





新型电力系统之“碳路”

康重庆 教授

清华大学电机系 主任
清华大学能源互联网研究院 院长

2022年5月

“碳达峰碳中和”纳入国家发展战略

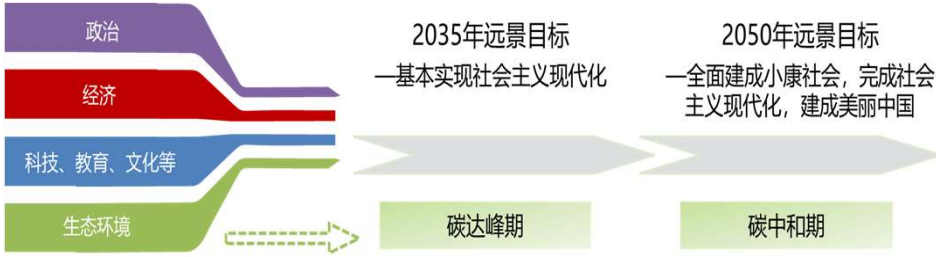


• 2030前**碳达峰**
• 2060前**碳中和**

30-60
双碳目标

2020年9月，习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话

“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”



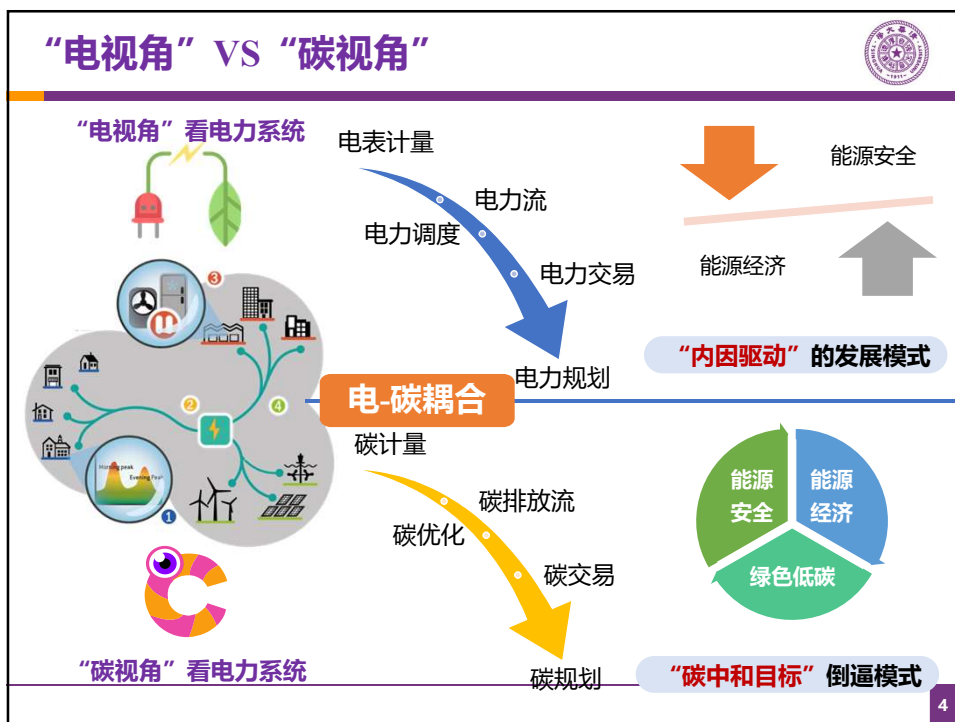
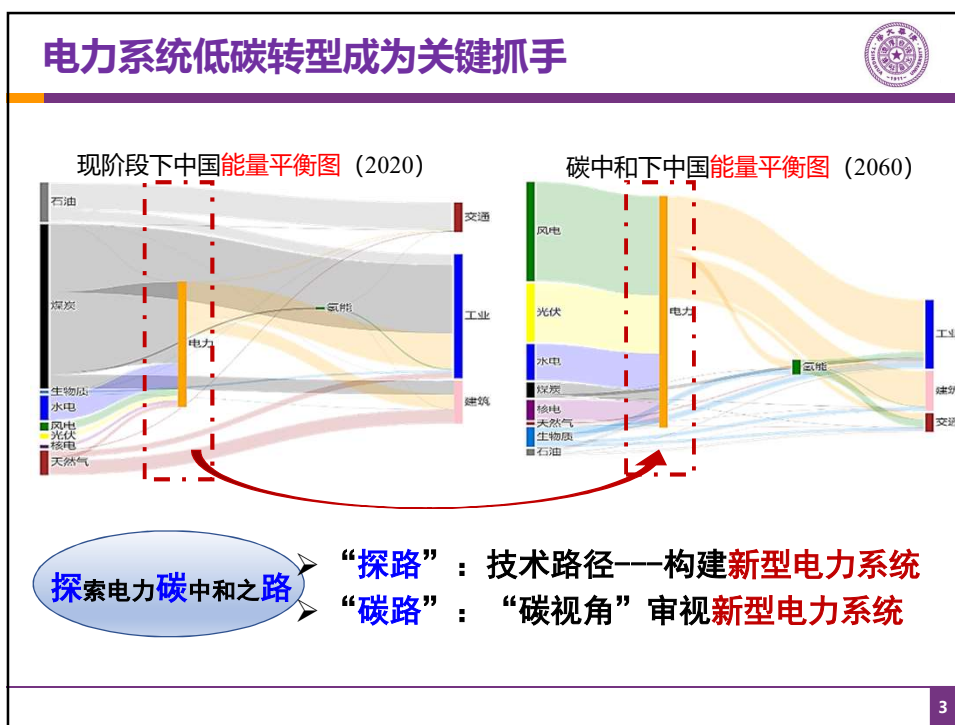
政治
经济
科技、教育、文化等
生态环境

2035年远景目标
—基本实现社会主义现代化

2050年远景目标
—全面建成小康社会，完成社会主义现代化，建成美丽中国

碳达峰期
碳中和期

2



碳视角

从“碳视角”出发，审视**电力系统的碳计量技术与规划、运行、交易方法**

电力系统低碳化的“电-碳耦合”关键基础问题

碳计量



规划



运行



交易



目标：为电力行业低碳化的理论、方法、机制以及政策的研究，为我国电力行业双碳转型的研究与实践提供理论依据与模型方法。


碳计量与碳追踪
碳规划与碳轨迹
碳调度与碳优化
碳市场与碳交易

5

碳计量与碳追踪

1

碳计量与碳追踪




中央成立碳达峰碳中和工作领导小组

✓ **设立碳排放统计核算工作组** 2021年8月
负责组织协调全国及各地区、各行业碳排放统计核算等工作

“统筹做好碳排放统计核算工作，加快建设统一规范的碳排放统计核算体系。”

