



控排企业碳市场收益测度 与战略选择

宋亚植¹, 李 银², 刘天森³, 李仲飞⁴

1 江苏师范大学 商学院, 江苏 徐州 221116

2 中山大学 管理学院, 广州 510275

3 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 哈尔滨 150001

4 南方科技大学 商学院, 广东 深圳 518055

摘要: 为早日实现碳减排目标, 中国政府自2013年起陆续建设碳交易试点, 并于2021年启动全国碳排放交易市场, 目的在于通过市场手段增加控排企业碳排放压力并激发其减排投资意愿。碳价格的引入要求控排企业根据自身发展需求参与碳市场投资, 以此降低交易风险。已有研究聚焦于对碳市场建设规则和碳试点运营效率的制定和评价, 较少从企业收益视角剖析碳市场带来的机遇和挑战。

从企业视角出发, 假设控排企业均为风险厌恶型, 且均以证券投资方式抵消碳市场风险。基于此, 运用随机微分方程拟合碳价格和股票价格, 并以完备市场条件下风险对冲为标准测量不同规模控排企业参与碳市场交易的终期收益。选择上海环境能源交易所碳现货价格为研究对象进行实证检验, 量化碳市场参与程度与企业终期收益之间的关系。

研究表明, 现阶段中国碳市场运营有利于控排企业实现技术升级和节能减排。但由于碳价格的波动性和实际交易的聚集性, 不同资本规模的控排企业其碳交易终期收益存在差异。资本雄厚且可完全对冲交易风险的控排企业获得的回报明显高于部分对冲交易风险的控排企业。同时, 当前碳市场的投资意义较弱, 不同规模的控排企业需要在详查自身碳排放基础上, 提升碳资产管理能力, 并制定符合企业能力水平和未来规划的碳市场投资策略, 运用碳交易工具解决因减排投资不足而制约企业长期发展的问题。

研究结果有助于控排企业明确碳市场风险、量化碳市场收益, 为控排企业根据其自身发展阶段参与碳市场交易提供理论依据和实践选择。

关键词: 碳市场; 控排企业; 风险对冲; 终期收益; 投资策略

中图分类号: F830.9

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1672-0334.2021.06.001

文章编号: 1672-0334(2021)06-0003-12

收稿日期: 2021-04-12 **修返日期:** 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(71991474, 71721001); 中国博士后科学基金(2021T140758); 教育部人文社会科学研究项目(20YJC630123); 黑龙江省哲学社会科学研究规划项目(19JLC117)

作者简介: 宋亚植, 管理学博士, 江苏师范大学商学院讲师, 研究方向为碳金融和碳交易制度设计等, 代表性学术成果为“Linking carbon market and electricity market for promoting the grid parity of photovoltaic electricity in China”, 发表在2020年第211卷《Energy》, E-mail: songyazhi@jsnu.edu.cn

李银, 理学博士, 中山大学管理学院博士后, 研究方向为金融工程等, 代表性学术成果为“A fuzzy stochastic model for carbon price prediction under the effect of demand-related policy in China's carbon market”, 发表在2019年第157卷《Ecological Economics》, E-mail: liyin57@mail.sysu.edu.cn

刘天森, 管理学博士, 哈尔滨工程大学经济管理学院副教授, 研究方向为能源经济和环境治理等, 代表性学术成果为“Bridging production factors allocation and environmental performance of China's heavy-polluting energy firms: the moderation effect of financing and internationalization”, 发表在2021年第222卷《Energy》, E-mail: tiansen0328@hrbeu.edu.cn

李仲飞, 管理学博士, 南方科技大学商学院讲席教授, 研究方向为计量金融学、金融经济学、金融工程和风险管理等, 代表性学术成果为“Data-driven robust mean-CVaR portfolio selection under distribution ambiguity”, 发表在2019年第1期《Quantitative Finance》, E-mail: lizf6@sustech.edu.cn

引言

据北京绿色交易所预测,若钢铁、建材等工业行业全部纳入交易范围,中国碳市场交易数量将达到70亿吨,价值超过人民币4000亿元,这一潜力巨大的市场将大幅度提高碳排放成本并催生新的产业机会。通过碳市场交易盘活持有碳排放权,控排企业可获得低成本减排融资,这有助于其保障节能减排资金。而在碳配额逐步缩减的预期下,只购买减排指标但不参与碳市场,将增加控排企业履约成本,加重企业负担。因此,理清碳市场收益是控排企业制定碳市场战略的重要前提。

