

基于市场结构与市场趋势的火电企业碳交易策略研究

冯田丰¹,王恩军¹,刘潇²,汪可人³

(1. 国家能源集团电力营销中心有限公司,北京 100011;2. 北京低碳清洁能源研究院,北京 102211;3. 复旦大学保险应用创新研究院,上海 200433)

摘要:作为全国碳市场重要参与者,火电企业合理使用交易策略有助于降低履约成本,实现碳资产保值增值。首先刻画碳市场微观结构,依据配额分配量相对履约要求盈余/平衡/不足划分交易场景;随后分场景探究市场强趋势与弱趋势两种状态下的最优策略选择问题,发现趋势跟踪和均值回归策略分别在强趋势与弱趋势状态下表现最优。进一步发现,“趋势跟踪+均值回归”策略组合能够融合二者优势,相对单一策略在配额盈余场景下提升收益3.0%~5.4%,在配额平衡场景下提升收益17%~33%,在配额不足场景下降低成本0.1%~6.6%。基于市场结构与市场趋势构建差异化交易策略框架,为火电企业更好地参与全国碳市场提供指引。

关键词:碳配额市场;市场结构;市场趋势;寡头垄断;交易策略

Research on carbon trading strategy of electric power enterprises based on market structure and market trends

FENG Tianfeng¹, WANG Enjun¹, LIU Xiao², WANG Keren³

(1. China Energy Group Electricity Marketing Center Co., Ltd., Beijing 100011, China;2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China;3. Fudan Institute of Insurance Application and Innovation, Shanghai 200433, China)

Abstract: As key participants in the national carbon market, the rational use of trading strategies by thermal power enterprises is conducive to reducing compliance costs and enhancing the value of carbon assets. The microstructure of the carbon market is first characterized, and trading scenarios are classified into allowance surplus, balance, and deficit based on allowance allocation relative to compliance requirements. Under each scenario, optimal strategy choices under strong-trend and weak-trend market states are examined, showing that trend-following strategies perform best in strong-trend states, while mean-reversion strategies dominate in weak-trend states. Further results indicate that a combined strategy integrating both approaches outperforms single strategies, increasing returns by 3.0%~5.4% in surplus scenarios and by 17%~33% in balanced scenarios, while reducing costs by 0.1%~6.6% in deficit scenarios. A differentiated trading strategy framework based on market structure and market trends is thus constructed to guide thermal power enterprises in more effective participation in the national carbon market.

Key words: carbon trading market; market structure; market trend; oligopoly; trading tactics

0 引言

碳市场是利用市场机制积极应对气候变化、加快经济社会发展全面绿色转型的重要政策工具。2025年8月,中共中央办公厅、国务院办公厅正式发布《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》,明确提出推动建设更加有效、更有活力、更

具国际影响力的全国碳市场,为积极稳妥推进“双碳”目标、建设美丽中国提供重要支撑。全国碳排放权交易市场(以下简称“全国碳市场”)作为市场化减排机制的核心载体,自2021年7月正式启动以来,已成为全球覆盖温室气体排放量规模最大的碳交易体系。然而,当前我国碳市场仍呈现“履约驱动型”特征,交易主要集中在履约期,导致碳价难以充分反映供需关系^[1]。已有研究表明,碳市场存在“不活跃、不灵敏、不畅通”等问题,信息传递效率较低,碳价对政策与行业变动响应滞后,可能扭曲资源配置效率^[2]。若能挖掘碳市场运行规律并构建交易策略,不仅有助于企业降本增效,还能提升碳市

收稿日期:2026-01-05;修回日期:2026-01-24

基金项目:上海市2025年度高水平机构建设运行计划“软科学研究”重点项目(25692100400);2025年度决策咨询研究国际航运中心专项课题(2025-LH-HY01)

场活跃度与资源配置效率,具有重要的理论与实践意义。

现有研究多集中于单一策略的适用性分析,缺乏将策略与企业生产计划、配额分配及市场状态耦合的系统研究。

基于已有研究^[3-7],本文结合我国碳市场特征构建寡头垄断博弈分析框架,探讨碳价决定机制及企业生产与交易计划,厘清不同市场状态下的最优策略选择。根据配额分配情况区分盈余、平衡与不足3种交易场景,并基于市场动向指数(directional movement index, DMI)判断趋势强弱,检验均值回归、趋势跟踪及基准策略在不同市场状态下的绩效表现。最后,构建“趋势跟踪+均值回归”策略组合以发挥两者优势。