——碳排放统计核算小组




国务院关于印发计量发展规划（2021—2035年）的通知 2021年12月

完善温室气体排放计量监测体系，加强碳排放关键计量测试技术研究和应用，健全碳计量标准装置。

“开展多行业典型用能设施及用能系统碳排放计量测试方法研究和碳排放基准数据库建设。”

——计量发展规划（2021—2035年）



6

碳计量与碳追踪

联合国气候变化框架公约 “三可原则”



可测量



可报告



可核实

碳核算

当前碳排放核算方法的时间分辨率、空间分辨率不够；
高比例新能源接入背景下，电力系统碳核算的时空分辨率需要进一步提升
——能够**体现碳排放因子时空差异性的电力系统全环节碳核算方法**

□ 碳排放因子的时间差异性

背景：随着新能源电量占比的提升，不同时段清洁能源电量占比差异显著，碳排放因子的“峰谷差”会越来越明显。



体现时间差异性

优势：
电力用户：通过调节用电时序进行碳减排，
引导**用户低碳需求响应**
电力系统：提升新能源消纳，全社会减碳

□ 碳排放因子的空间差异性

背景：不同地市分布式清洁能源装机水平差异性的增大，会导致省内不同区域碳排放因子的空间差异性变化。



体现空间差异性

优势：
电力用户：引导电力企业“低碳选址”
电力系统：提升新能源就地消纳率

7

碳计量与碳追踪

□ 电力系统碳排放流：
依附于电力潮流存在且随系统潮流定向移动的耦合碳排放，是电力系统中一类**虚拟**的网络流。

电能生产、流动、消费 $\xleftrightarrow{\text{耦合}}$ 碳排放责任转移、分摊



全环节碳排放核算与分析



电力系统碳排放流理论

8

4

电力系统碳排放流



• 基本概念汇总

名称	量纲	物理意义	潮流分析中的对应指标	适用范围
碳流量	kgCO ₂	一定时间内系统为维持有功潮流而在发电厂产生的碳排放累积量	支路传输电量	交/直流潮流
支路/节点碳流率	kgCO ₂ /s	单位时间内系统为维持有功潮流而在发电厂产生的碳排放量	支路有功功率	交/直流潮流
网损碳流率	kgCO ₂ /s	支路中单位时间内因有功损耗造成发电环节的碳排放量	有功网损	交流潮流
支路碳流密度	kgCO ₂ /kWh	支路中单位时间内随单位有功潮流通过的碳流量	\	交/直流潮流
节点碳势	kgCO ₂ /kWh	在节点处消费单位电量对应发电环节的碳排放量	\	交/直流潮流
机组碳势	kgCO ₂ /kWh	机组生产单位电量的碳排放量	\	交/直流潮流

9

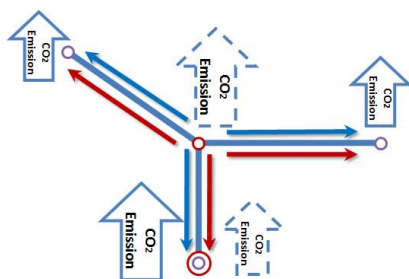
电力系统碳排放流



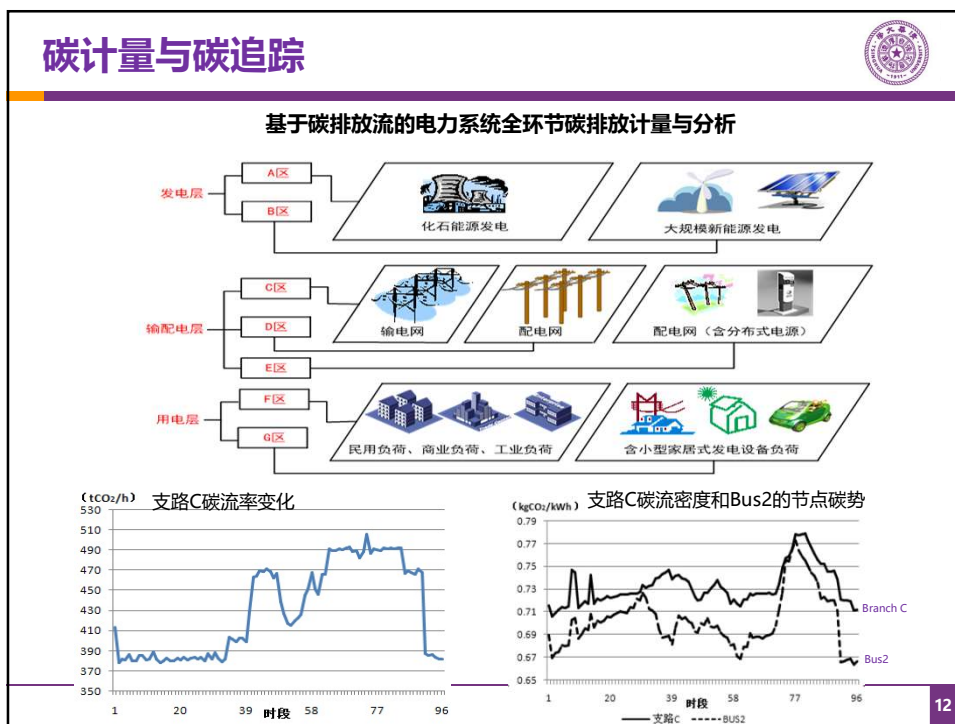
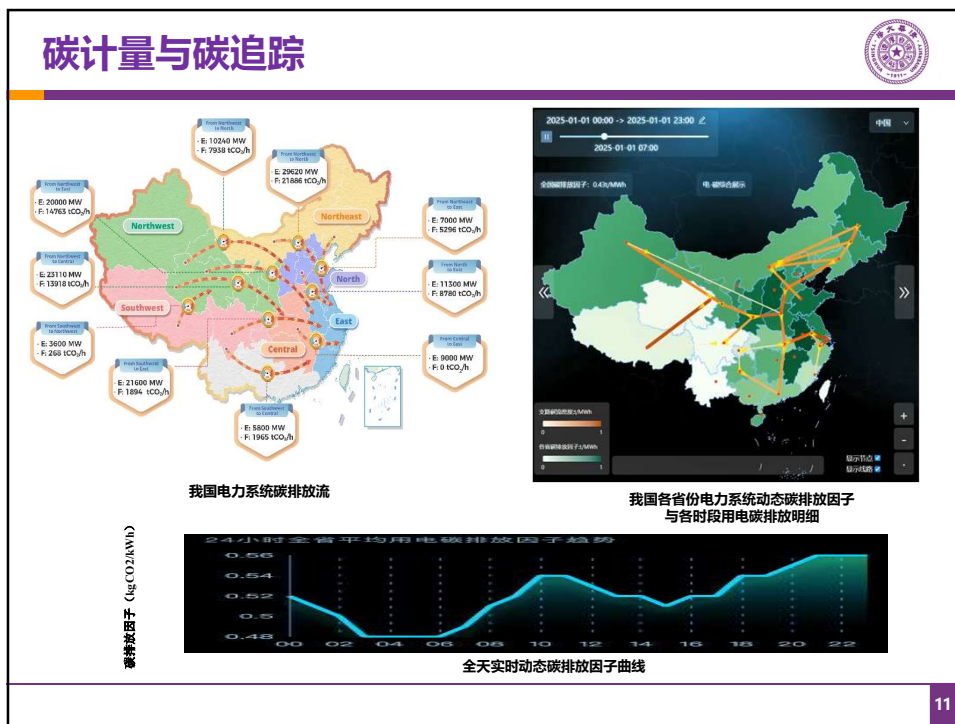
• 碳排放流的计算

