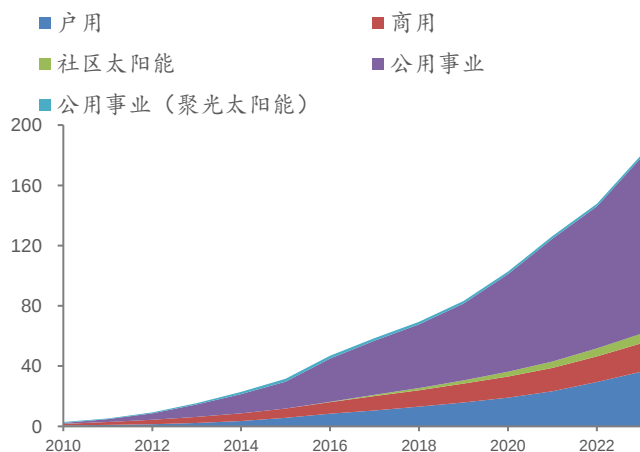
图 11: 美国近十年太阳能月度发电量 (TWh)



资料来源: EIA、招商期货

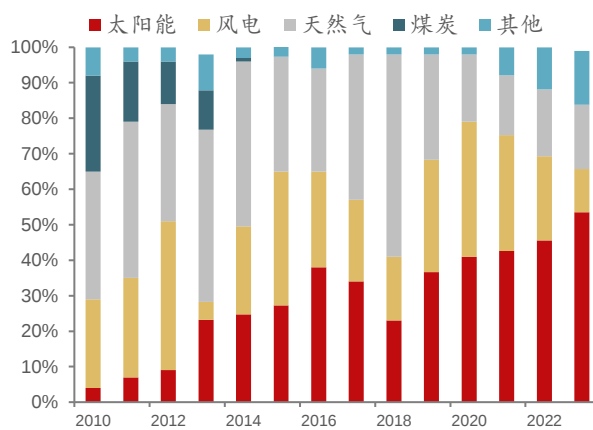
在过去十年中,太阳能装机量的年均增长率达到 28%,得益于太阳能投资税收抵免等强有力的联邦政策、成本的迅速下降以及对清洁电力需求的不断增加。目前,美国累计太阳能装机已超过 179GWdc。2023 年,美国太阳能行业在装机容量方面创下历史新高,新增装机容量达到 32.4GWdc,较 2022 年大幅增长 51%,首次突破 30GWdc 的年度装机容量大关。在 2023 年新增的电网容量中,光伏装机占比 53%,首次超过新增装机容量的一半。

图 12: 美国太阳能累计安装量 (GWdc)



资料来源: SEIA、招商期货

图 13: 美国每年新增装机结构



资料来源: SEIA、招商期货

表 4: 美国国家层面可再生能源激励政策

政策	内容	影响
Investment Tax Credit	安装可再生能源的用户可根据投资总额的一定比例 抵免应缴的所得税	主要 激励个人住宅和工商业小型项目
Production Tax Credit	为出售可再生能源电力生产者提供 税收优惠	对 发电稳定性好、现金流大的项目 有利
可再生能源份额制 RPS	规定电力公司必须确保其 装机容量中一定比例 为可再生能源	新泽西州的立法要求到 2025 年 RPS 为 35%
通货膨胀削减法案 IRA	为风能和太阳能发电提供 额外激励措施	加速电力行业减少对燃煤发电的依赖

资料来源: 公开资料整理、招商期货

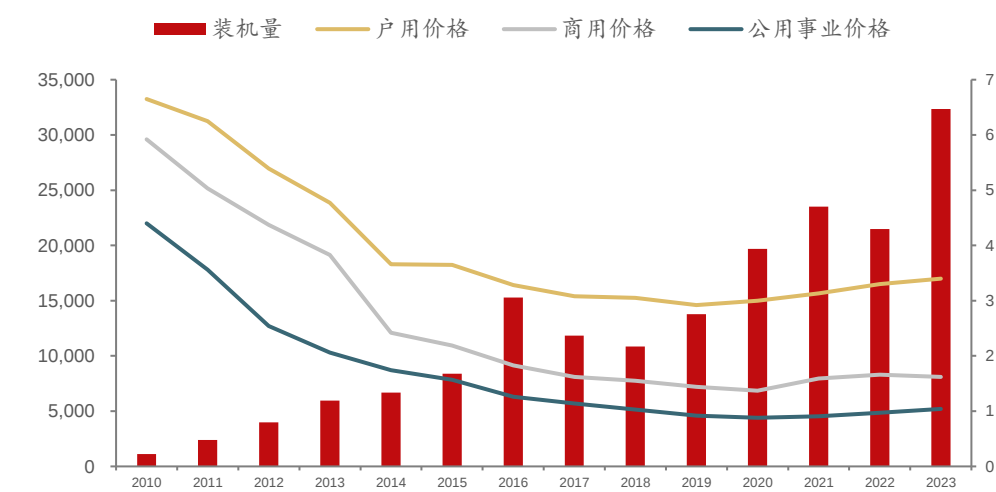
表 5: 美国投资税抵免政策 (ITC) 税收抵免变化

时间	抵免程度
2006-2019 年	住宅和商业太阳能系统项目可以享受 30% 的税收抵免
2020-2022 年	户用光伏和工商业光伏抵免 26% 的税收
2022-2032 年	工商业和户用系统都将延续 30% 的税收抵免

资料来源: 公开资料整理、招商期货

从太阳能安装成本来看, 住宅系统的均价已从 2010 年激励前的 40,000 美元降至约 25,000 美元, 下降 40% 以上, 成本的下降趋势推动该行业市场扩张, 并促进全国范围内数千个系统的装机并网。为公共电网供电的大型太阳能发电设施的价格范围在 16 美元/兆瓦时至 35 美元/兆瓦时之间, 和其它发电方式相比很有竞争力。

图 14: 美国太阳能光伏定价趋势 (右轴-\$/Watt) 和装机量 (GWdc)



资料来源: SEIA、招商期货

美国太阳能产业高度依赖进口, 2022 年, 由于各种贸易限制对太阳能部件进口造成影响, 美国太阳能装机量下降 9%。进入 2023 年, 随着供应链的逐步稳定, 太阳能装机量恢复增长。

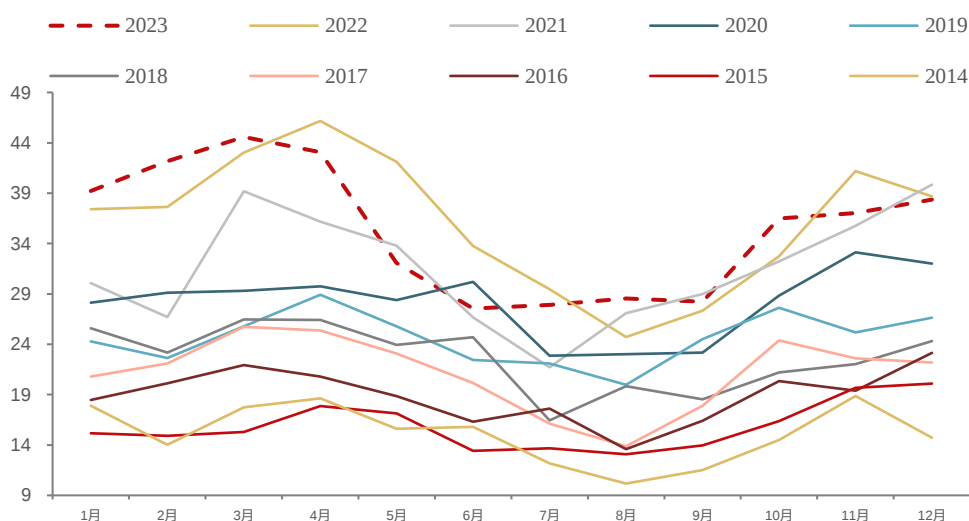
表 6: 美国对本土光伏贸易保护措施

时间	抵免程度
2011 年 11 月	美国商务部宣布将对中国输美光伏电池展开反倾销和反补贴“双反”调查
2018 年 1 月	USTR (美国贸易代表办公室) 宣布启动 201 条款, 对从中国进口的太阳能电池片征收 30% 的关税
2022 年 2 月	USTR 将对进口太阳能电池和组件的 201 条款关税再延长四年, 控制税率在 15% 左右
2019 年 5 月	301 条款-中国至美国的光伏产品需要缴纳 25% 的关税
2021 年 12 月	美国总统拜登签署 UFLPA: 在一些规定区域开采、生产或制造的商品均不得入境美国

资料来源: 公开资料整理、招商期货

风电行业的显著发展也得益于 PTC 等多项激励措施的实施, 自 2019 年起, 风电已成为美国可再生能源发电中的最大组成部分。在过去几年中, 风电在美国可再生能源发电中的占比持续增长, 从 2019 年的 41% 上升至 2023 年的 48%, 显示出风电在可再生能源领域的主导地位。风电在美国总发电量中的比例也在稳步提升, 近几年稳定在 8% 左右。

图 15: 美国近十年风力月度发电量 (TWh)

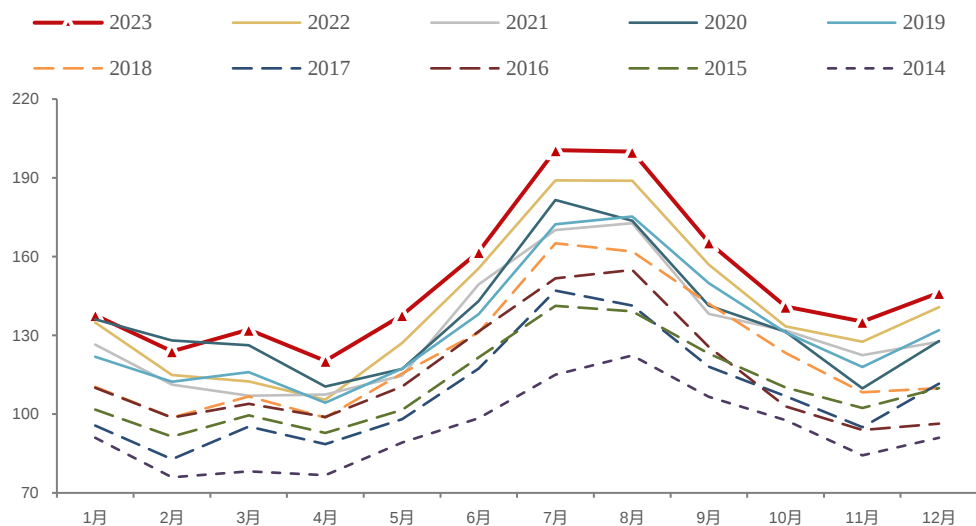


资料来源: EIA、招商期货

2. 美国火力发电结构不断调整，天然气为主导能源

在过去二十年中，由于天然气价格的低廉以及煤炭供应量的显著减少，美国的天然气发电量实现大幅增长。这一趋势得益于天然气勘探技术的突破，使得产量得以大幅提高，这也使得美国在 2023 年成为全球最大的液化天然气出口国。2023 年，天然气发电量达到 1802TWh，占全年发电总量的 43%，而位居第二的核能发电量仅占 18.6%。其中，电力部门成为推动天然气需求增长的主要力量，发电用天然气占到总量的 41%。