本文的边际贡献在于:①在微观层面构建企业决策耦合模型,将生产计划与交易策略联合考虑,实现企业最优交易决策分析;②根据配额盈余、平衡与不足划分3类交易场景,结合DMI指数动态判断市场趋势,评估单一策略及组合策略在不同碳市场状态下的绩效;③提出“趋势跟踪+均值回归”策略组合,通过融合两类策略优势,实现在不同场景下的稳健收益,验证理论模型与实证结果的一致性。

1 理论分析

传统交易策略如趋势跟踪^[8-9]和均值回归^[10-11]等同样适用于碳市场^[12]。趋势跟踪策略基于市场投资者的异质性导致的价格趋势特征,投资者通过跟随趋势交易获利;均值回归策略则认为资产价格围绕基本面决定的中枢波动,当价格偏离合理区间时将回归。

火电行业是首个纳入碳市场的重点行业,其运行决定市场总量与数据质量。本文以火电企业为对象,将其短期内“准刚性”的碳排放视为外生约束,聚焦不同市场结构与趋势下的碳交易策略选择及绩效,为制定交易决策提供参考。这一简化不影响策略比较,且能突出交易行为的经济逻辑。

具体通过理论建模探究碳市场价格决定机制及企业生产与配额交易的耦合关系。分析分两阶段:一是生产计划阶段,在期望碳价下求解企业利润最大化问题,决定生产计划与配额买卖数量,并基于寡头垄断市场结构和市场出清条件确定碳配额期望价格;二是交易阶段,在生产计划既定下,基于古诺模型分析寡头企业交易行为对碳价和企业利润的影响,求解最优交易策略。理论模型如下。

1.1 生产计划制定阶段的最优化问题

首先分析单一企业在生产计划制定阶段的最优化问题。按照如下方式定义企业期望利润函数^[4]

$$\begin{cases} \max \pi = \psi f(E) + P_Q \\ \text{s.t. } E + Q \leq m f(E) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为生产函数; E 为碳排放量; $f(E)$ 为能源供应量; ψ 为生产单位能源创造的利润; P 为碳配额期望价格; Q 为企业对碳配额的净交易量; $Q > 0$ 为企业净卖出,反之为净买入,因此碳配额交易带来的期望利润为 P_Q 。约束条件的含义为企业碳排放量与碳配额净卖出量之和不得超过企业预期配额分配量,即能源供应量 $f(E)$ 与基准值 m 的乘积。根据《全国碳排放权交易发电行业配额总量和分配方案》(“配额方案”),企业配额分配量的计算公式为“发电(供热)量×发电(供热)基准值”。上述问题可表述为:企业在满足约束条件前提下选择最优的 E 和 Q 以最大化利润。基于边际产出递减性质设生产函数具体形式为

$$f(E) = A \ln(1 + E) \quad (2)$$

式中: A 为生产率。由拉格朗日乘子法可解得

$$E = A \left(\frac{\psi}{P} + m \right) - 1 \quad (3)$$

$$Q = mA \ln \left(A \left(\frac{\psi}{P} + m \right) \right) + 1 - A \left(\frac{\psi}{P} + m \right) \quad (4)$$

易知 $\partial E / \partial P < 0$, $\partial Q / \partial P > 0$, 即当碳配额期望价格上升时,企业最优碳排放量下降,最优净卖出碳配额增加(或净买入碳配额减少)。

继续从行业层面展开分析。借鉴已有研究^[1]将碳市场抽象为寡头垄断市场;市场中存在3类交易主体,一是主要关注对象(企业G),二是其交易对手(企业H),三是其他若干小型企业。3类主体的生产函数形式相同,仅生产率存在差异;不妨记企业G与企业H的碳配额净卖出量分别为 Q^G 和 Q^H ,小型企业的生产率为 A^s 。假设小型企业数量众多且彼此同质,其构成的整体为1^[13],那么全部小型企业的碳配额最优净卖出数量 Q^s 与碳配额期望价格 P 之间必然满足如下关系

$$Q^s = mA^s \ln \left(A^s \left(\frac{\psi}{P} + m \right) \right) + 1 - A^s \left(\frac{\psi}{P} + m \right) \quad (5)$$

假设在碳市场均衡状态下,全部小型企业的碳配额净卖出量为 Q^{s*} ,碳配额期望价格为 P^* ,将 Q^s 与 P 的函数关系在均衡点附近泰勒展开可得

$$Q^s - Q^{s*} = \frac{\psi^2 A^s}{(\psi + mP^*)P^{*2}} (P - P^*) \quad (6)$$

在市场均衡状态下,碳配额买入量与卖出量应

当相等,因此可得到如下市场出清条件

$$Q^G + Q^H + Q^S = 0 \quad (7)$$

式中: Q^G 和 Q^H 分别为企业 G 和企业 H 的净卖出碳配额数量。联立式(6)与式(7)可得

$$P = b - a(Q^G + Q^H) \quad (8)$$

式中: $a = \frac{(\psi + mP^*)P^{*2}}{\psi^2 A^S}$; $b = P^* - \frac{(\psi + mP^*)P^{*2}Q^{*S}}{\psi^2 A^S}$ 。由