(假定系统具有 N 个节点、 K 个机组, M 个节点存在负荷)

- 支路潮流分布矩阵
- 机组注入分布矩阵
- 负荷分布矩阵
- 节点有功通量矩阵
- 发电机碳排放强度向量
- 节点碳势向量
- 支路碳流率分布矩阵
- 负荷碳流率向量



10



碳计量与碳追踪

清华大学与国网江苏省电力有限公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌

发布时间：2022-04-26 浏览次数：256 次

2022年4月21日下午，清华大学、清华四川能源互联网研究院与国网江苏省电力有限公司联合发布了全国首个电力系统碳排放流分析平台，并推出了全国首个碳服务品牌“eCarbon+”。

清华大学与江苏省电力公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌

- 实时碳追踪模块基于江苏电网实时运行数据，汇聚电网全域量测数据，依托数据中台强大算力，支撑电网实时电碳测算和碳流追踪分析，实现了江苏电网全环节碳排放的实时在线计算与分析，并且计算碳排放在不同时段和不同地区的流动与分布情况
- 综合碳分析模块基于碳排放流计算结果，分析源网荷多维度碳排放强度与累积排放信息

13

碳计量与碳追踪

碳表系统

对电力系统全环节碳排放进行连续、准确的实时追踪与监测

碳表系统的构成情况

碳表系统的实现架构

碳表系统组成：

- 源侧碳表 Generation Carbon Meter (GCM) :实时监测发电碳排放;
- 网侧碳表 Network Carbon Meter (NCM) :区域互联线路终端节点碳排放监测;
- 荷侧碳表 Consumption Carbon meter (CCM) :与消费能耗对应的碳排放信息实时及统计信息监测

源侧碳表 (GCM)

网侧碳表 (NCM)

荷侧碳表 (CCM)

14

碳计量与碳追踪

清华大学 · 新闻
Tsinghua University · NEWS

清华大学 · 清华大学新闻 · 最新动态 · 正文

践行碳达峰碳中和 推进源网荷碳计量 全国首个电力系统“源网荷”实体碳表系统及能源碳计量平台正式上线

清华大学新闻9月30日电 9月29日上午，在江苏省发展和改革委员会、江苏省电力公司的指导下，常州市发展和改革委员会、清华大学电机系、清华四川能源互联网研究院、国网常州供电公司共同举办全国首个电力系统“源网荷”实体碳表应用示范工程启动仪式。

基于实体碳表装置的碳计量平台

日内瓦发明金奖

15

碳计量与碳追踪

利用碳表系统监测企业生产全过程碳排放

实时碳排放量
限电: 6526 kWh
耗电: 258 kWh
限电占比: 67.4%

碳排放总量
当日碳排放: 4621 kgCO₂
产品碳排放: 6.14 kgCO₂/kg

工序	耗电	耗电占比	耗电占比	产品碳排放
纺纱	2726 kWh	10.53%	10.53%	2.51 kgCO ₂
制衣	1818 kWh	7.04%	7.04%	0.88 kgCO ₂
整烫	2848 kWh	11.03%	11.03%	2.75 kgCO ₂

纺织、制衣、整烫等生产工序的碳排放计量

用户碳评价

评分高 A B C D E

中等

评分低

企业碳评分 90分

碳耗码

帮助消费者明晰产品生产
过程中产生的碳排放量

扫描二维码即可获知产品生产过程中的碳排放量

> 示范企业: 江苏卿卿纺织厂

指导企业低碳经营，鼓励消费者绿色消费

16

碳规划与碳轨迹



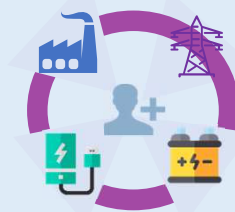
2

碳规划与碳轨迹：未来电力系统低碳转型规划与技术路径

电-碳约束



源网荷储协同规划



关键技术：电-碳耦合约束驱动下的源-网-荷-储协同演化规划

17

基于排放轨迹模型的碳减排模式分析



基于总排放额度约束的碳排放轨迹模型

主要控制参数：

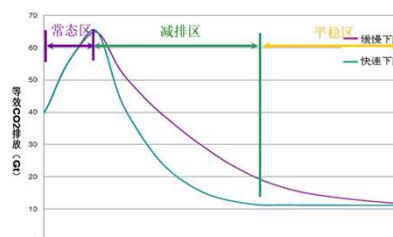
排放峰值年 Y_m 与峰值排放量 e_m

平稳排放起始年 Y_s 与平稳年排放量 e_s

减排期年平均递减率 r

标准模型-第 y_i 年排放量 e_i 为

$$e_i = \begin{cases} e_0 + \frac{e_m - e_0}{Y_m - Y_0} (y_i - Y_0) & y_i \in (Y_0, Y_m) \quad \text{线性函数} \\ (1-r)^{y_i - Y_m} e_m & y_i \in [Y_m, Y_s] \quad \text{指数函数} \\ e_s & y_i \in (Y_s, Y_Z] \quad \text{常数} \end{cases}$$



常态区：排放量以类似线性的趋势上升；

减排区：轨迹到达峰值后呈现指数下降态势；

平稳区：此时轨迹将保持在一定的低排放水平上

18

不同的碳排放轨迹讨论

上升轨迹

- 各方主体对碳排放达峰点 (达峰时间和峰值排放) 存在分歧
- ✓ 国际低碳减排组织?
- ✓ 发展中国家政府?
- ✓ 高碳排放行业?
- ✓ 可再生能源行业?