图 16: 美国近十年天然气月度发电量 (TWh)



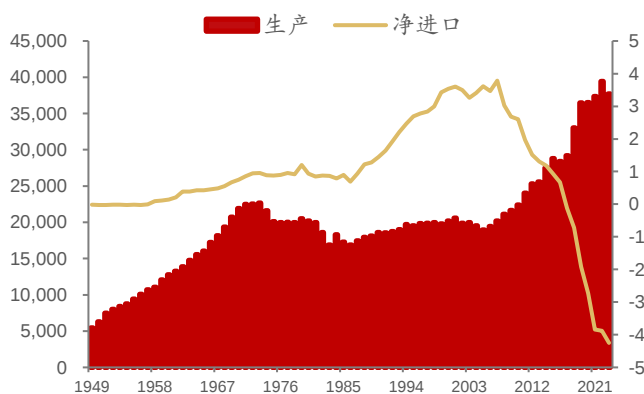
资料来源: EIA、招商期货

图 17: 美国亨利中心天然气 2004-2024 年平均价格走势 (美元/MBtu)



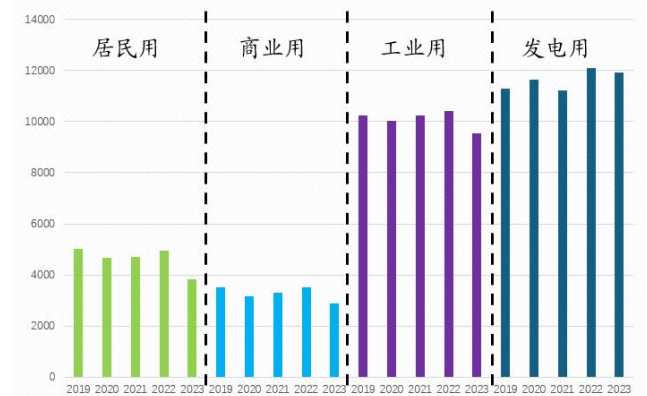
资料来源: EIA、招商期货

图 18: 美国天然气生产及净进口情况 (Bcf)



资料来源: EIA、招商期货

图 19: 美国天然气消费情况 (Bcf)

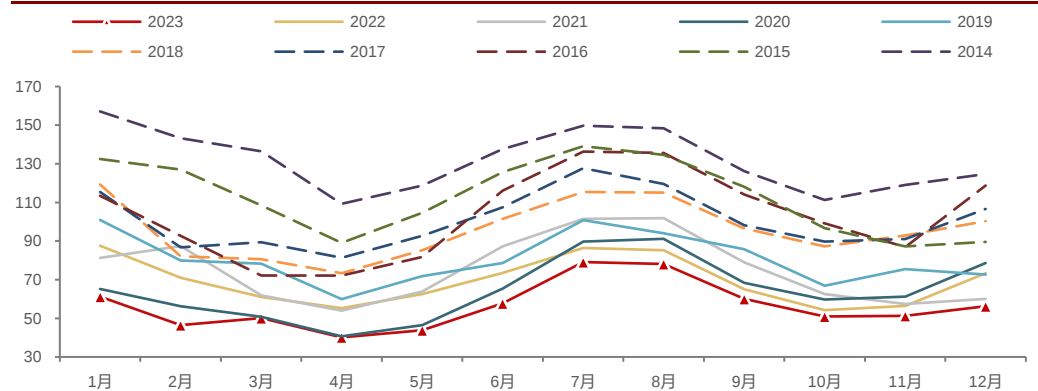


资料来源: EIA、招商期货

注: 数据更新到 2023 年 11 月

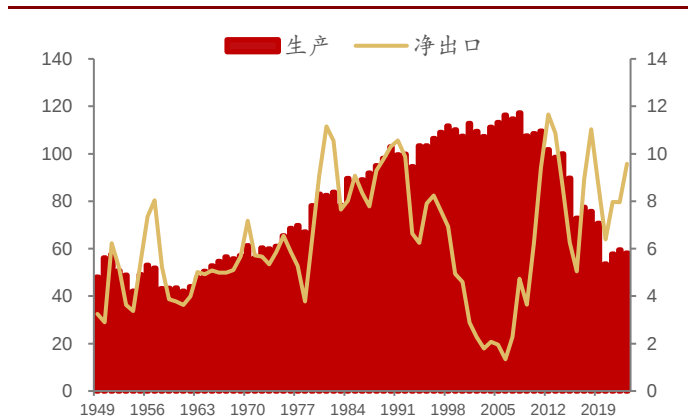
过去十年中, 美国煤电行业经历显著变革, 其发电量持续且迅速下降。然而, 在 2021 年和 2022 年, 由于天然气价格的高涨, 燃煤发电量出现短暂的反弹。截至 2023 年, 美国的煤炭发电量已降至 675.3TWh, 相较于十年前的 1582TWh, 降幅超过一半。这一变化象征着能源结构转型的一个关键转折点, 也标志着煤炭发电量历史上首次被核能发电量超越。

图 20: 美国近十年煤炭月度发电量 (TWh)



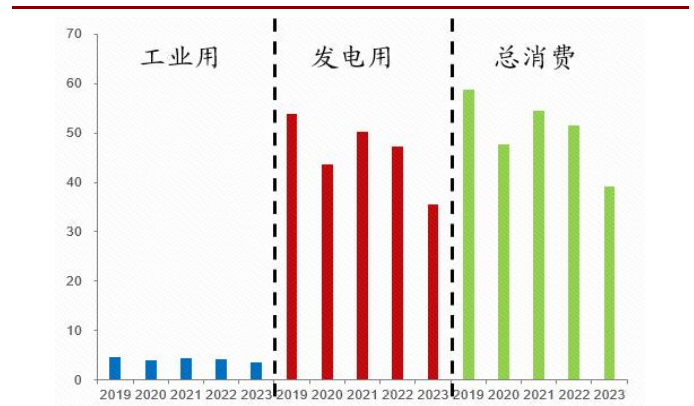
资料来源: EIA、招商期货

图 21: 美国煤炭生产及净出口情况 (千万短吨)



资料来源: EIA、招商期货

图 22: 美国煤炭消费情况 (千万短吨)



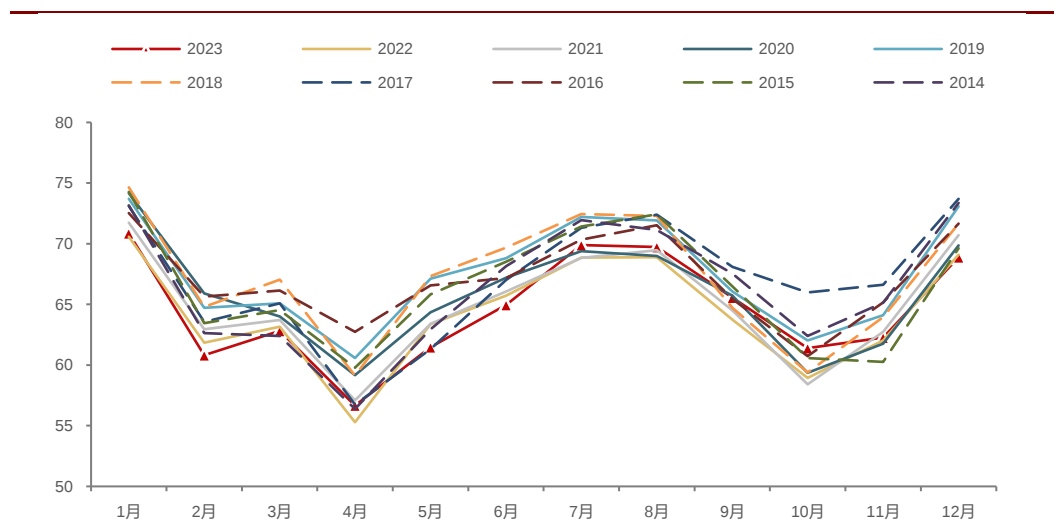
资料来源: EIA、招商期货

注: 数据更新到 2023 年 11 月

3.核能发电量较平稳, 水电受降水影响年度波动较大

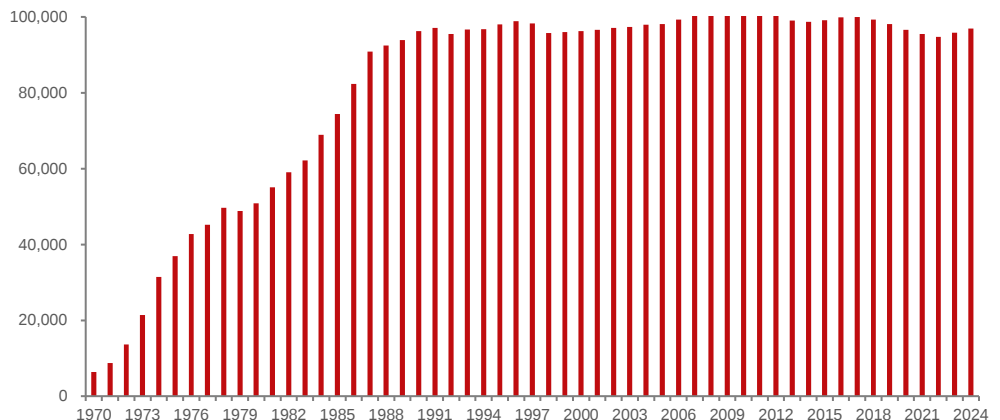
在过去十年中, 美国核能发电占比保持在 19% 左右, 显示出一定程度的稳定性。然而, 自 2020 年起, 核能发电量开始显著下降, 并持续至 2023 年。这一下降趋势可能与老旧核电站退役、政策倾向支持可再生能源以及核电站的长期维护和技术升级有关。尽管如此, 2023 年 8 月, 美国佐治亚州沃格特勒核电站 3 号机组成功并网, 标志着美国核能发展在三十多年后取得重要进展, 结束长达七年的发展停滞。截至 2023 年底, 美国共有 93 台在运核电机组, 总装机容量达到 9583.5 万千瓦。在当前追求清洁能源的环境下, 核能作为一种高效、占地小的能源选择, 具有独特优势。与太阳能和风能设施相比, 其占用的土地仅为太阳能发电设施的 1/31, 风电场的 1/173。尽管如此, 美国核能复兴仍面临挑战, 特别是在核废料处理方面, 长期解决方案尚待完善。