于 $a > 0$, 因此企业 G 和企业 H 净卖出量之和越大, 则碳配额期望价格越低。

1.2 交易阶段的最优化问题

交易阶段的目标是通过碳配额交易实现利润最大化, 同时保证履约期结束时 $E + Q \leq mf(E)$ 仍成立。为刻画碳价动态变化特征, 在式(8)的基础上定义时刻 t 的碳价决定函数为

$$P_t = b_t - a_t(Q^G + Q^H + q_t^G + q_t^H) \quad (9)$$

式中: a_t 和 b_t 分别为时变参数, $a_t > 0$, $b_t > 0$; Q^G 和 Q^H 在生产计划制定阶段已确定, 因此不随时间变化; q_t^G 和 q_t^H 分别为企业 G 和企业 H 在 t 时刻的交易量, $q_t^i > 0$ 为卖出, $q_t^i < 0$ 为买入 ($i = G, H$)。这意味着某一时刻 t 的碳价 P_t 不仅取决于时变参数 (a_t 和 b_t) 以及企业 G 和企业 H 的总体交易计划 (Q^G 和 Q^H), 还取决于企业 G 和企业 H 的即时交易行为 (q_t^G 和 q_t^H)。本文通过两期动态模型探究两家寡头企业的即时交易行为如何影响市场价格及自身利润。假设在 t 时刻, 企业 G 和企业 H 同时交易; 而在 t' ($t' > t$) 时刻, 企业 G 和企业 H 均未交易, 那么该时间间隔内碳价变化为

$$\Delta P_{t'} = \Delta b_{t'} - \Delta a_{t'}(Q^G + Q^H) + a_t(q_t^G + q_t^H) \quad (10)$$

式中: $\Delta a_{t'} = a_{t'} - a_t$; $\Delta b_{t'} = b_{t'} - b_t$ 。

碳价变化可分解为两部分: 一是与企业既定交易计划有关并随市场新增信息发生变化的部分 $\Delta b_{t'} - \Delta a_{t'}(Q^G + Q^H)$, 二是受企业 G 和企业 H 即时交易行为影响的价格变化 $a_t(q_t^G + q_t^H)$ 。假设企业 i 在 t 时刻的配额持仓量为 M_t^i , 那么 t' 时刻的配额持仓量 $M_{t'}^i = M_t^i - q_t^i$ 。该时间间隔内企业 i 的净利润(或资产价值变化)为

$$\pi_{t'}^i = M_t^i \Delta P_{t'} - q_t^i \Delta P_{t'} \quad (11)$$

倘若企业 i 在 t 时刻不交易 ($q_t^i = 0$), 则该时间间隔内净利润为 $M_t^i \Delta P_{t'}$ 。企业只需要关注 t 时刻交易相对于不交易的净利润变化量 $\Delta \pi_{t'}^i = -q_t^i \Delta P_{t'}$ 来决定是否交易, 本文将此定义为增量净利润。

借鉴古诺双寡头模型探究企业 G 和企业 H 的即时交易行为如何影响市场价格及自身增量净利润。在某一时刻 t , 假设企业 G 相信交易对手企业

H 会选择交易量 q_t^H , 那么企业 G 自身的增量净利润及其最优化问题可表述如下

$$\max_{q_t^G} \Delta \pi_{t'}^G = -[\Delta b_{t'} - \Delta a_{t'}(Q^G + Q^H)]q_t^G - a_t(q_t^G + q_t^H)q_t^G \quad (12)$$

企业 G 和企业 H 在 t 时刻的最优交易量为

$$q_t^G = q_t^H = -\frac{\Delta b_{t'} - \Delta a_{t'}(Q^G + Q^H)}{3a_t} \quad (13)$$

因此, 如果企业按照增量净利润最大化的原则参与交易, 那么其最优交易方向仅取决于市场新增信息引致的变化趋势, 而非交易对手行为。如果 $\Delta b_{t'} - \Delta a_{t'}(Q^G + Q^H) > 0$, 即市场新增信息导致价格具有上升趋势, 那么两家企业均应跟随趋势买入配额, 反之则卖出配额。不过, 企业在现实中无法直接观测到市场趋势, 只能基于已有信息对未来的市场趋势进行预测。定义真实市场趋势 θ_t 为未来碳价与当前碳价的比值 $P_{t'}/P_t$, 企业基于已有信息对未来市场趋势作出的预测为 $\tilde{\theta}_t$, 预测值与真实值之间的误差为 ε_t , 那么 θ_t 、 $\tilde{\theta}_t$ 与 ε_t 三者的关系为