19

面向双碳的电力能源规划

综合考虑能源-经济-绿色目标，将**低碳发电系统模型-精细化全景电网运行模拟-负荷侧的需求响应-多时空尺度储能体系**，形成面向双碳的电力系统模拟规划模型，研究电力系统低碳化转型创新技术与发展路径

源：面向低碳转型的发电系统模型

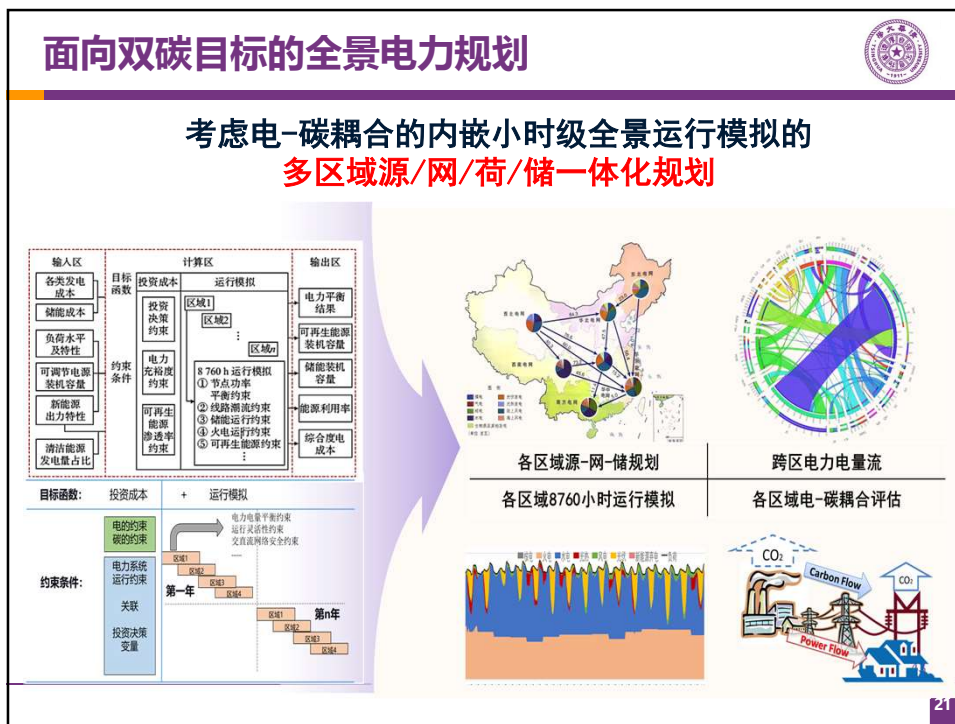
荷：电能替代与需求响应

网：精细化电网运行模拟


储：多时空尺度储能体系

源网荷储 交叉融合

20

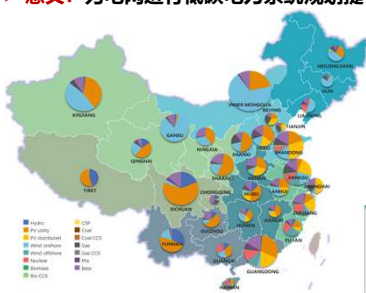


低碳电力系统规划

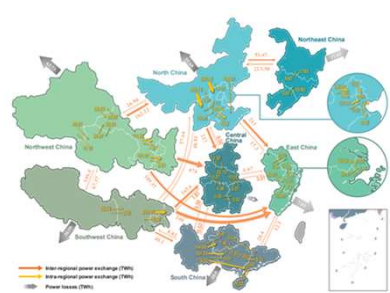


科学碳规划

- **应用描述:** 精确计算电力规划方案对应的未来碳排放强度, 辅助电力系统低碳转型方案制定
- **数据来源:** 全景碳排放流分析平台中的碳排放流数据以及精细化运行模拟数据
- **意义:** 为电网进行低碳电力系统规划提供量化依据