图 23: 美国近十年核能月度发电量 (TWh)



资料来源: EIA、招商期货

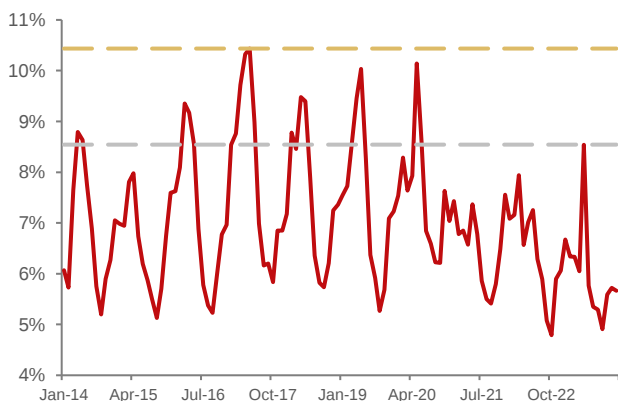
图 24: 可运行核电容量 (Mwe)



资料来源: World nuclear association、招商期货

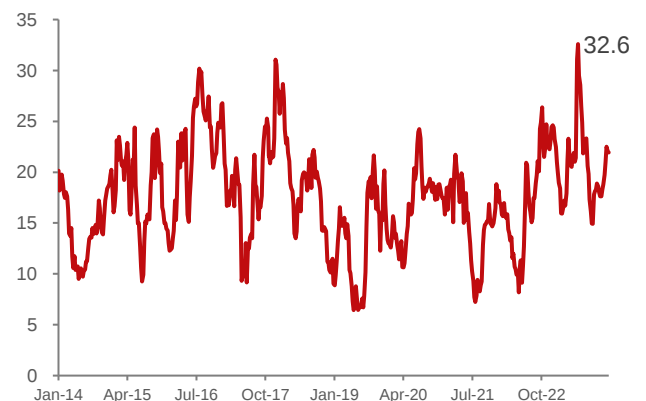
水力发电在美国拥有悠久的发展历史。主要的水力发电设施是由联邦政府投资建造的大型水坝，这些设施对国家的能源供应做出重要贡献。2023 年，水力发电在美国总发电量中的比例为 5.7%，在可再生能源发电总量中占比达 26.8%。水力发电量与年度降水量密切相关，受季节性及年度降水变化的影响而呈现波动性。以 2023 年为例，夏季出现超过 30% 的区域遭遇异常干旱，这一气候情况导致水力发电量降至 240TWh，创下二十年来的最低记录。

图 25: 美国近十年水力月度发电量占比



资料来源: EIA、招商期货

图 26: 美国近十年异常干旱情况占比 (%)

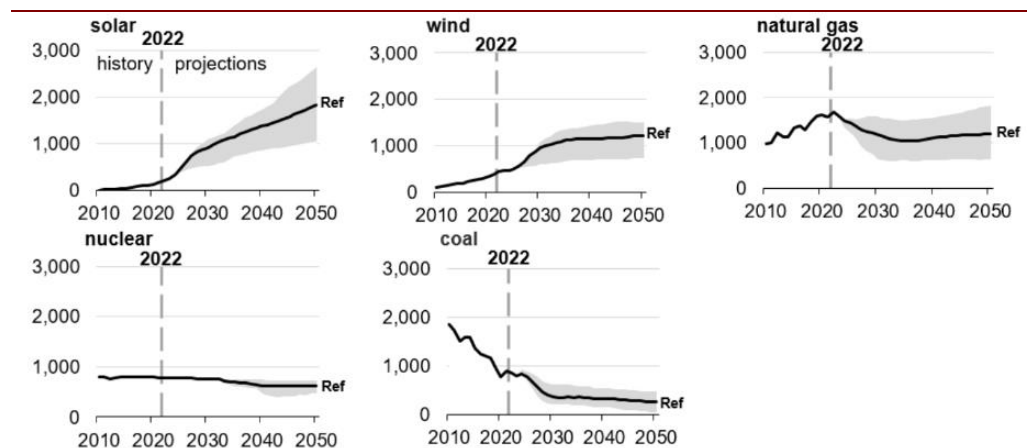


资料来源: 同花顺、招商期货

4.发电能源未来展望：可再生能源主导新增装机，燃煤发电能力预期减半

在美国能源信息署 (EIA) 最新发布的《年度能源展望 2023》(AEO2023) 报告中指出，得益于太阳能电池板、风力涡轮机和电池储能系统成本的持续下降，加之《通胀削减法案》(IRA) 等政府补贴政策的支持，可再生能源在新建发电项目中正逐渐展现出相较于传统能源更为显著的成本效益。这一趋势预示着可再生能源在未来电力结构中的竞争力和市场份额将持续增长。据预测，随着可再生能源的扩张，到 2030 年美国的燃煤发电能力可能将减少至当前的 50% 左右，约 200GW。

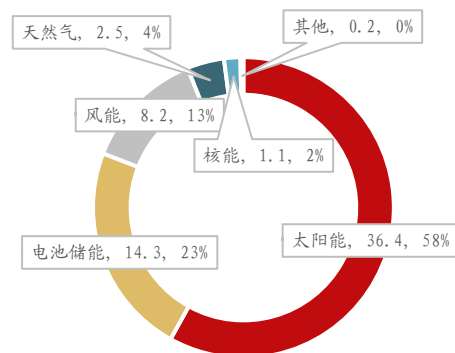
图 27：美国不同能源发电量预期（TWh）



资料来源：EIA、招商期货

根据 EIA 发布的预测，在 2024 年，美国将新增 62.8GW 的发电装机容量，较 2023 年的 40.4GW 增长 55%。

图 28：美国 2024 新增装机容量（GW）

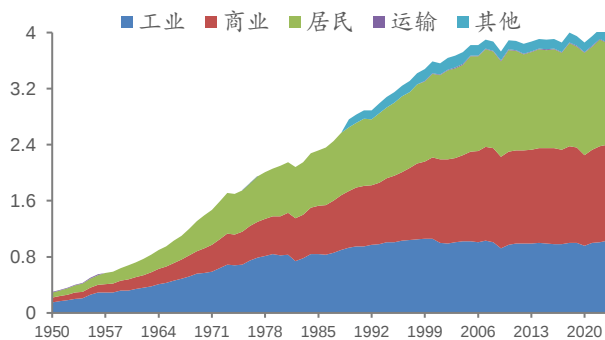


资料来源：EIA、招商期货

（二）需求：经济增长仍是驱动因素

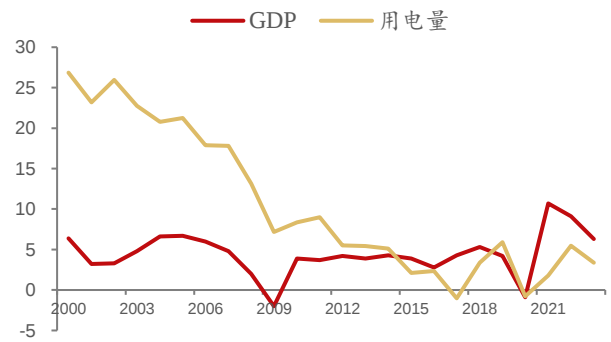
美国用电量在 2007 年之前呈现稳定增长的趋势，但随着美国实施更为严格的能源效率标准和建筑规范，用电量的增长得到有效控制。之后受到极端天气的影响用电消费会出现小范围波动。2023 年美国向消费者零售的电力达 3861.3TWh，与 2022 年的 3927.2TWh 相比环比下降 1.7%。根据美国商务部发布的数据，美国全年 GDP 达到 27.37 万亿美元，实现 6.3% 的稳定增长。随着发达国家高耗能产业的缩减，经济增长速度往往超过用电量的增速，但整体趋势保持一致。2023 年，美国用电量同比增长 3.4%，与上述趋势相符合。

图 29: 美国用电量历史趋势 (万亿千瓦时)



资料来源: EIA、招商期货

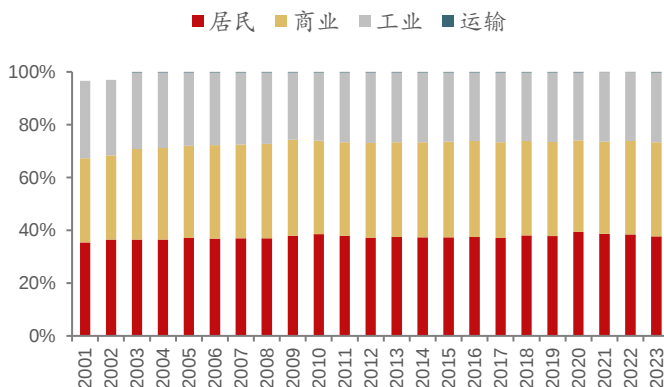
图 30: 美国经济同比增速和用电量同比增速 (%)



资料来源: EIA、同花顺、招商期货

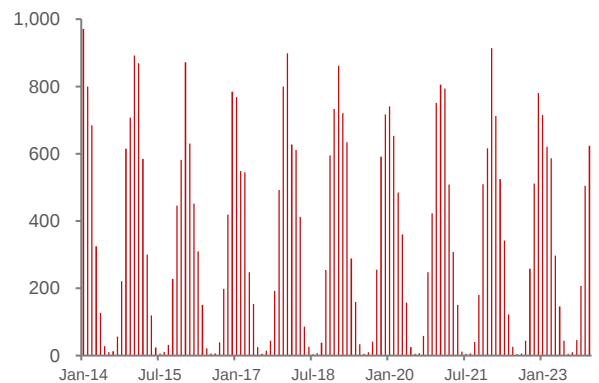
美国的电力消费结构可划分为居民、商业、工业和运输四大领域，2023 年各自占比分别为 38%、36%、27%和 0.2%。在该年度，居民部门的电力消费呈现显著的下降趋势，同比减少 3.6%，创下近十年来的最大降幅。这一变化与 2023 年美国经历的温暖冬季有着直接的关联，由于气候偏暖，居民的供暖需求减少，从而导致电力消耗的相应降低。