$$\tilde{\theta}_t = \theta_t + \varepsilon_t \quad (14)$$

假设真实市场趋势和误差均服从正态分布且相互独立, $\theta_t \sim N(1, \sigma_\theta^2)$, $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。误差波动率 σ_ε^2 越高, 则对市场趋势的预测越不准确。根据独立正态分布性质, 有 $\tilde{\theta}_t \sim N(1, \sigma_\theta^2 + \sigma_\varepsilon^2)$ 。鉴于后续分析均在固定时刻进行, 故变量名隐去时间下标。假设企业根据市场趋势预测值 $\tilde{\theta}$ 推断真实市场趋势的期望 $E(\theta|\tilde{\theta})$ 和方差 $Var(\theta|\tilde{\theta})$ 。基于贝叶斯更新法则 (Bayesian updating rule), 企业更新信念后可得

$$E(\theta|\tilde{\theta}) = \frac{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\theta^2 \tilde{\theta}}{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (15)$$

$$Var(\theta|\tilde{\theta}) = \frac{\sigma_\varepsilon^2 \sigma_\theta^2}{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (16)$$

假设企业依据自身风险偏好设置容忍度参数 γ , 当且仅当 $E(\theta|\tilde{\theta}) > 1 + \gamma \sqrt{Var(\theta|\tilde{\theta})}$ 时, 有足够把握认为市场趋势为上升; 当且仅当 $E(\theta|\tilde{\theta}) < 1 - \gamma \sqrt{Var(\theta|\tilde{\theta})}$ 时, 有足够把握认为市场趋势为下降。可以解得, 上述两个不等式分别等价于 $\tilde{\theta} > \bar{\theta}$ 和 $\tilde{\theta} < \underline{\theta}$, 其中

$$\bar{\theta} = 1 + \frac{\gamma \sigma_\varepsilon}{\sigma_\theta} \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (17)$$

$$\underline{\theta} = 1 - \frac{\gamma \sigma_\varepsilon}{\sigma_\theta} \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (18)$$

因此, 当 $\tilde{\theta} < \underline{\theta}$ 时, 由于市场具有较强的下降趋势, 企业的最优策略是跟随市场趋势进行卖出; 当 $\tilde{\theta} > \bar{\theta}$ 时, 由于市场具有较强的上升趋势, 企业的最优策略是跟随市场趋势进行买入。总之, 当 $\tilde{\theta} < \underline{\theta}$ 或

$\bar{\theta} > \bar{\theta}$ 时,市场处于强趋势状态,此时企业最优策略为趋势跟踪策略;当 $\bar{\theta} < \bar{\theta} < \bar{\theta}$ 即市场处于弱趋势状态时,趋势跟踪策略适用性不充分,需要通过实证研究论证此时的最优策略。接下来,本文将针对具体交易场景搭建差异化交易策略分析框架,以检验理论模型推演的有效性,并通过实证分析揭示多种策略在不同市场状态下的表现与适用性。

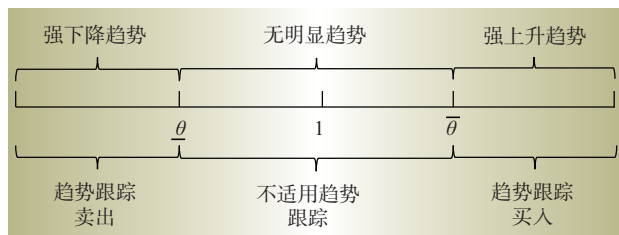


图1 基于市场趋势的交易策略组合配置框架

Fig. 1 Market-trend-driven framework for configuring trading strategy portfolios

2 研究设计

2.1 交易场景及策略类型

依据企业配额分配量能否满足履约要求,将企业可能面临的交易场景分为3种,即配额分配量相对履约要求盈余(场景1)、平衡(场景2)和不足(场景3),每种场景对应不同的目标函数(如表1所示),并基于此设计相应交易策略。

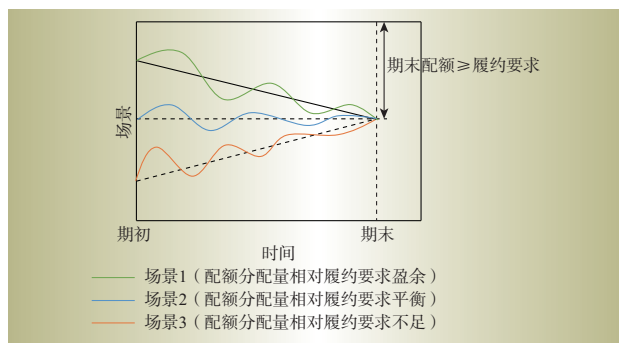


图2 3种场景的示意

Fig. 2 Schematic illustration of three scenario

由理论分析可知,当市场处于强趋势状态时最优策略为趋势跟踪策略。移动平均线在金融市场^[8]和碳市场^[14]都有广泛应用,其基本原理是根据短期均线和长期均线的相对位置判断市场趋势:如果短期均线向上穿越长期均线,则未来价格上升趋势较明显,适合买入;如果短期均线向下穿越长期均线,那么未来价格下降趋势较明显,适合卖出。移动平均线的合理性可以从行为经济学研究中得到论证^[8]。