企业选择以何种方式进行减排投资的基础是可预期的成本或收益。然而,碳配额价格由市场决定,配额分配由政府决定,市场与政府之间的冲突使已有碳价格在世界范围内均呈现剧烈波动。同时,减排项目具有前期投入大、经济效益低、投资回报周期长等特点,若大多数排放企业对减排成本和减排投资收益没有稳定的预期,仅将碳资产作为减排的负债,必将减缓企业技术革新和新能源产业的发展速度,最终可能导致碳排放交易体系失效。因此,调动企业节能减排积极性需要厘清碳排放市场化对企业效益的实际影响。

基于上述背景,本研究从理论和实际两方面量化碳市场中资金规模和市场参与度对控排企业终期收益的影响。具体来说,通过构建不同风险类型下碳市场投资与终期收益之间的微分方程理论模型,基于上海环境能源交易所碳现货历史数据,量化不同投资策略下的企业收益,并给出企业应对碳市场风险的建议。

1 相关研究评述

使用市场手段将温室气体排放这一外部成本内部化得到越来越多学者的认同^[1-2]。立足于国际碳交易系统,排污权市场化有助于降低碳减排成本,提升企业减排积极性,推进经济低碳转型^[3],而推进节能减排的关键在于引入健全的碳排放交易系统^[4-5]。对比较为成熟的国际碳市场,目前中国正处于国际碳交易价值链的最低端,严重阻碍中国在未来排放量竞争中的话语权^[6-7]。随着全国碳市场的建设和营运,社会组织和企业需要更加深入地理解碳市场风险的来源和作用机理,用风险控制思维和更加积极的态度面对即将到来的碳定价时代^[8-9]。

1.1 碳市场风险来源及其表现

在碳市场交易中,不确定的因素主要来自于政策、经济发展、市场透明度和市场流动性等。

首先,政策的变动或不确定是碳市场风险的主要来源^[10-11]。碳市场属于政策依赖型市场,体现为交易品种、交易范围、交易规则和监督管理均由政府确定^[12-13]。FAN et al.^[14]认为,在中国试点和全国碳市场中,政策因素直接影响碳市场的存续、覆盖企业的范围、交易价格的高低和成交量的大小等市场要素。

其次,宏观经济发展的形态和产业结构的调整也

会决定碳市场风险。作为金融市场的一部分,碳市场无可避免地受到经济形势的影响^[15]。WEN et al.^[16]发现,影响碳价格的主要因素依次为经济增长水平、能源价格和极端天气。其他学者也从外部环境和内部机制两方面探讨影响碳市场风险的各种因素,包括全球经济、金融市场、电力价格和生产结构等^[17-19]。

再次,碳市场面临信息不对称风险。作为一个新兴市场,碳市场的运营制度和法律体系不成熟,容易因制度设计不合理、价格发现不明显、定价机制不完善等信息不对称引发风险^[20]。在碳市场信息传递方面的研究中,CHESNEY et al.^[21]构建碳排放市场动态现货价格内生模型,研究表明信息不对称是碳市场交易量低的重要原因,严重降低了市场有效性。

最后,碳市场面临的重大风险是市场流动性过低。当前在中国碳市场中大部分控排企业都是风险厌恶型,使分配给控排企业的配额几乎全部作为企业资产留存,难以真正进入市场^[22-23]。政府层面刺激碳市场流动性需要以牺牲碳价格为代价,通过多发配额补平控排企业续存的配额量。然而多发的配额又会导致市场价格下跌,流动性进一步下降,循环往复,碳市场陷入无解悖论之中。ZHANG et al.^[24]认为,通过政府在制度设计上的不断革新,将配额流入愿意交易的主体手中,实现真正意义的提升碳市场流动性。虽然政府采取了一系列诸如扩大市场主体等措施提振流动性,但如何保证碳市场长期流动性水平,已有研究还未达成共识^[25-27]。

1.2 碳市场风险测量

碳市场具有类金融市场属性,价格波动大,市场不确定性强。风险测量是保证企业在碳市场中取得收益的重要前提,当前在关于碳市场风险测量的研究方面,主要针对欧盟碳市场和中国碳市场进行风险测量实践。在碳市场风险测量的具体方法方面,主要是以时间序列模型为核心,兼具其他随机分析方法,在碳价格基础上量化不同时期碳市场风险并探索其风险来源。