图 31: 美国各行业用电消费占比变化



资料来源: EIA、招商期货

图 32: 美国近十年采暖度日数



资料来源: Wind、招商期货

注: 采暖度日数是衡量全国范围内在一定时期内采暖需求的计量工具。

在美国能源信息署 (EIA) 最新发布的《短期能源展望》(STEO) 中，美国长期以来保持相对稳定的电力需求预计在 2024 年和 2025 年将达到历史新高。EIA 的预测指出，在 2023 年美国最终用户的电力销售经历 2% 的降幅之后，2024 年将实现 2% 的增长，而 2025 年预计将继续增长 1%。从部门来看，主要的电力消费部门用电量均呈上升趋势，特别是住宅用电领域，预计将实现 4% 的显著增长。此外，考虑到今夏预计的高温天气，商业领域的电力需求预计将进一步上升。EIA 还预计，得益于今年美国宏观经济环境的持续改善，商业和工业部门的电力销售额有望增加 2%，反映出经济活力对能源消费的积极影响。

三、美国分区域电力市场概括

不同于拥有统一全国性电力市场的国家，美国的电力市场是区域性的，覆盖全国各地但没有一个全国性的统一市场。目前，美国有 10 个区域电力市场，这些市场覆盖特定的地理区域，且在一定程度上与邻国加拿大和墨西哥的电网相互连接，形成一些跨国的电力市场。按市场是否放松管制可分为以下三类别：

表 7：美国电力市场分地区概览

分类	电力市场/地区	管理州
ISO/RTO	ISO-NE	康涅狄格州、缅因州、马萨诸塞州、新罕布什尔州、罗德岛州和佛蒙特州
	NYISO	纽约州
	PJM	宾夕法尼亚州、新泽西州、伊利诺伊州、马里兰州、密歇根州、俄亥俄州、弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州和北卡罗来纳州的部分地区以及哥伦比亚特区
	MISO	从加拿大的曼尼托巴省到美国的路易斯安那州，东至印第安纳州，西至明尼苏达州，涵盖大约 15 个州的部分或全部地区，以及加拿大的一部分地区
	SPP	北达科他州、南达科他州、内布拉斯加州、堪萨斯州、明尼苏达州的西部、艾奥瓦州、密苏里州、蒙大拿州的东部、怀俄明州的东部、俄克拉荷马州、德克萨斯州的北部、新墨西哥州的东部、路易斯安那州的北部和阿肯色州
	CAISO	加利福尼亚州
	ECROT	德克萨斯州
双边交易	西北地区	华盛顿州、俄勒冈州、爱达荷州等地
	东南地区	佛罗里达州、乔治亚州、阿拉巴马州等地
复合情况	WECC	加利福尼亚州、亚利桑那州、科罗拉多州、内华达州、俄勒冈州、犹他州、华盛顿州、新墨西哥州、爱达荷州、蒙大拿州、怀俄明州和部分德克萨斯州，以及加拿大的不列颠哥伦比亚省和艾伯塔省

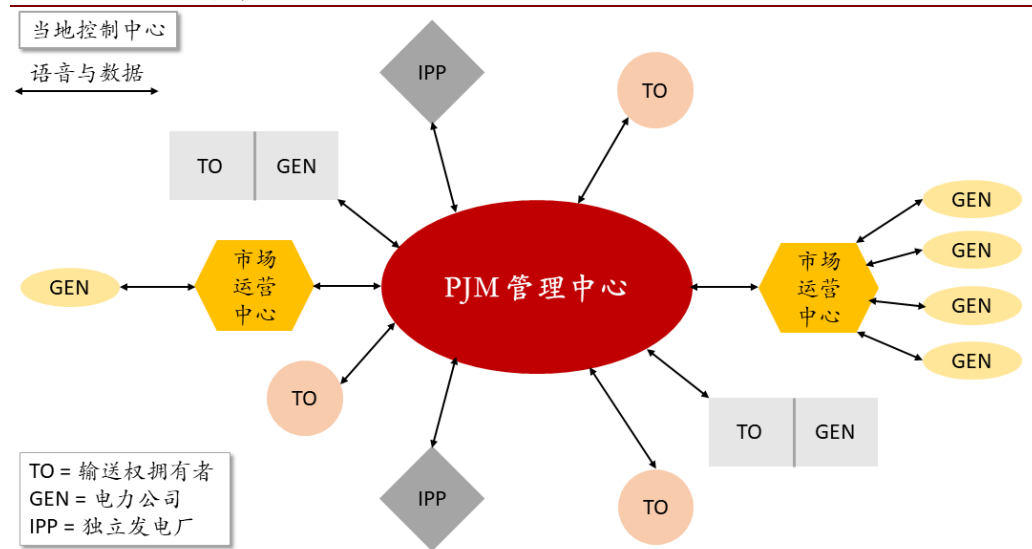
资料来源：公开资料整理、招商期货

美国的区域发电结构展现出显著的地域差异性，主要受地理位置的影响。以光伏发电为例，各州的装机发展与当地的光照条件紧密相关。加利福尼亚州、得克萨斯州和佛罗里达州因其优越的光照条件，在光伏装机方面表现突出。根据美国能源信息署（EIA）的数据，预计到 2024 年，美国光伏装机容量将增长 36.4GW，其中得克萨斯州、加利福尼亚州和佛罗里达州将贡献约一半的增长。接下来，我们将深入分析美国四个具有独特特点的电力市场。

（一）PJM：美国最大的电力市场，面临能源转型挑战

宾夕法尼亚-新泽西-马里兰联合系统运营商（PJM）作为北美最大的电力市场，服务范围覆盖 13 个州及哥伦比亚特区，其经济产出占到美国 GDP 的 19%。作为区域输电组织（RTO），PJM 负责管理和协调 PJM 地区的高压输电线路，确保电力流动的顺畅和系统的可靠性。PJM 通过控制室实时监控电网状态，防止拥堵和紧急情况，类似于机场的空中交通管制。该组织是非营利性的，旨在提供无歧视的电网接入，促进批发电力市场中卖家和买家之间的高效、公平交易，确保电力价格反映供需关系。

图 33: PJM 的操作权限



资料来源: PJM、招商期货

表 8: PJM 的职能与限制

职能	限制
无视所有权的变更, 维护传输系统的整体运营	不持有任何输电或发电资产
依据协议控制传输系统的操作	不以上市公司形式运营
坚持非营利运作模式, 以利润中性方式运营	不直接控制或拥有任何系统内的能源
在操作决策中保持所有 PJM 成员的完全独立	服务对象是市场参与者, 如发电公司和批发购电方, 而不直接面向零售客户提供电力服务
负责协调发电和输电系统的维护工作	不负责任何实际的发电机或输电设施的维护工作

资料来源: PJM、招商期货

PJM 还运营日常的批发电力市场, 并根据利益相关者的意见和美国联邦能源监管委员会 (FERC) 的裁决制定市场规则, 同时接受 FERC 的监管。

表 9: PJM 的运营市场和服务

市场	服务
能源市场	日前市场: 允许参与者在实际交付日前一天进行电力交易 实时市场: 处理电力的即时交易, 以应对预测偏差和系统需求的即时变化 确保区域内足够的发电能力以满足未来的电力需求
可靠性定价模型 (RPM) 拍卖	FTR 拍卖允许市场参与者通过金融工具对冲未来输电路径上的拥堵成本, 保护他们免受价格波动的影响
金融输电权 (FTR) 拍卖	监管市场: 确保电力系统能迅速响应需求变化
辅助服务市场	同步储备市场: 在突发事件导致电力供应中断时提供备用资源 黑启动服务: 在全面电力中断后恢复电网服务的能力 反应性服务: 管理电力系统的电压和稳定性

资料来源: PJM、招商期货

PJM 还具有促进需求侧响应 (Demand Response, DR) 的重要功能。需求侧响应是电力系统管理中的一种关键策略, 旨在通过调节消费者的电力需求来增强电网的稳定性和效率。这种策略通过激励或其他手段促使用户在电力需求高峰时段减少用电, 帮助平衡电网负荷, 防止过载, 并减少对昂贵的备用发电资源的依赖。

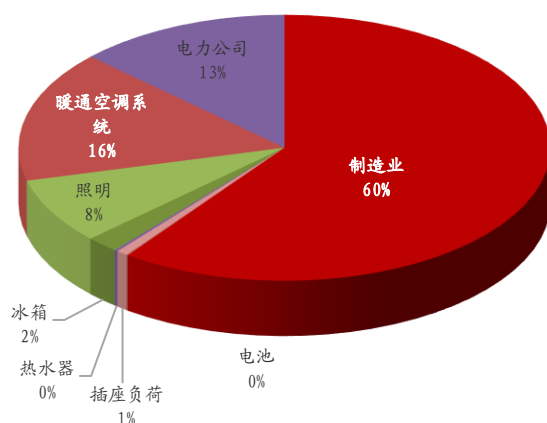
图 34: 美国 PJM 需求侧响应历史



资料来源: 公开资料整理、招商期货

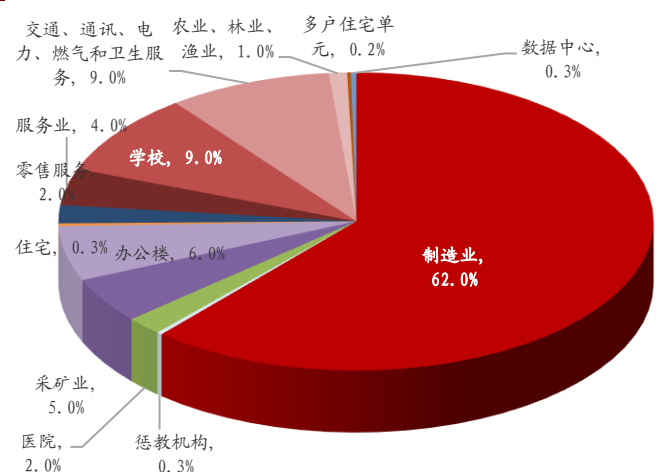
需求响应措施通常涉及在电力成本上升时, 采取的一系列负荷削减行动。具体实例包括调整空调温度设定以降低制冷需求、工业企业临时减产或停产、以及商业和住宅用户减少照明使用。在用户分类上, 工业用户占参与主体的一半, 其次是教育机构、商业建筑和住宅用户, 他们通过灵活调整用电模式, 共同促进电网的平衡与效率。