当市场处于弱趋势状态时,需通过实证分析寻找最优策略。除趋势跟踪策略之外,本文进一步将

均值回归策略和基准策略加入备选策略集合。均值回归策略的逻辑在于:碳配额价值在理论上与实际减排成本及气候目标调控政策有关,前者主要由生产和环保技术等因素决定,其变化通常体现在中长期尺度,因此短期内对碳价趋势产生主导作用的通常是政策因素。此外,碳价还受到市场供求、流动性等短期因素影响而呈现围绕均值上下波动的时变形态。如果市场不存在明显趋势,那么碳价在短期内偏离均值的幅度是有限的,这一限度可视为合理定价区间。企业可通过碳价相对于合理定价区间的位置判断交易时机,如果碳价高于区间上界则适合卖出,反之则适合买入。

基准策略是指企业通过尽可能简单的方式应对市场波动,在3种交易场景中有相应的具体表现形式:在场景1中为期末一次性卖出策略,这是因为履约期临近收尾时碳市场交易一般较为活跃,碳价往往较高,适合卖出;在场景2中为持有至到期策略;在场景3中为期初一次性买入策略,这是因为履约期初碳价往往较低,适合买入。之所以将以上策略作为基准,是因为我国碳市场交易活跃度仍有待提升,换手率处于较低水平,多数控排企业对碳配额的管理仍较为被动,一次性买卖或持有至到期仍是最普遍和最基本的操作模式^[2]。因此本文选取的基准策略能够比较真实地反映主动管理相对于当前普遍实践带来的价值增益。

2.2 绩效评价体系

针对不同场景的交易目标选取合适的绩效指标:场景1的绩效指标为卖出收益;场景2的绩效指标包括收益率、波动率和夏普比率,为保证可比性均转化为年度;场景3的绩效指标为买入成本。差异化交易策略分析框架如表1所示。

表1 差异化交易策略分析框架

Table 1 Analytical framework for differentiated trading strategies

交易场景	目标	基准策略	绩效指标
场景1: 配额盈余	结转最大化、卖出 收益最大化	期末一次 性卖出	卖出收益
场景2: 配额平衡	净收益最大化、风 险最小化	持有至 到期	收益率、波动 率、夏普比率
场景3: 配额不足	买入成本最小化	期初一次 性买入	买入成本

3 不同市场趋势下的最优策略选择

全国碳排放配额(Chinese emission allowances, CEA)交易数据来自 Wind 数据库,涵盖时间区间为

2021年7月16日至2024年12月31日。对原始数据进行如下处理:①剔除成交价格或成交量缺失的无效记录;②对于价格或成交量为零且不属于休市日期的异常条目予以剔除,以确保结果可靠性。参考既有研究^[15-16],采用市场动向指数(DMI)对碳市场价格运行的趋势强弱进行刻画。相关研究普遍以 $DMI=30$ 作为区分强趋势与弱趋势状态的经验阈值:当 DMI 高于30时,市场价格呈现出方向性明确、趋势性较强的特征;当 DMI 低于30时,价格波动以震荡为主,趋势性相对较弱。作为一类基于价格方向与动量构建的技术指标, DMI 具有跨市场、跨资产类型的广泛适用性。为保证指标可比性与规范性,本文与已有研究^[15-16]对 DMI 的定义和阈值设定保持一致。针对前述3种交易场景分别检验趋势跟踪策略、均值回归策略和基准策略在市场强趋势和弱趋势两种状态下的绩效表现。

3.1 配额分配量相对履约要求盈余(场景1)