电源规划

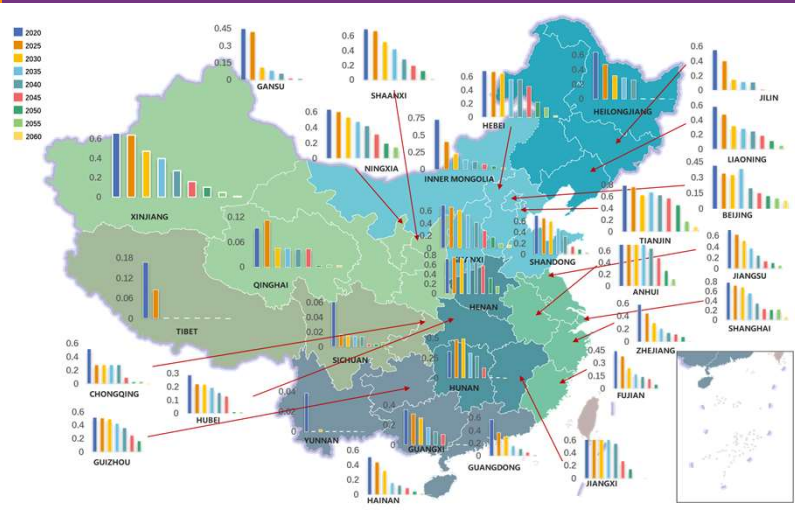


电网规划

23

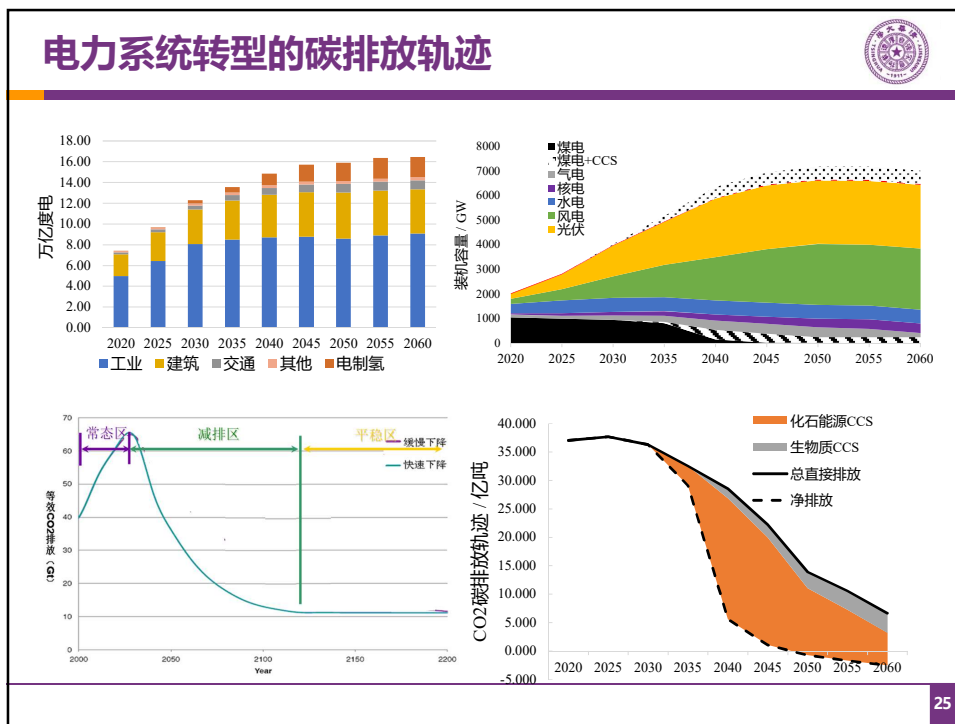
低碳电力系统规划





基于碳排放流分析技术的我国2020~2060各省平均碳排放因子

24



低碳电力系统规划


- 利用GOPT中源网荷储规划模块开展碳中和目标下中国电力系统未来形态与演进路径研究，研究成果发表在**Nature Communication**上
- 软件与报告支撑国家碳达峰碳中和政策制定

成果发表在Nature communication杂志

支撑碳达峰、碳中和政策建议

26

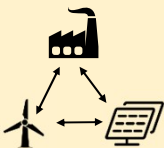
碳调度与碳优化




3

碳调度与碳优化：各类低碳电力技术的减排效益与协同优化


低碳调度



灵活性




稳定性



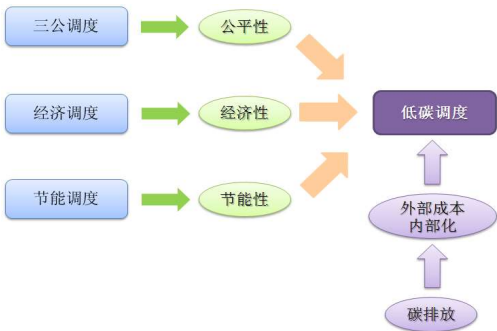
关键技术：考虑安全稳定约束的电力系统低碳运行方法

27

低碳电力调度



• 低碳电力调度的基本理念



- 传统电力调度方式的继承与发展
- 挖掘电能生产CO₂排放特性与减排潜力
- 充分考虑电能真实外部成本
- 电平衡+碳平衡

28

低碳电力调度

不同低碳电源类型

- ✓ 常规火电厂+CCUS
- ✓ 水电 (抽水蓄能)
- ✓ 核电
- ✓ 风电、光伏
- ✓ 光热发电
- ✓

主要方法

- 可再生能源调度方法
- 面向低碳的电力调度建模、优化与决策技术

29

低碳电力调度

Low penetration scenario (2017)

低可再生能源渗透率 (2017)
3种典型运行方式

Medium penetration scenario (2020)

较高可再生能源渗透率 (2020)
7种典型运行方式

High penetration scenario (2025)