图 35: DR 注册客户负荷减少方法



资料来源: PJM、招商期货

图 36: DR 注册业务板块



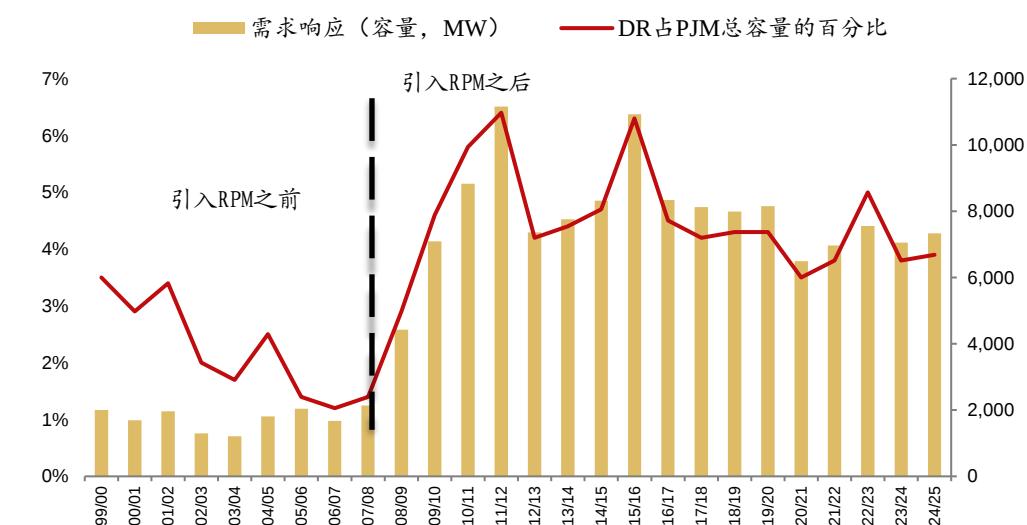
资料来源: PJM、招商期货

在 PJM 地区, 需求侧响应通过以下市场机制实现:

- **日前和实时市场激励:** PJM 通过经济激励鼓励用户在电力需求高峰时段减少用电。用户通过减少负荷获得的节约, 按照当时的日前电价和实时电价获得收益。
- **提供辅助服务:** 经济需求响应资源可以通过 PJM 的资格认证向批发市场提供辅助服务。这些资源可以参与三个主要的辅助服务市场: 同步储备 (在 PJM 调度后 10 分钟内减少电力消耗)、日前调度储备 (在 PJM 调度后 30 分钟内减少电力消耗), 以及调节服务 (遵循 PJM 的调节和频率响应信号)。
- **可靠性定价模型 (RPM) 拍卖支持:** PJM 运营的可靠性定价模型 (RPM) 拍卖通过奖励承诺在电网压力时刻减少用电的消费者和企业, 确保区域内有足够的发电能力以满足未来电力需求。据 2023 年数据, 需求响应资源的大部分收入来源于基于 RPM 的容量市场。在该市场中, 需求响应通常占到年度容量资源的 5%, 年收入超

过 5 亿美元。

图 37: PJM 容量市场中承诺的需求响应容量



资料来源: PJM、招商期货

在 PJM 市场中, 用户参与需求响应需通过与削减服务提供商 (Curtailment Service Provider, CSP) 建立代理关系。CSP 主要负责提供所需的技术支持和系统支持, 帮助实施需求响应策略。

CSP 的角色包括聚合多个用户的需求响应资源, 然后在 PJM 市场上进行竞价。成功获得收益后, CSP 将与用户分享这些收益。CSP 可能是专门提供需求响应服务的公司, 也可能是 LSE 或配电公司 (Electric Distribution Companies, EDCs)。

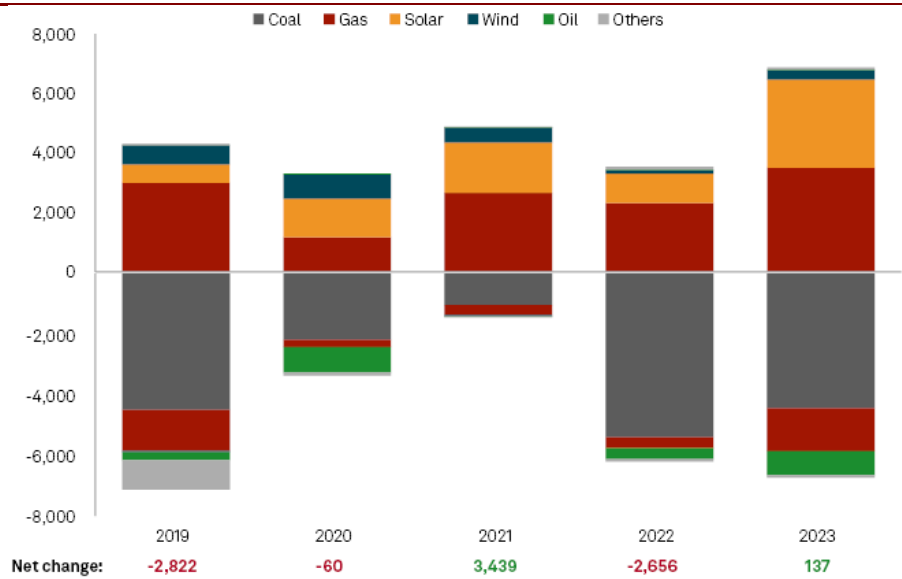
表 10: DR 注册所有者/公司类型

类型	23/24 交割年	24/25 交割年
CSP	91%	98%
CSP、EDC、LSE	4%	1%
CSP、LSE	5.5%	1%

资料来源: PJM、招商期货

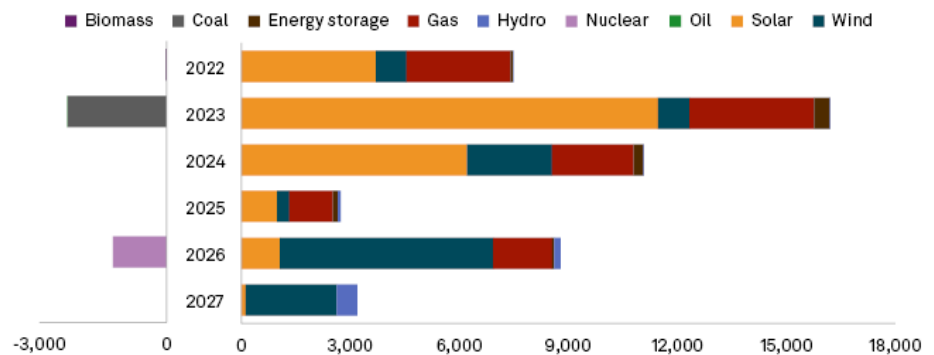
从发电燃料构成来看, 相较于 2022 年, 煤炭发电量显著下降 27.9%, 与此同时, 天然气发电增长 8.4%。同时, 石油发电量略有下降 (0.8%), 风能发电也出现 8.1% 的减少, 太阳能发电实现 20.1% 的增长。面对传统发电机组逐渐退役、不断攀升的电力需求, 以及可再生能源与化石燃料发电机组之间的结构性差异, PJM 正积极研究如何在这场能源变革中保障电网的稳定性与可靠性。

图 38: PJM 分燃料历史容量变化 (MW)



资料来源: S&P Global Market Intelligence、招商期货

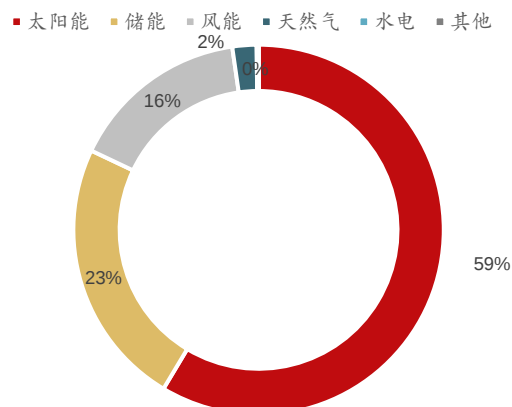
图 39: 计划中的 PJM 容量变化 (MW)



资料来源: S&P Global Market Intelligence、招商期货

一方面, PJM 已经实施一项新的发电机互连程序, 旨在加速新电源的接入效率。PJM 到 2025 年中期处理的目标为约 72,000MW 的并网请求, 并计划在未来三年内完成约 230,000MW 的并网工作。其中, 超过 90% 的项目集中在可再生能源和储能领域。PJM 正考虑与各利益相关方合作, 以推动更多创新改革方案的实施。

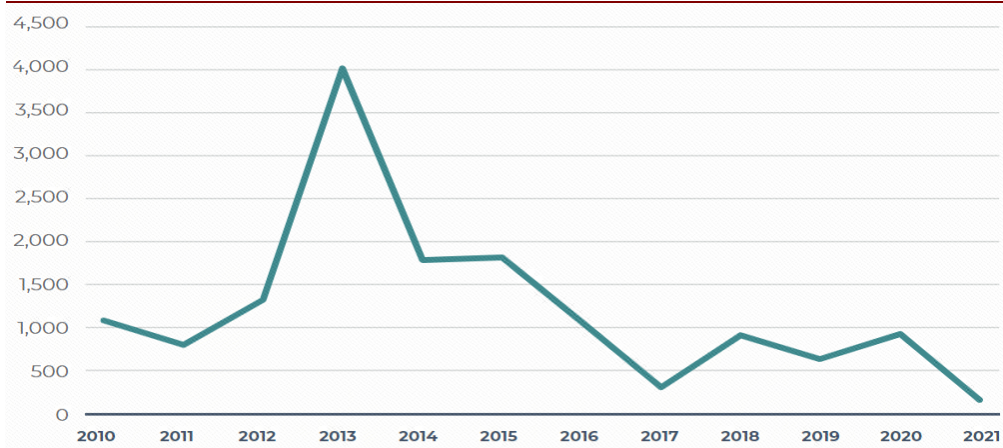
图 40: 按燃料类型划分的 PJM 排队容量



资料来源: PJM、招商期货

另一方面，为确保 PJM 地区电力供应的可靠性与经济性，积极的输电规划发挥着至关重要的作用。尽管近年来 PJM 在高压输电投资方面呈现下降趋势，与其他电网区域相比存在差距，但在 2023 年，PJM 启动长期区域输电规划（LTRTP）的一系列研讨会，旨在优化其输电规划流程。此举预示着未来可能将更多资金投向高电压、长距离输电线路的建设，以支持该地区的能源转型需求。