当前配额方案规定配额结转量存在上限,若以结转最大化为目标,则必须保证一定的净卖出比率。本文关注的是配额卖出时点。趋势跟踪策略使用 s 日和 l 日均线分别作为短期和长期均线($l>s$),若 s 日均线下穿 l 日均线则卖出配额;假设分 n 次卖出,每次仅卖出 $1/n$; s 、 l 和 n 均为可调节参数,借鉴成熟市场实践经验并结合碳市场数据优化调整,设定 $s=5$, $l=20$, $n=10$ 。综合考虑市场活跃度和交易可达性,假定在履约期最后40个交易日分批卖出。均值回归策略使用 d 日均线 $M_A(d)$ 作为定价中枢,并基于标准差 σ 确定合理定价区间,如果价格高于 $M_A(d)+k\sigma$ (k 为正数)则卖出配额; d 和 k 为可调节参数,本文设定 $d=5$, $k=1$ 。其他设定同趋势跟踪策略保持一致。期末一次性卖出策略选择在履约期结束前两个月时一次性卖出多余配额,这是因为集中履约阶段交易通常较为活跃,价格较高,且履约一般需要在周期收尾前完成。

根据全国碳市场履约期的安排,本文将样本计划分为3个交易期间,分别为2021年、2022—2023年和2024年,并依次考察趋势跟踪、均值回归和基准策略的绩效表现。如表2所示,当市场处于强趋势状态时,趋势跟踪策略在前两个交易期间的表现均最优,在第三个交易期间的表现稍逊于基准策略,但从平均收益来看,趋势跟踪策略仍有明显优势。当市场处于弱趋势状态时,均值回归策略在前两个交易期间中均具有最优表现,在第三个交易期间中的表现稍逊于基准策略,但就平均收益而言仍有显著优势。综上,趋势跟踪和均值回归策略分别在市场处于强趋势和弱趋势状态时表现更好。

表2 场景1中交易策略的卖出收益对比

Table 2 Comparative analysis of selling returns for trading strategies in scenario 1

元/t			
市场处于强趋势状态			
交易年份	趋势跟踪	均值回归	期末一次性卖出
2021	55.73	49.83	42.45
2022—2023	82.46	75.60	77.53
2024	95.64	91.15	104.43
平均	77.95	72.19	74.80
市场处于弱趋势状态			
交易年份	趋势跟踪	均值回归	期末一次性卖出
2021	50.43	55.07	42.45
2022—2023	74.60	83.56	77.53
2024	86.54	100.75	104.43
平均	70.52	79.79	74.80

3.2 配额分配量相对履约要求平衡(场景2)

在平衡场景下,企业可通过买卖交易实现净收益最大化。为保证企业在期末仍满足履约要求,限定企业通过“买卖交替”方式交易,即买入之后直到卖出信号出现再进行同等规模卖出,否则不作交易,卖出之后同理。如表3所示,当市场处于强趋势状态时,按照收益率由高到低排序依次为趋势跟踪(179%)、持有至到期(167%)和均值回归策略(59%),按照波动率由低到高排序依次为均值回归(18%)、趋势跟踪(35%)、持有至到期策略(37%),按照夏普比率从高到底排序依次为趋势跟踪(5.14)、持有至到期(4.47)和均值回归策略(3.36)。当市场处于弱趋势状态时,均值回归策略表现最优,其收益率高达32%,远高于趋势跟踪与持有至到期策略。同时,均值回归策略的波动率为11%,明显低于其他策略;夏普比率为2.83,远胜于其他策略。综上,当市场处于强趋势状态时,趋势跟踪策略表现最优;而当市场处于弱趋势状态时,均值回归策略表现最优。

表3 场景2中交易策略的绩效表现对比

Table 3 Performance comparison of trading strategies in scenario 2

市场处于强趋势状态			
绩效指标	趋势跟踪	均值回归	持有至到期
收益率	1.79	0.59	1.67
波动率	0.35	0.18	0.37
夏普比率	5.14	3.36	4.47
市场处于弱趋势状态			
绩效指标	趋势跟踪	均值回归	持有至到期
收益率	-0.05	0.32	-0.14
波动率	0.16	0.11	0.28
夏普比率	-0.31	2.83	-0.50

3.3 配额分配量相对履约要求盈余不足(场景3)

如果配额分配量相对履约要求不足,那么企业需选择合理时点买入配额。具体地,检验趋势跟踪、均值回归、期初一次性买入策略的绩效表现,其中趋势跟踪与均值回归策略的设定均与前文保持一致,而期初一次性买入策略是指企业一次性买入足量碳配额,此后不交易。企业可在交易期间首个交易日一次性买入,也可以作简单择时,即在价格首次低于合理定价区间下界时一次性买入。表4汇报了几种交易策略的买入成本对比情况。当市场处于强趋势状态时,趋势跟踪策略在前两个交易期间中均表现最优,在第三个交易期间中的表现稍逊于嵌入简单择时的期初一次性买入策略,但从3个交易期间的平均成本来看,趋势跟踪策略仍具有最优表现,平均成本显著低于其他策略。当市场处于弱趋势状态时,均值回归策略在3个交易期间中均具有最优表现,且平均买入成本显著更低。综上,当市场处于强趋势时,使用趋势跟踪策略判断买入时点可有效降低买入成本;而当市场处于弱趋势时,均值回归策略更为有效。