高可再生能源渗透率 (2025)
10种典型运行方式

可再生能源电量占比不断提高

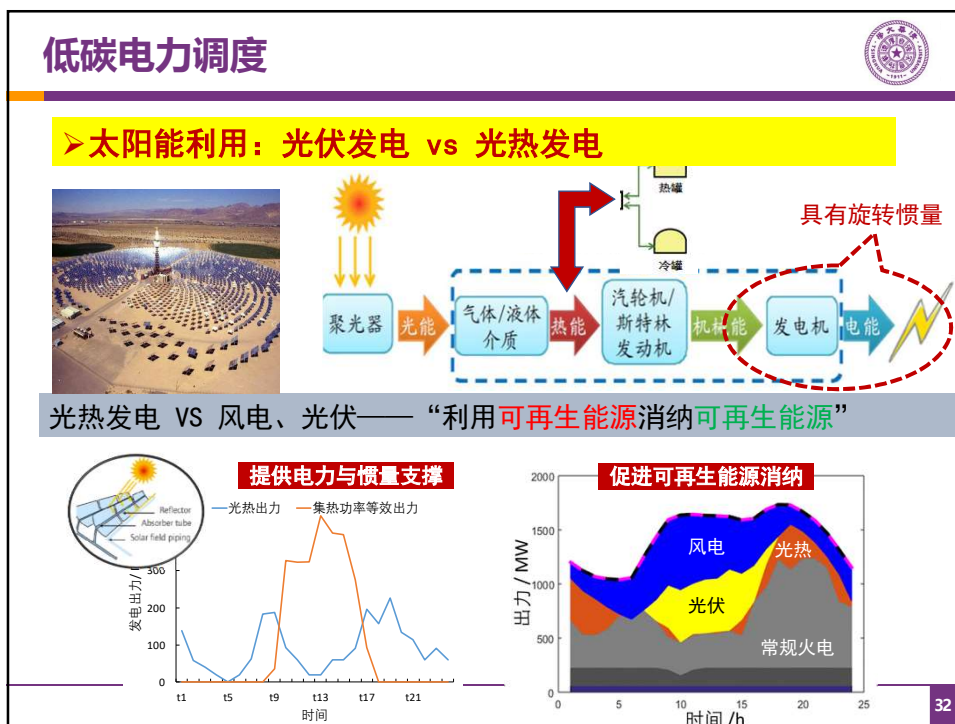
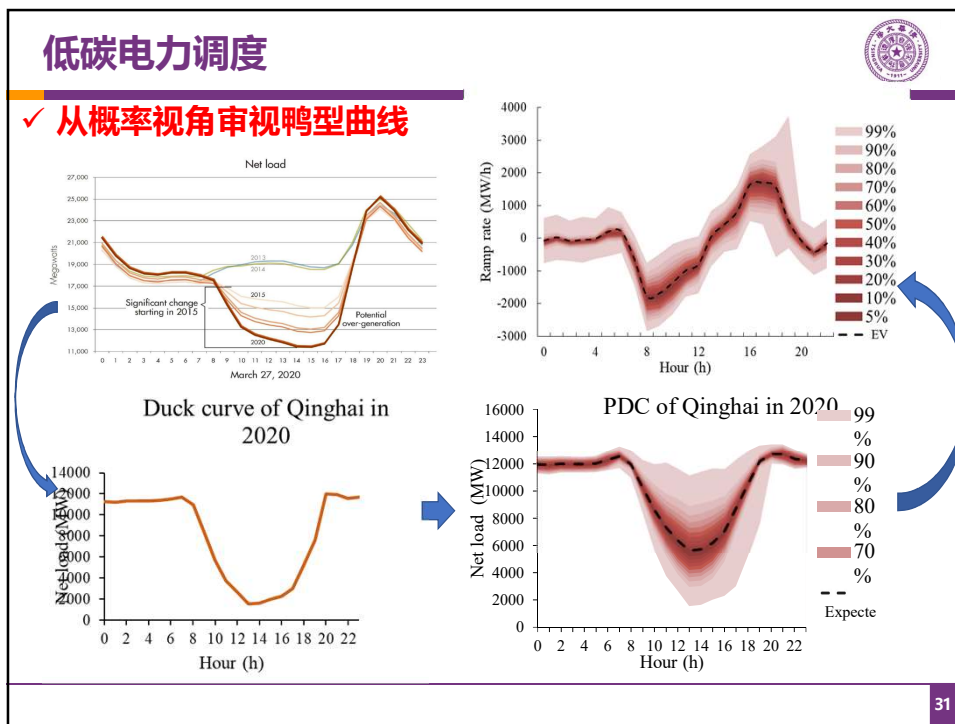
Cluster

Cluster

电量占比33%

Cluster

30



CCS/CCUS技术



- CCS: 二氧化碳捕集和封存技术 (Carbon Capture & Storage), 是指将CO₂从工业或相关能源的源分离出来, 输送到一个封存地点, 并且长期与大气隔绝的一个过程。
- 主要包括**捕集**, **运输**和**封存**三大方面的技术

CCR: 二氧化碳捕集预留 (Carbon Capture Ready)

- 在电厂及特定的位置有充足的空间, 可以增建二氧化碳收集设备及相互连接的设备
- CCR的成本只占电厂建设成本的约1%。



33

33

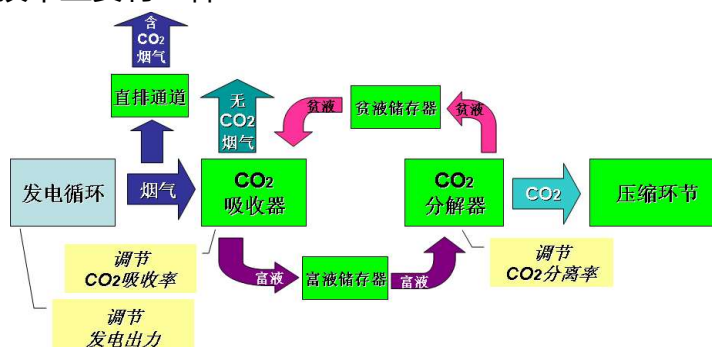
CCS/CCUS技术



CO₂捕集技术

目前的捕集技术主要有三种:

➤ 燃烧后捕集



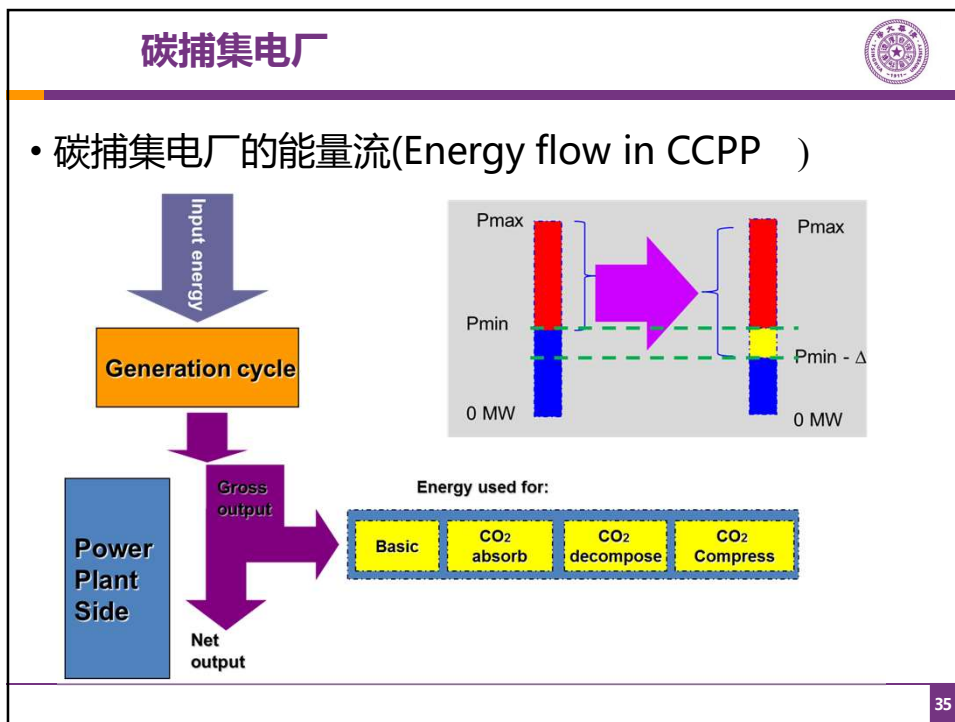
➤ 燃烧前捕集

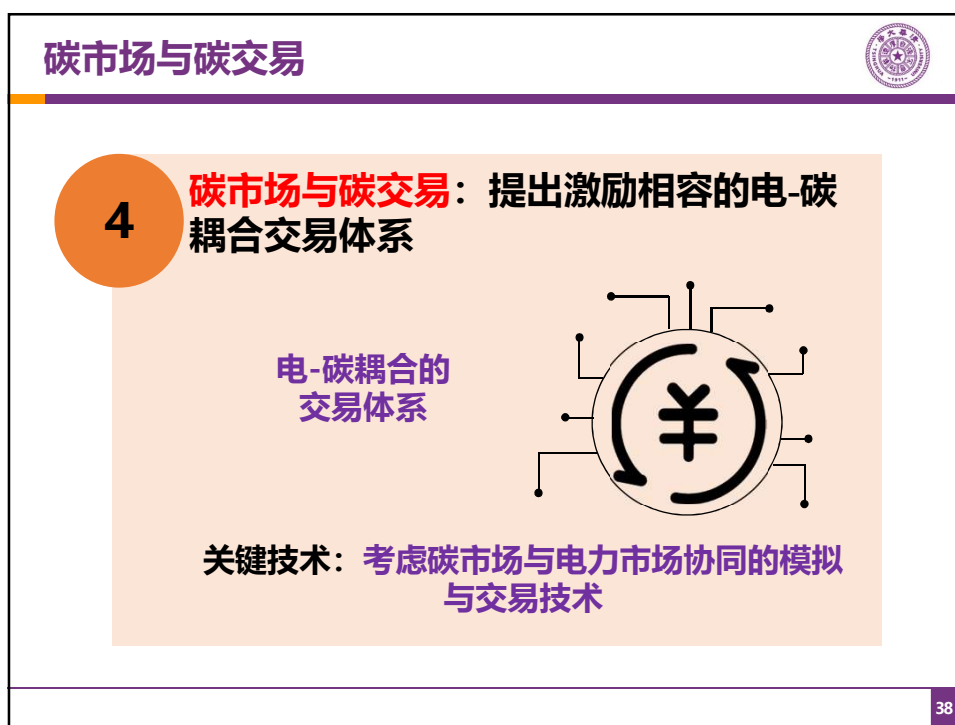
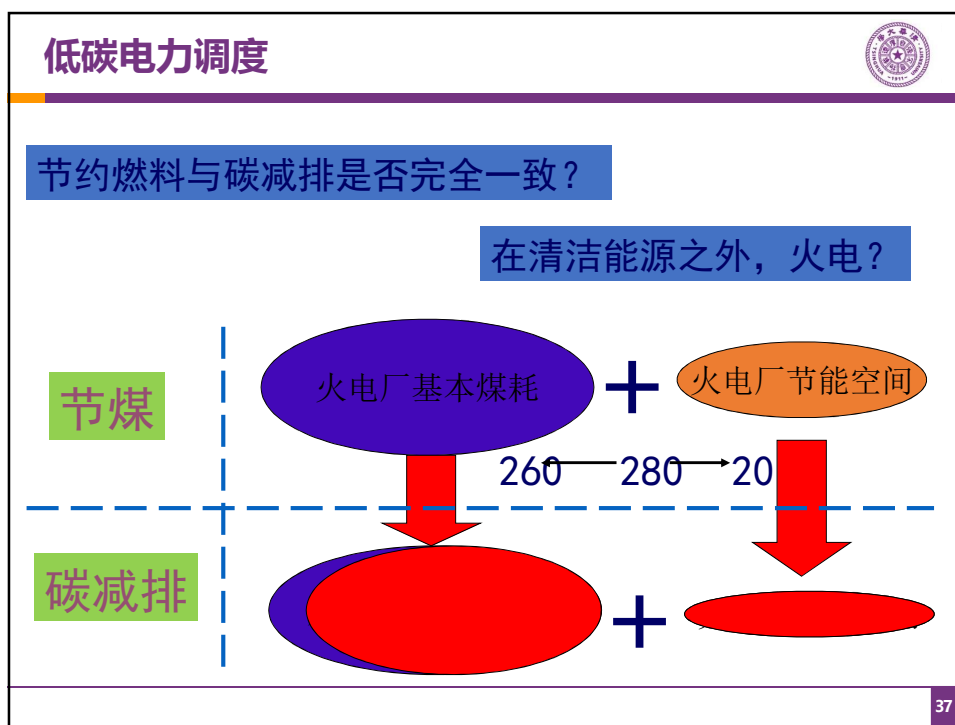
➤ 富氧燃烧捕集

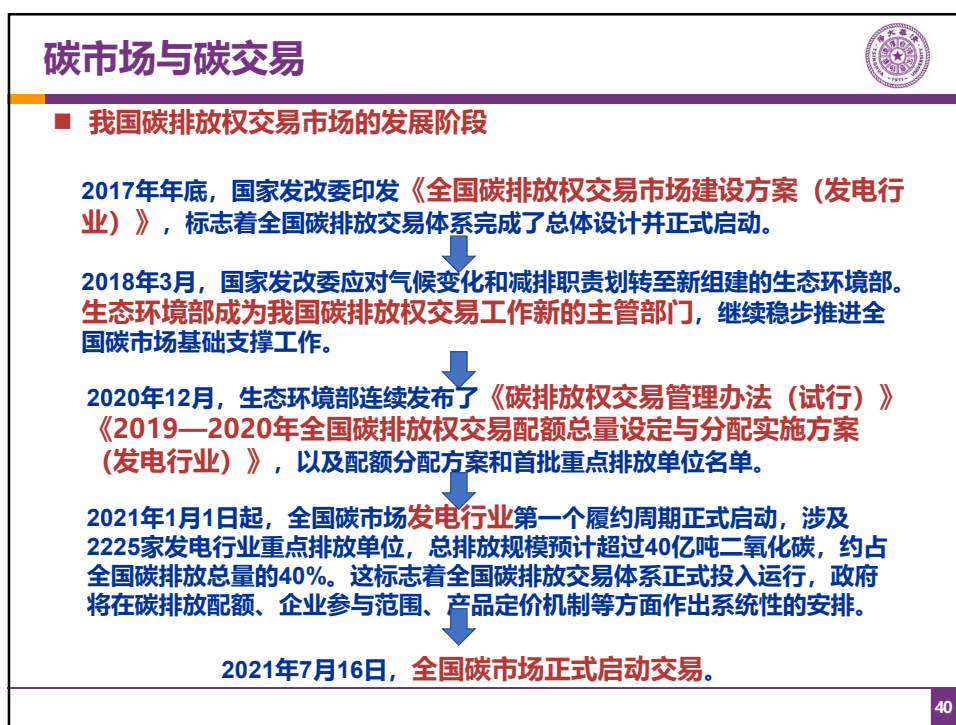
吸收吸附体多为碱性的液态材料, 如乙醇胺类水溶液 (MEA)