关于欧盟碳市场风险的测量,主要基于GARCH模型和VaR模型。在GARCH模型基础上,FENG et al.^[28]的研究表明,欧盟排放交易体系(European Union Emission Trading Scheme, EU ETS)第1阶段风险显著高于第2阶段风险,表明市场成熟度是降低碳市场风险的重要因素。对比EU ETS与芝加哥碳市场中的风险,田园等^[29]发现,芝加哥碳市场的风险波动高于EU ETS,表明覆盖范围更大的碳市场拥有更好的抗风险能力。在VaR模型基础上,ZHU et al.^[30]认为将经验模态分解与多尺度VaR相结合的测量方法,可以更好地拟合碳价格波动特征并识别碳市场风险;ADEKOYA et al.^[31]发现,金融市场的不确定性对碳市场存在显著的不对称风险溢出效应,且与其他能源市场相比,碳市场不仅是金融风险冲击的净接收者,还是其他能源市场风险冲击的净接收者。

关于中国碳市场风险的测量,主要是针对已有试点市场进行的测量。杜莉等^[32]基于配额价格测量6

个碳试点市场交易风险,发现碳市场波动性最大的试点市场为深圳,最小的为湖北。对比中国碳试点市场与EU ETS,翟大恒^[33]基于日交易风险值的研究表明,中国碳试点市场风险显著高于EU ETS。在选取碳市场风险测量标准方面,邱谦等^[34]对比不同分布GARCH模型的风险识别效果,发现t分布对刻画试点市场风险更为有效,且在t分布下湖北碳市场交易风险最大;张志俊等^[35]以2013年至2017年北京市碳排放权交易价格为研究对象,发现ARMA-GARCH族模型估计和测量碳市场风险具有更高的精度。

当前学术界已针对碳市场的高风险性达成共识,且认为随机模型是测量碳市场风险的有效方法。然而,由于影响碳市场风险的因素较多,使当前如何降低碳市场风险难以形成统一方向。同时,由于碳市场风险的多样性和重叠性,导致已有研究更多聚焦于评价碳市场风险水平,少有量化不同类型风险对市场的影响路径和影响周期。

1.3 碳市场风险对纳入企业的影响

与传统商品市场不同的是,政府主导的碳市场具有更强的政策性,使企业面临更高的市场不确定性风险^[36]。一方面,与金融和石油等成熟市场不同,国际上运行成功的碳市场案例较少,可供借鉴的经验有限。以目前最大的碳排放权交易市场欧盟排放权交易体系为范本,基于资本资产定价模型分析其系统和非系统风险,结果表明碳市场具有高风险性,且人们对该市场的认知程度进一步加剧市场风险,表现为高收益预期增加投资风险,低收益预期也不会降低该市场风险^[37]。分析欧盟排放权配额(European Union Allowance, EUA)期货市场的价格,结果表明EUA期货收益率分布呈显著的集聚效应,政策性事件对其影响显著,且价格下跌的风险高于价格上涨的风险^[38]。从经济地理学的角度,KNOX-HAYES^[39]的研究表明,环境因素影响下的碳市场不能很好地履行该市场的金融属性,可能引发系统性的金融风险。另一方面,中国依旧是没有完全实现工业化的发展中国家,其不完善和不健全的金融和能源市场必将在一定程度上阻碍碳市场发展^[40]。潘家华^[41]认为,中国碳市场的主要参与者为高能耗行业中的用能大户,而相对封闭的碳市场使碳价格与能源市场需求之间的关系过于紧密,引发碳排放权交易的从属性和被动化,导致碳价格信号的失真;ZHAO et al.^[42]从市场有效性角度考察当前中国的碳市场,认为现阶段中国已有的碳试点市场是弱有效市场,市场不确定程度较高。因此,企业需要提高对碳交易的认识,改善对碳资产的管理能力,增强对碳贸易政策的认识水平。

碳市场不确定性风险的存在通常会增加碳排放企业排污成本,损害企业利益。企业面临的减排成本分为直接成本和间接成本两部分,实现利润最大化的企业必将最小化减排成本^[43]。然而,因为碳成本不确定程度较高,企业更倾向于选择降低直接成本的投资减排技术和购买排放权,而忽视碳配额的

投资组合以灵活地对冲减排风险,增加了减排的间接成本^[44]。孙雨薇等^[45]估算中国企业对于碳市场中碳信用的支付意愿,发现企业对全国碳市场运行时间与其能源价格压力之间存在显著的负相关,而企业对碳市场的接受程度与其对减排技术的了解程度呈显著的正相关。因此,降低用能成本和提高企业减排技术是帮助企业抵挡碳市场不确定性、积极参与市场交易的重要因素。