图 41: PJM 互连区域每年新增高压（345 kV+）输电线路里程

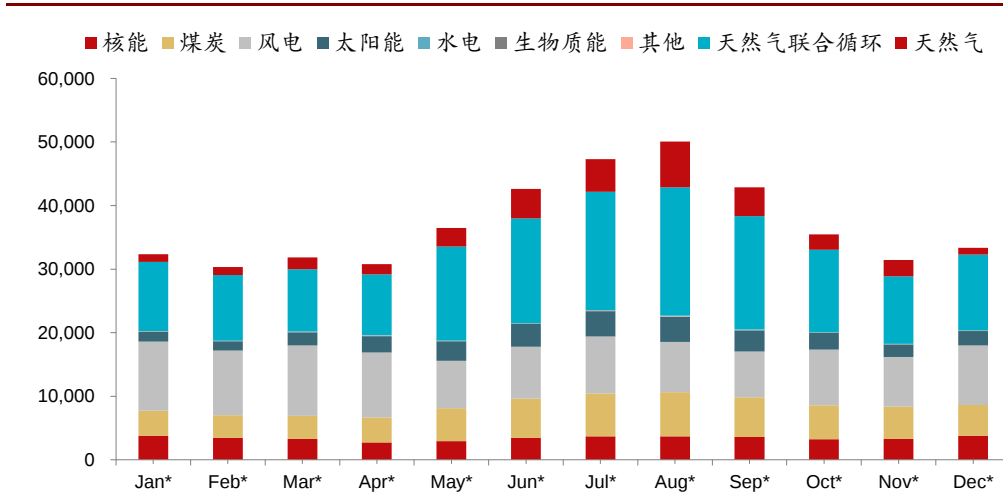


资料来源：Americans for a Clean Energy Grid、招商期货

（二）ERCOT：独立运行的电力市场，太阳能装机速度超过风能

德克萨斯电力可靠性委员会覆盖德克萨斯州的大部分地区，它负责大约 90% 的德州电力需求，服务面积包括超过 2600 万用户和超过 10 万英里的传输线路。

图 42: 2023 分燃料得克萨斯州发电情况（GWh）



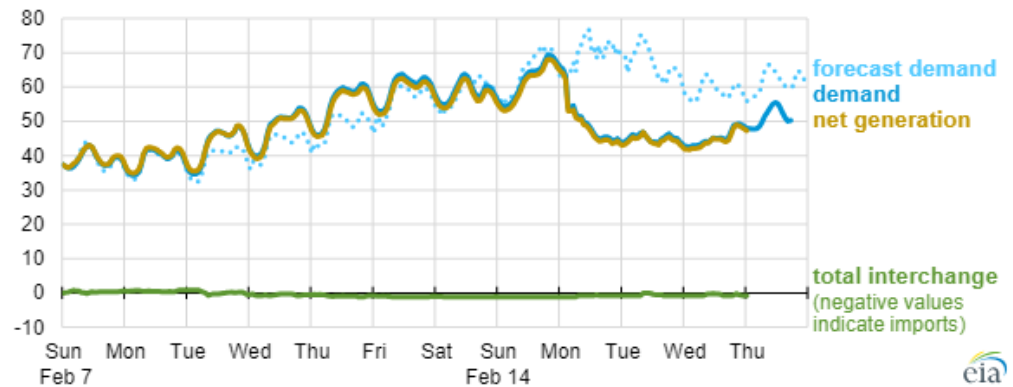
资料来源：ERCOT、招商期货

ERCOT 管理的德州电网与美国其他地区电网的连接有限，这种相对独立性要求德州必须主要依靠自身的电力资源来满足其居民的电力需求。然而，这种独立性在面对极端天气事件时表现出其复杂性，尤其是在 2021 年 2 月发生的冬季风暴期间，它对德州电网的运营构成重大挑战。

2021 年 2 月，德克萨斯州遭遇三十年一遇的严寒天气，连续六天的气温远低于常态。

这场极端寒冷导致冬季电力需求的空前激增，而天然气供应的紧张和防风措施的不足又进一步限制电力的供应。特别是在 2 月 14 日至 15 日的夜间，供需失衡导致频率下降，ERCOT 为避免全面停电，不得不实施客户负荷削减措施。此外，约 29,000 名选择浮动电价的居民用户面临由批发市场价格飙升带来的极端电费波动，对这些用户造成严重的财务冲击。

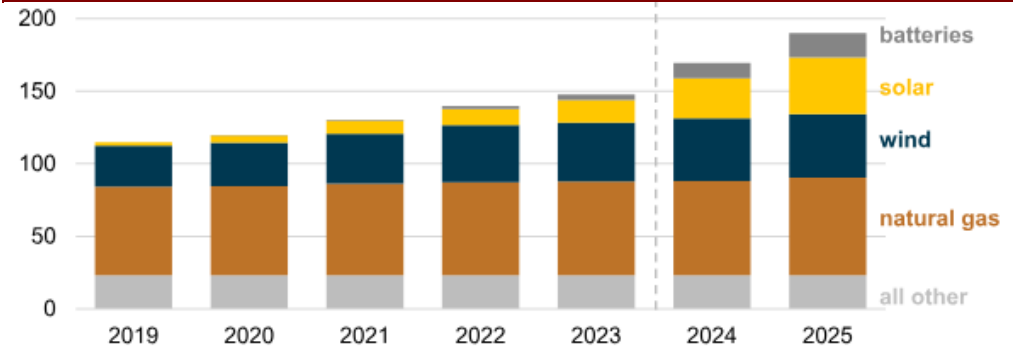
图 43: 2021 年 2 月 7 号-18 号 Texas 电力需求、生产情况 (GW)



资料来源: EIA、招商期货

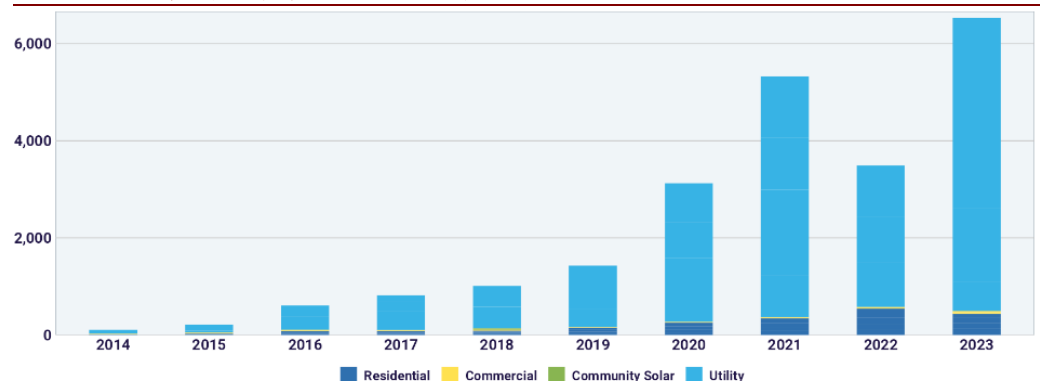
德克萨斯州能源电力结构在 2023 年发生显著变化。尽管风电仍然是该州最大的可再生能源，但新风力涡轮机容量的安装 2023 年增速放缓，太阳能发电的新增容量则迅速增长。截至 2023 年，太阳能装机容量已达约 16GW。开发商计划在 2024 和 2025 年进一步向电网增加约 24GW 的太阳能发电容量，而风电的新增容量预计仅为 3GW。相较之下，天然气发电容量的增长预计在未来两年内仅为 3GW。

图 44: 得克萨斯州每年电力容量 (GW)



资料来源: EIA、招商期货

图 45: 得克萨斯州每年太阳能装机情况 (MW)

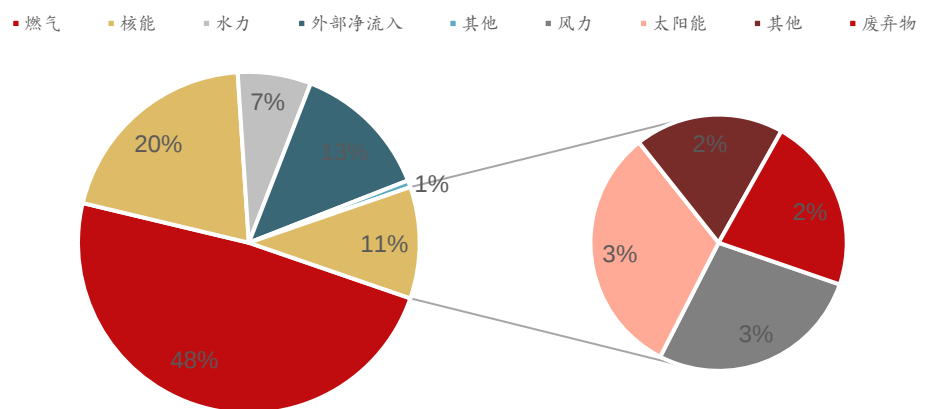


资料来源：SEIA、招商期货

（三）ISO-NE：高度依赖天然气发电，增长的可再生能源投资

新英格兰独立系统运营商管理着近 400 台可调度发电机，这些发电机的总发电能力大约为 30,700MW。新英格兰地区位于美国东北部，毗邻加拿大边境。截至 2023 年，该地区的电力供应 48% 来源于天然气，20% 来自于核能。值得注意的是，由于运营成本、燃料价格和环境合规要求的增加，导致老旧的燃煤、燃油和核电站逐渐被淘汰。事实上，自 2013 年以来，已有超过 7,000MW 的发电能力（主要是来自煤炭、石油和核能的发电厂）被退役，或已计划在未来几年内退役。

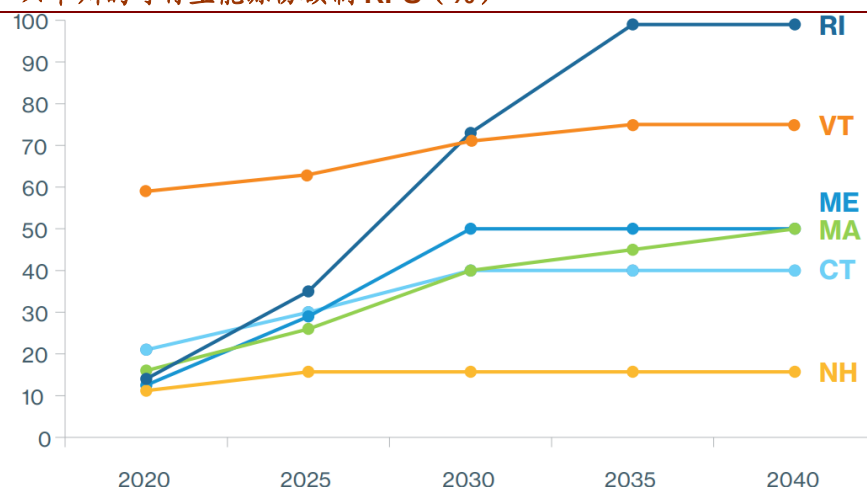
图 46：2023 新英格兰地区发电量结构



资料来源：ISO-NE、招商期货

此外，新英格兰六个州均实施可再生能源组合标准政策，要求电力供应商逐渐增加向消费者提供的可再生能源比例。目前，该地区大约 97% 的新增资源为电网规模的风能、太阳能和电池储能项目。截至 2024 年 1 月，ISO-NE 的并网互连请求队列中已有约 40,000MW 的提案，其中风能占 44%，储能占 46%，太阳能占 10%。