34

34

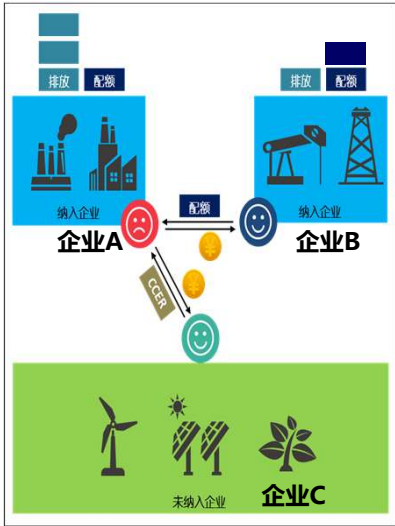






碳市场与碳交易






- 企业有排放许可
- 企业之间的减排成本不同
- 参加交易的企业都受益
- 全社会受益
- 碳市场的减排效果是通过碳市场和产品市场共同发挥作用

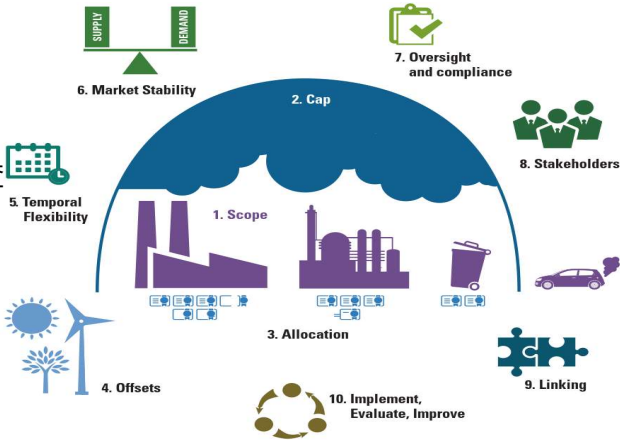
41

碳市场与碳交易




碳市场设计的关键要素和主要任务

- ◆ 覆盖范围
- ◆ 总量设定
- ◆ 配额分配
- ◆ 数据监测、报告与核查
- ◆ 交易制度
- ◆ 登记注册系统
- ◆ 履约机制
- ◆ 抵消机制



42

碳市场与电力市场协同模拟



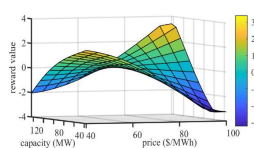
考虑电力市场与碳市场的物理与政策约束，研究二者协同的模拟交易技术

个体收益最大化建模
个体决策偏好约束

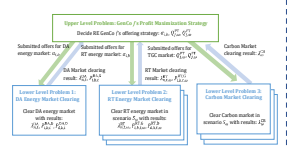
高比例可再生能源约束
电力系统物理运行约束

解析式对角化求解方法
数据驱动电力市场求解方法

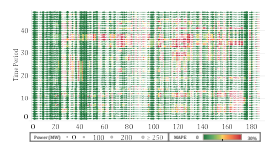
个体决策模型精准构建



耦合市场互动建模



协同出清求解技术



个体生产逻辑约束
个体碳排放总额约束


系统碳排放总额约束
多形式碳交易约束

启发式碳市场求解方法
分布式碳交易求解方法

43

碳市场与碳交易





云平台实现碳交易过程

- 支持电力市场、碳市场的**实际交易过程**，鼓励同学们“真刀真枪”参与交易、分析市场，理解规则、掌握知识

44

碳市场与碳交易



主动碳响应

- > **应用描述:** 以动态碳排放因子为信号, 引导用户通过改变自身用电行为的方式减碳
- > **数据来源:** 实时用电碳排放因子
- > **意义:** 将碳排放信号由发电侧传导至用电侧, 实现电力用户驱动的电力系统碳减排

低碳需求响应流程示意图






“eCarbon+”中面向用户低碳需求响应的碳排放因子预测服务



45


小结: 新型电力系统之“碳”路



1

碳计量与碳追踪: 精确计量电力碳排放, 多时空实时溯源

源侧计量 多时空碳流 用户侧计量




关键技术: 基于碳排放流的多时空尺度碳计量与碳追踪方法

2

碳规划与碳轨迹: 未来电力系统低碳转型规划与技术路径

电-碳约束 源网荷储协同规划




关键技术: 电-碳耦合约束驱动下的源-网-荷-储协同演化规划

3

碳调度与碳优化: 各类低碳电力技术的减排效益与协同优化

低碳调度 灵活性 稳定性




关键技术: 考虑安全稳定约束的电力系统低碳运行方法

4

碳市场与碳交易: 提出激励相容的电-碳耦合交易体系

电-碳耦合的交易体系



关键技术: 考虑碳市场与电力市场协同的模拟与交易技术

46

iEnergy 《电力能源汇刊》

期刊主页: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=9732629>
 在线投稿: <https://mc03.manuscriptcentral.com/ienergy>





iEnergy 是一本跨学科的国际学术期刊，旨在传播电力和能源领域的前沿基础理论和突破性技术的最新研究进展，为未来新一代电力和能源系统提供最新的科学和技术进步的传播平台，助力“碳达峰、碳中和”目标的实现。



2022年4月 iEnergy 创刊仪式

- 清华大学副校长曾嵘
- 顾国彪院士
- 周孝信院士
- 国家能源局监管总监黄学农
- 国家科技部重大专项司郑方能
- 清华大学出版社社长宗俊峰
- 主编何金良

主办单位 清华大学

学术单位 清华大学电机系

海外发行 IEEE

常规收稿类型 原创研究、研究快报以及综述

特邀稿件类型 新闻、专家观点、研究亮点

开放获取费用 清华大学出版社支付

开放获取
快速发表
专业同行评审
无版权限制
免费发表

47



初步思考 “碳路”

敬请批评指正!

康重庆

cqkang@tsinghua.edu.cn