不确定性风险带来的碳市场价格波动又为企业带来新的机遇。①碳市场将在一定程度上为能源行业腾挪出更多的发展空间。由于能源行业具有排放集中、规模大和数据基础相对较好的特征,故全球大多数碳市场均在建立之初将能源行业纳入其中,免费给予大量配额,从而帮助其因为出售大量富余配额而获得大量利润^[46]。②碳市场的出现为企业降低资产闲置风险提供了新的选择。善于利用碳市场规则的企业可以因地制宜地开发碳金融产品,有效盘活碳资产,通过运用多种形式的金融工具,有效降低企业资金的使用成本,以实现碳资产效用最大化^[47]。

1.4 文献评述

目前中国对碳市场风险的研究主要集中在碳市场的建设风险、风险影响因素的识别、配额分配制度风险和初始定价风险等市场层面,在微观的企业层面研究成果较少,对市场风险控制领域的研究更少,且在已有的碳市场风险控制领域的主要成果更多集中于碳市场整体性系统风险研究,对排放企业在市场中面临的风险研究几乎空白。然而,面对即将推广的碳市场,企业如何根据自身发展要求,及时准确做出市场决策,抵抗碳市场风险,确保自身利益,是企业关心的核心问题。因此,本研究以风险度量理论为基础,探索风险条件下企业应对碳市场时应该采取的策略。

2 研究方法

基于随机分析方法的内涵,本研究使用标准布朗运动拟合碳价格和股票价格走势,进而在完备市场假设下构建碳市场投资的对冲策略,并基于终期收益表达式量化不同融资规模企业的碳市场收益。

碳市场是引导控排企业节能减排的核心因素源于其对企业成本与收益预期的调节作用。在实际交易中,终期碳收益由投资策略决定,而控排企业的资金规模是影响碳收益的关键。当前,碳市场交易以工业企业为主,其融资能力较弱。为分析不同融资能力控排企业碳市场收益,本研究将控排企业划分为可完全风险对冲和不完全风险对冲两大类。在企业资金规模雄厚时,任何损失均可由其他投资收益弥补,且任何收益均可由再投资而扩大,即可完全风险对冲。与之相对的,当企业资金规模不足,需要通过投资策略使其净损失最小,并在此基础上争取相应利润,即不完全风险对冲。

在此说明的是,虽然免费配额是当前碳市场配额

的主要提供方式,但随着碳市场逐渐成熟和减排持续推进,有偿购买配额将是未来碳市场的主流。本研究考虑碳市场的极端情况——配额获取全部源于有偿购买,进而碳排放权将被视为企业面临的一项成本,并引发相应财务风险。为降低该风险,企业将配额看作一种负债,并试图通过投资组合对冲这部分负债。

2.1 基本假设

企业碳排放权均为有偿购买,且企业全部碳排放权均来自初期购买行为。假设企业初始时刻购买 $Q_1(Q_1 > 0)$ 数量的碳排放权,到终端时刻 T 共消耗 Q_2 碳排放权。从初期看,终端时刻的碳排放权满足一般股票市场价格的假设。因此,企业在终期可能因技术的改变、管理的增强使碳排放量减少,获得碳交易带来的收益,也可能因碳排放量的增加引起排放权的不足而负担更大的减排成本。鉴于控排企业碳市场投资可为减排技术升级提供融资,故本研究不考虑企业为降低碳排放而增加的减排技术成本。

假设交易初期,碳排放权是企业面临的一项成本,以碳配额形式存在。为测量该成本引发的财务风险,将其看作一种负债,其满足一般债务的表达形式。通常,借款是债务的主要来源,故本研究首先以银行借款构建 t 时刻由购买配额引起的负债表达式,即

$$d\bar{S}_t = \bar{S}_t r_t dt \quad (1)$$

其中, t 为时刻, $t = 0, 1, \dots, T$, $t = 0$ 表示初始时刻, $t = T$ 表示终端时刻; \bar{S}_t 为企业 t 时刻购买碳配额形成的负债; r_t 为银行无风险利率。

在完备的金融市场中,任何负债 C 都能在一个有限的时间段内得到完全的保值。考虑含有 h 支股票的投资组合, h 支股票的价格集合为 Y_t , $Y_t = (Y_t^1, Y_t^2, \dots, Y_t^h)$, 其中任意一支股票 t 时刻的价格满足下面的随机微分方程,即

$$dY_t^i = Y_t^i (b_t^i dt + \sum_{j=1}^h \sigma_t^{i,j} dB_t^j) \quad (2)$$

其中, i 和 j 为股票, $i = 1, \dots, h, j = 1, \dots, h, i \neq j$; Y_t^i 为第 i 支股票 t 时刻的价格, $Y_t^i > 0$; b_t^i 为第 i 支股票价格的漂移率; $\sigma_t^{i,j}$ 为股票价格的波动率矩阵; B_t^j 为 j 股票的标准布朗运动。