图 47：六个州的可再生能源份额制 RPS (%)

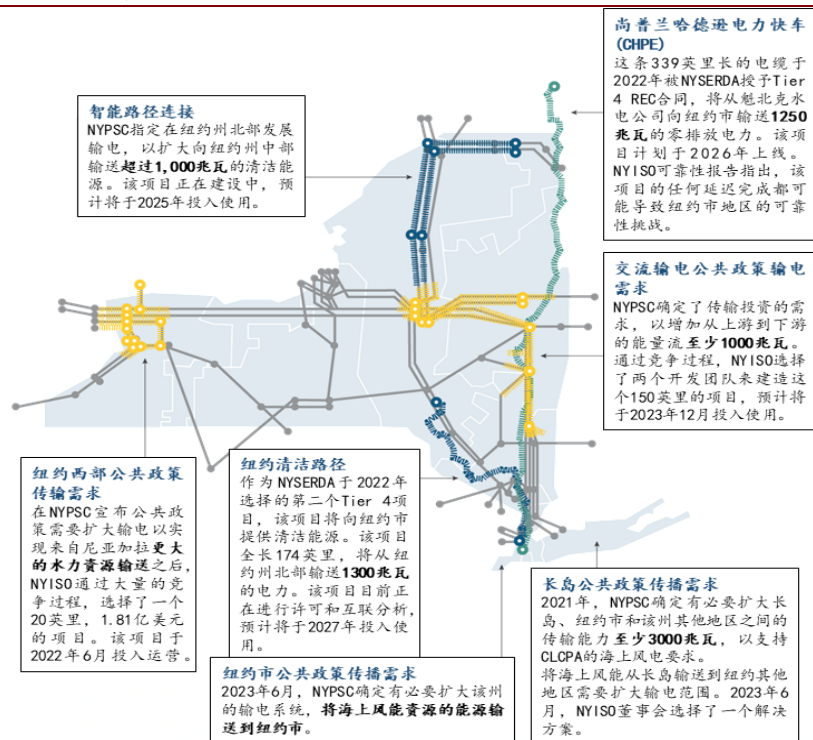


资料来源：ISO-NE、招商期货

（四）NYISO：大城市负荷中心，面临传输硬件条件的挑战

纽约独立系统运营商负责确保大约 2000 万纽约州居民及众多企业的电力供应。NYISO 面临的一个重要运营挑战是位于州东南部的长期传输约束，这些约束区域是通往纽约市和长岛的关键电力传输路径。鉴于这些区域的高人口密度，它们是州内最大的电力消费区。因此，能源需从西部和北部流向这两个主要市场，导致输电设施运行接近其极限。这一状况导致几个关键区域的输电瓶颈，通常会引起纽约市和长岛市场电价上涨。

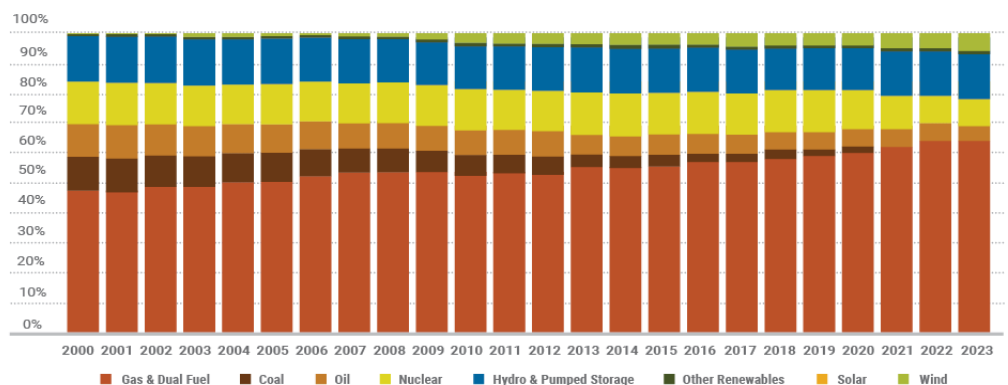
图 48：纽约州新输电项目



资料来源：NYISO、招商期货

纽约州在可再生能源方面特别重视水力发电和风能的开发与利用，其中，水力发电作为州内一项重要的可再生能源资源，特别是利用尼亚加拉大瀑布和圣劳伦斯河地区的大型水电站。近年来，随着对可持续能源及减少温室气体排放重视程度的提升，风能和太阳能在发电组合中的占比逐步增加。

图 49：2000-2023 年纽约州发电能源历史



资料来源：NYISO、招商期货

四、美国电力市场交易机制及电价变化

（一）以 PJM 为例的电力交易机制

1. 两级结算机制

在电网运行实践中，调度机构需要提前一天制定次日的发电计划，涵盖负荷预测、机组的启动与停机、发电功率安排、联络线使用等多个方面。这样预先规划旨在增强电网运行的可预测性，从而减轻实时调度的负担。在实际运行阶段，调度员主要聚焦于处理因各种原因产生的发电与负荷之间的不平衡问题。

PJM 市场深入借鉴这些运行经验，建立日前市场和实时市场这两个互补的交易平台，实行所谓的双层结算机制。这两个市场分别进行电力出清和财务结算。无论是日前市场还是实时市场，所使用的电价均为节点边际电价 (Locational Marginal Pricing introduction, LMP)，该价格模型包括能量成本、阻塞费用和网络损耗费用三个组成部分。

2. 节点边际电价

在非垄断的电力市场中，市场参与者根据实时价格，自由地选择发电、用电或储能的充放电操作。实时价格对于这些决策至关重要，不仅影响短期行为，也对长期运营和投资策略产生深远影响。从经济学理论到市场实践，实时节点边际电价已被证实是支持高效电力批发市场的关键定价机制。LMP 在高压输电系统的各节点实时设定电价，为竞争性批发电力市场交易提供坚实基础，并展现以下特点：

- **市场效率与可靠性：**LMP 精确反映电网供需变化，支持实时价格的灵活响应。
- **网络阻塞管理：**通过体现网络阻塞的程度，为阻塞管理提供激励机制。
- **发电容量价值：**即使未被调度，发电容量也因其潜在备用价值而得到市场的充分认可。
- **成本反映：**综合考虑发电及负荷损失的成本。
- **反馈与指导：**合同市场中的合约价格反映对未来市场实时价格的预期。

LMP 的计算考虑以下三个主要因素：

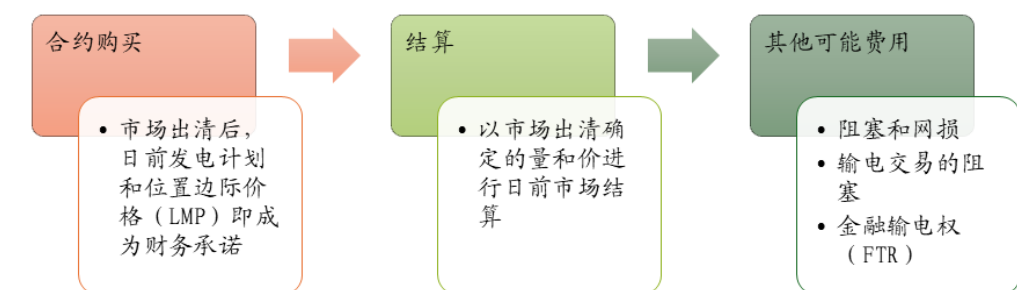
- **发电成本：**电力生产者的成本。
- **阻塞成本：**由于传输系统的限制，批发客户需支付的额外服务成本，以获取非最低成本的电力。
- **输电损失成本：**在电力输送过程中发生的损失成本。

实时 LMP 是基于每 5 分钟或每小时的实际电力流动进行计算的，而日前市场的 LMP 则在交易日前一天根据预测的需求和发电计划确定。这样的定价机制确保电力市场的高效运作与透明度，促进能源资源的合理配置和电网的稳定运行。

3.日前和实时市场结算流程

在日前市场中，电力交易参与者（包括发电公司、分销商和大型用户）会根据对次日电力需求和价格的预测提交他们的买卖报价。PJM 使用这些报价来进行市场出清，确定每个节点的日前电价。参与者必须按照出清结果确定的价格和电量进行结算。日前市场的结算包括基于预测的电量需求和供应以及相关的输电约束。结算涉及电力的实际购买、阻塞费用和网损费用。