表4 场景3中交易策略的买入成本对比
Table 4 Entry cost comparison of trading strategies in scenario 3

元/t				
市场处于强趋势状态				
交易年份	趋势跟踪	均值回归	期初一次性买入	
			不择时	择时
2021	44.26	47.10	51.23	51.00
2022—2023	55.26	59.37	57.29	56.00
2024	72.87	76.07	76.81	72.00
平均	57.46	60.85	61.78	59.67
市场处于弱趋势状态				
交易年份	趋势跟踪	均值回归	期初一次性买入	
			不择时	择时
2021	48.92	42.62	51.23	51.00
2022—2023	61.08	53.71	57.29	56.00
2024	80.54	68.83	76.81	72.00
平均	63.51	55.05	61.78	59.67

3.4 总结

如表5所示,趋势跟踪与均值回归策略分别在市场处于强趋势与弱趋势状态时表现更优,且在不同场景下相对其他策略均有明显优势。由此推断,如果在市场强趋势状态下使用趋势跟踪策略,在市场弱趋势状态下使用均值回归策略,那么该策略组合理论上可以获得相对单一策略更优的表现,这为后续构建策略组合奠定了基础。

表5 均值回归策略相对基准策略和趋势跟踪策略的绩效提升效果

Table 5 Performance uplift of mean reversion strategy vs benchmark and trend following strategies				%
市场处于强趋势状态				
交易场景	绩效指标	趋势跟踪		
		相对均值回归	相对基准策略	
1 盈余	卖出收益	8.0	4.2	
2 平衡	收益率	120	12	
3 不足	买入成本	-5.9	-7.5	
市场处于弱趋势状态				
交易场景	绩效指标	均值回归		
		相对趋势跟踪	相对基准策略	
1 盈余	卖出收益	13.1	6.7	
2 平衡	收益率	37	46	
3 不足	买入成本	-15.4	-12.2	

4 策略组合构建与验证

策略组合构建思路如下:通过 DMI 指数判断市场趋势强弱,如果 DMI 高于 30 则使用趋势跟踪策略,反之则使用均值回归策略。倘若策略组合的表现相较于趋势跟踪、均值回归和基准策略均更优,则说明理论分析与实际情况相一致。如表6所示,在场景1中,策略组合的平均卖出收益相对趋势跟踪、均值回归与基准策略的提升幅度分别为5.4%、3.0%和4.6%。在场景2中,策略组合的平均收益为53%,相对趋势跟踪、均值回归与基准策略的提升幅度分别为21%、17%和33%。策略组合与基准策略(持有至到期策略)的净值曲线对比情况如图3所示,可以发现策略组合能够融合趋势跟踪与均值回归策略的优点,不仅在市场呈现显著趋势性的时期敏锐捕捉市场趋势,且在市场振荡时期有效控制风险。在场景3中,策略组合相对趋势跟踪、均值回归与基准策略节约成本幅度分别为4.4%、0.1%和6.6%。综上,策略组合能有效融合趋势跟踪与均值回归策略优势,帮助企业更准确识别买卖时机,节约履约成本并实现碳资产保值增值。

表6 策略组合相对其他策略的绩效提升效果
Table 6 Performance gain: combined strategy vs. others

%				
交易场景	绩效指标	比较基准		
		趋势跟踪	均值回归	基准策略
1 盈余	卖出收益	5.4	3.0	4.6
2 平衡	收益率	21	17	33
3 不足	买入成本	-4.4	-0.1	-6.6

5 结束语

将火电企业生产计划与碳配额交易策略联合建模,基于碳配额盈余、平衡与不足3类场景构建差异化交易策略,并通过DMI指数动态判断市场趋势,最终发现“趋势跟踪+均值回归”策略组合相对单一策略和基准策略具有显著绩效优势。

基于上述结论,建议控排企业:第一,根据市场趋势强弱合理选择交易策略。在制定碳市场交易计划时可以参考DMI指数动态选择最优交易策略,避免单一策略在不同市场状态下的局限性。第二,结合配额分配场景差异化运用策略组合。配额盈余状态应以风险控制为主,可选择均值回归策略以稳健增值;配额不足状态须积极参与交易弥补缺口;配额平衡状态可结合市场趋势强弱灵活使用趋势跟踪与均值回归策略。第三,加快数字化转型,提升趋势识别与交易执行力。策略有效性的前提是对市场状态的准确识别。应加强大数据与人工智能技术应用,提升实时跟踪碳价走势、政策变化与国际市场联动能力。第四,重视市场波动下的策略调整。当市场不确定性较高时,应采用更严格的阈值设定,优先采用均值回归策略,并结合碳期货等金融工具对冲风险,提升碳资产流动性和风险抵御能力。D

参考文献:

- [1] 张希良,余润心,翁玉艳. 中外碳市场制度设计比较[J]. 环境保护, 2022, 50(22): 16-20.
ZHANG Xiliang, YU Runxin, WENG Yuyan. Comparison of institutional design of carbon markets at home and abroad [J]. Environmental Protection, 2022, 50(22): 16-20.
- [2] 唐将伟,黄燕芬,张祎. 国内碳排放权交易市场价格机制存在的问题、成因与对策[J]. 价格月刊, 2024, (2): 1-10.
TANG Jiangwei, HUANG Yanfen, ZHANG Yi. Problems, causes and countermeasures of price mechanism in domestic carbon emission rights trading market [J]. Price Monthly, 2024, (2): 1-10.
- [3] 金玉龙,曹敬,赵书恒,等. 电碳耦合市场下虚拟电厂多时间尺度调峰调度与利益分配[J]. 供用电, 2025, 42(10): 45-56.
JIN Yulong, CAO Jing, ZHAO Shuheng, et al. Research on operating technology and benefit allocation of virtual power plants for multi-timescale peak shaving services in an electricity-carbon integration market environment [J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(10): 45-56.
- [4] 牛华伟,曹玲玲. 碳价格如何影响企业绿色投资与信用风险——基于预期收益与违约成本的权衡分析[J]. 中国工业经济, 2024, (8): 118-136.
NIU Huawei, CAO Lingling. How does carbon price affect corporate green investment and credit risk—trade-off analysis based on expected returns and default costs [J]. China Industrial Economics, 2024, (8): 118-136.
- [5] 乔丰翔,陆涛,周晓鸣. 考虑电碳协同的火电发电商中长期交易策略[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(5): 106-112.
QIAO Fengxiang, LU Tao, ZHOU Xiaoming. Medium and long-term trading strategies for thermal power generators considering electricity-carbon coordination [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(5): 106-112.
- [6] 史守圆,余涛,黄杰,等. 考虑现金流和碳清缴周期的发电商电碳现货市场决策优化[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 40-50.
SHI Shouyuan, YU Tao, HUANG Jie, et al. Decision optimization of power generators in electricity and carbon spot markets considering cash flow and carbon settlement cycle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 40-50.
- [7] 曾慧,王美艳,李涛,等. 基于P2P的碳市场交易模型及电碳联合出清方法[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(3): 95-100.
ZENG Hui, WANG Meiyang, LI Tao, et al. P2P-based carbon market trading model and electricity-carbon joint clearing method [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(3): 95-100.
- [8] LIU Y, ZHOU G, ZHU Y. Trend factor in China: The role of large individual trading [J]. Review of Asset Pricing Studies, 2024, 14(2): 348-380.
- [9] MARTIN-VALMAYOR M A, GIL-ALANA L A, INFANTE J. Energy prices in Europe. Evidence of persistence across markets [J]. Resources Policy, 2023, 82: 103 546.
- [10] ZOURNATZIDOU G, FLOROS C. Hurst exponent analysis: Evidence from volatility indices and the volatility of volatility indices [J]. Journal of Risk and Financial Management, 2023, 16(5): 272.
- [11] ARNOTT R D, KALESNIK V, LINNAINMAA J T. Factor momentum [J]. Review of Financial Studies, 2023, 36(8): 3 034-3 070.
- [12] BENZ E, TRÜCK S. Modeling the price dynamics of CO₂ emission allowances [J]. Energy Economics, 2009, 31(1): 4-15.
- [13] BHOWMIK A, YANNELIS N C. Equilibria in abstract economies with a continuum of agents with discontinuous and non-ordered preferences [J]. Journal of Mathematical Economics, 2024, 115: 103 049.
- [14] LIU R, HE W, DONG H, et al. Application of dynamic weight mixture model based on dual sliding windows in carbon price forecasting [J]. Energies, 2024, 17(15): 3 662.
- [15] GURRIB I. Performance of the average directional index as a market timing tool for the most actively traded USD based currency pairs [J]. Banks and Bank Systems, 2018, 13(3): 58-70.
- [16] THARAVANIJ P, SIRAPRAPASIRI V, RAJCHAMAH K. Performance of technical trading rules: Evidence from Southeast Asian stock markets [J]. Springer Plus, 2015, 4(1): 552.

作者简介:

冯田丰(1978),女,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为碳排放、碳交易、碳足迹等;

王恩军(1972),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为电力市场、碳市场等;

刘潇(1982),男,天津人,博士研究生,研究方向为碳市场、电力市场模型开发等;

(责任编辑 方德康 崔素媛)