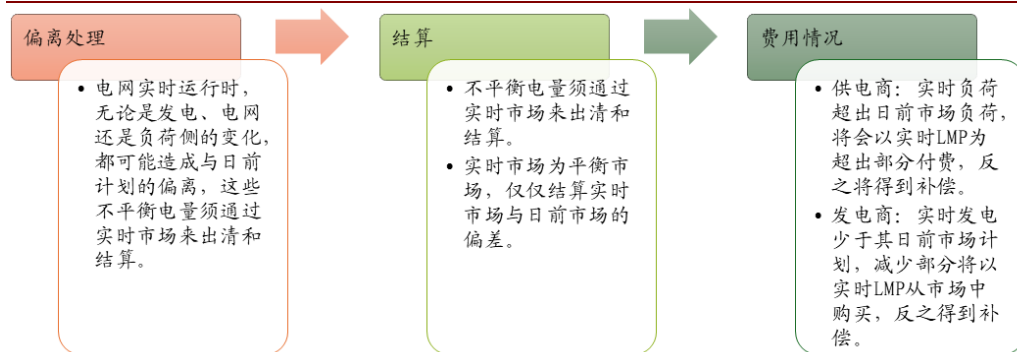
图 50: PJM 日前电力市场交易流程图



资料来源：公开资料整理、招商期货

实时市场操作发生在电力实际使用的当天，以满足未被日前市场预测到的需求或弥补预测失误。电力参与者可以根据实际情况调整他们的报价或直接在实时市场购买所需电量。

图 51: PJM 实时电力市场交易流程图



资料来源：公开资料整理、招商期货

（二）区域特色和多元要素共同构建电力供应价格结构

在美国解除管制的能源服务领域，各地区的电力供应定价结构展现出独特的区域特色，具体取决于发电厂和燃料的可用性、当地燃料成本和定价法规。

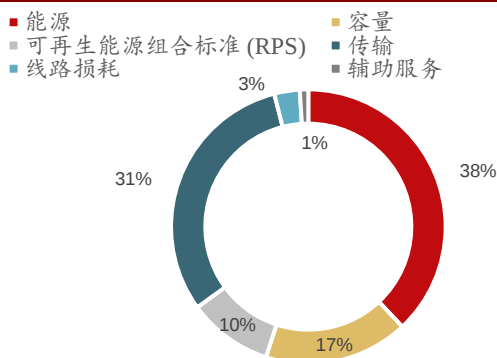
表 11: ISO-NE 区域的电价组成部分占比

电价组成	占比
能源	42%-56%
容量	27%-38%
RPS	2%-21%

电价组成	占比
线路损耗	2%-3%
辅助服务	4%-6%

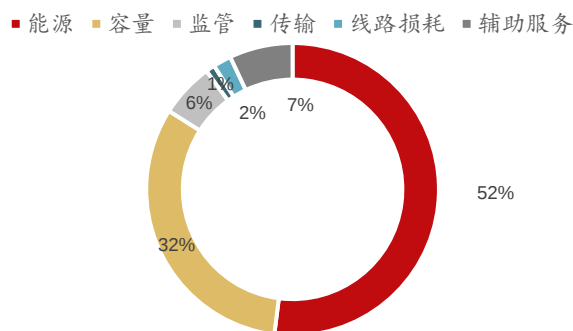
资料来源：Best practice energy、招商期货

图 52: PJM 互连区域的电价组成部分占比



资料来源：Best practice energy、招商期货

图 53: 纽约地区的电价组成部分占比



资料来源：Best practice energy、招商期货

以下是构成电力价格的关键要素：

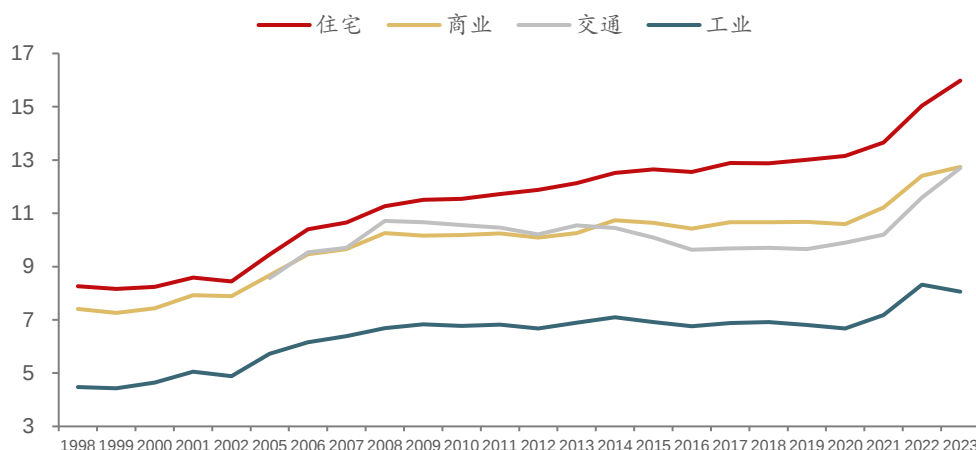
- **能源成分：**代表实际供应给建筑物的电力商品的成本，涵盖发电厂、发电机和可再生能源等多种能源生产方式。这一部分构成电力价格的主要份额，其成本与用户的千瓦时消耗量密切相关。
- **容量成分：**反映维持设施运行所需的最大电力分配量。每座建筑物及电网本身均有其容量需求，以确保稳定运行。电网在高峰时段若缺乏足够的发电量，可能引发限电、停电等供电中断。
- **可再生能源组合标准 (RPS)：**规定电力供应中必须来自可再生能源的比例。随着美国对可再生能源使用的增加，RPS 的成本和比重预计将上升，其费用受各州的监管和立法环境影响。例如，新泽西州的新立法规定 RPS 目标将在 2025 年达到 35%，并在 2030 年提升至 50%。
- **传输成分：**涉及输电解决方案的相关费用。以 PJM 互连区域为例，传输成本包括网络集成传输服务和传输增强费用两大主要部分。
- **线路损耗成分：**虽然在电价中所占比例较小，但代表在电网运输和传输过程中的能量损失。这些损失发生在电力从发电点通过变压器和高压输电线传输至建筑物的过程中，主要是由于散热造成。
- **辅助服务成分：**旨在支持传输系统的平衡，确保电力从发电点顺利输送至最终用户。尽管辅助服务在电价中占比不大，但对于电网的稳定运行，尤其是在需求高峰或紧急情况下，其作用至关重要。例如，纽约地区提供的辅助服务包括频率调节、电压支持和黑启动等关键功能。

（三）美国电价历史回顾：能源成本波动主导

在电力市场中，温度变化、经济演进、燃料组合转变、能源成本波动，以及国际形势动荡等因素，均在塑造着电力需求和供应方面的变化，成为价格波动的关键驱动力。

2002 年至 2008 年期间，美国经历电力零售价格的显著上涨，其中 2004 年标志着一个显著转折点。当时，石油输出国组织（OPEC）减产导致全球石油供应紧缩，使得石油价格上涨，而石油是电力生产的重要燃料之一，其成本上升直接反映在电力价格上。同时，美国电力需求增长也对电价上涨起到推动作用。

图 54：1998 年至 2023 年美国电力平均零售价格（分/千瓦时）



资料来源：statista、招商期货

2013 年和 2014 年，电价因积极推进的公用事业资本支出计划而上升，这些计划着眼于提升系统可靠性、改进老旧基础设施、优化需求侧管理、增强节能措施、扩展可再生能源使用以及解决环境问题。然而，在 2015 年和 2016 年，由于燃料费用的进一步下降以及监管机构降低电力公司的允许回报率，导致电价水平下降。

2021 年，美国零售电价经历了自 2008 年以来的最快增速，这一现象可归因于两个因素的叠加效应：

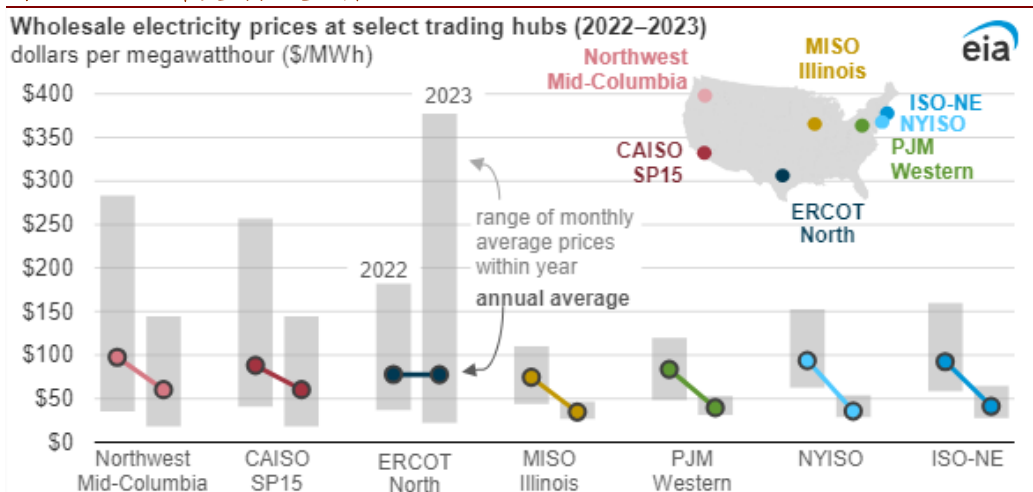
- 该年度能源商品价格普遍大幅上涨，尤其是作为发电关键燃料的天然气，其成本显著增加。2021 年天然气的平均成本达到 4.98 美元/MMBtu，较 2020 年的 2.32 美元/MMBtu 高出一倍多。
- 恶劣天气事件，尤其是德克萨斯州的极端冬季风暴，严重冲击能源供应，导致包括天然气和风能在内的发电资源受限，在美国中部地区引发批发电力市场价格的飙升。最终，这些市场动态反映到零售层面，致使部分客户的电力零售价格随之上涨。

22 年后电价快速上涨的主要原因有两个方面：

- Covid-19 封锁期间全球供应链的混乱，导致能源市场的紧张局势，影响电力供应和需求之间的平衡。
- 俄罗斯乌克兰战争的爆发颠覆全球能源生态系统，引发对石油和天然气等关键能源资源的市场恐慌，导致能源价格的飙升。

美国 48 个本土州的主要电力交易中心在 2023 年普遍迎来平均批发电价的下降。这一价格下降的主要驱动力可归因于天然气价格的回落、年初的温和气候、多地区平均电力需求的降低，以及加利福尼亚州和西南部水力发电状况的显著好转。

图 55: 2023 年美国批发电价



资料来源：EIA、招商期货

美国能源情报署（EIA）预测，由于发电燃料成本保持稳定，2024 年全国范围内的平均批发电价将与 2023 年持平或略有下降。尽管如此，需求高峰或供应紧张时段可能引发批发价格的短期上涨。在零售层面，2024 年的电价预计将微降至平均 0.1573 美元/kWh，随后在 2025 年回升至 0.1611 美元/kWh，但会有地区差异。

图 56: 2024 年美国批发电价预测



资料来源：EIA、招商期货

研究员简介

颜正野：研究主管，负责招商期货新能源与 ESG 产业研究。金融硕士，工科金融复合教育、从业背景，曾就职于比亚迪汽车工艺总部、五矿期货研究所、云锋金融（YFF）研究与策略部。拥有 5 年新能源产业链研究、7 年商品与股票市场投研从业、多年证券交易经验，擅长以买方视角，结合宏观趋势与微观边际变化，构建多资产组合对冲策略。具有期货从业资格（证书编号：F03105377）及投资咨询资格（证书编号：Z0018271）。

重要声明

本报告由招商期货有限公司（以下简称“本公司”）编制，本公司具有中国证监会许可的期货投资咨询业务资格（证监许可【2011】1291 号）。《证券期货投资者适当性管理办法》于 2017 年 7 月 1 日起正式实施，本报告发布的观点和信息仅供经招商期货有限公司评估风险承受能力为 C3 及 C3 以上类别的投资者参考。若您的风险承受能力不满足上述条件，请取消订阅、接收或使用本研报中的任何信息。请您审慎考察金融产品或服务的风险及特征，根据自身的风险承受能力自行作出投资决定并自主承担投资风险。

本报告基于合法取得的信息，但招商期货对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述品种买卖的出价或对任何人的投资建议，招商期货不会因接收人收到此报告而视他们为其客户。投资者据此作出的任何投资决策与本公司、本公司员工无关。

市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告作为投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可取代自己的判断。除法律或规则规定必须承担的责任外，招商期货及其员工不对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失负任何责任。

本报告版权归招商期货所有，未经招商期货事先书面许可，任何机构和个人均不得以任何形式翻版、复制、引用或转载。