与一般市场相似,本研究认为在流动性充分的碳市场,碳配额价格受所在时点碳配额的市场供需决定。则 t 时刻碳配额的价格为

$$dS_t = S_t (a_t dt + \sigma_0 dB_t) \quad (3)$$

其中, S_t 为 t 时刻碳配额价格,特别地,当 $t = 0$ 时, S_0 为初始时刻碳配额价格; a_t 为碳配额价格的漂移率; σ_0 为碳配额价格的波动率,是一个常数。在此,本研究假设驱动股票价格和碳配额价格的随机项均为标准布朗运动 B_t 。

2.2 风险测量

假设企业在 t 时刻选择的投资策略组合为 δ_t , $\delta_t = (\delta_t^1, \dots, \delta_t^h)$, δ_t^i 为投资于第 i 支股票的股票数量,并将剩余资本投入碳市场。根据终端时刻碳配额持有量是

否充足,控排企业的资产总值可分为3种情形。

情形1: 当 $Q_2 > Q_1$, t 时刻企业拥有的全部资产价值为

$$dX_t = (X_t - \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j) r_t dt + \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j (b_t^j dt + \sum_{j=1}^h \sigma_t^{j,j} dB_t^j) + (Q_1 - Q_2) e^{-r_t} S_t (a_t dt + \sigma_0 dB_t) \quad (4)$$

其中, X_t 为在 t 时刻企业拥有的全部资产的价值, $e^{-r_t} S_t (a_t dt + \sigma_0 dB_t)$ 为终端时刻碳配额价格对当前时刻的贴现值。

情形2: 当 $Q_2 = Q_1$, t 时刻企业拥有的全部资产价值为

$$dX_t = (X_t - \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j) r_t dt + \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j (b_t^j dt + \sum_{j=1}^h \sigma_t^{j,j} dB_t^j) \quad (5)$$

情形3: 当 $Q_2 < Q_1$, t 时刻企业拥有的全部资产价值为

$$dX_t = (X_t - \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j) r_t dt + \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j (b_t^j dt + \sum_{j=1}^h \sigma_t^{j,j} dB_t^j) - (Q_2 - Q_1) e^{-r_t} S_t (a_t dt + \sigma_0 dB_t) \quad (6)$$

可见,这3种情况可以合并为一个等式,即

$$dX_t = (X_t - \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j) r_t dt + \sum_{j=1}^h \delta_t^j Y_t^j (b_t^j dt + \sum_{j=1}^h \sigma_t^{j,j} dB_t^j) + (Q_1 - Q_2) e^{-r_t} S_t (a_t dt + \sigma_0 dB_t) \quad (7)$$

根据(7)式,如果将负债 C 以终端时刻的碳配额未定权益进行对冲,则在初始时刻有

$$C(0) = \hat{E} \left(\frac{C}{S_T} \right) \quad (8)$$

其中, $C(0)$ 为由风险中性定价给出的初始投资额, S_T^0 为终端时刻碳配额价格在初始时刻的贴现值, \hat{E} 为风险中性测度下的期望。若初始投资额下的各股票投资额为 $v(x_1, \dots, x_h)$, x_1, \dots, x_h 为投资给各股票商的资本,投资组合为 $\{\delta_t, 0 \leq t \leq T\}$, 则若希望在 T 时刻为碳排放权产生的成本完全保值,只需要满足 t 时刻第 i 支股票的投资额为 $\delta_t^i(t)$, $\delta_t^i(t) = \frac{\partial v(t, x_1, \dots, x_h)}{\partial x_i} x_i$ 。

由(7)式可知,碳交易的存在可能给企业带来额外成本,促使控排企业主动减排。但若控排企业资金雄厚,其他投资收益完全弥补潜在碳交易损失,则碳市场对高排放情形的成本传导将失效。下面以完全对冲和不完全对冲条件下控排企业的终期收益为基础,阐释控排企业资金规模对其碳市场参与度和减排积极性的影响。

2.3 完全对冲下的终期收益

假定 A 为可容许的所有投资组合的集合,若初始资本 $x \geq C(0)$, 取 $A = \delta_t^i(t) = \frac{\partial v(t, x_1, \dots, x_h)}{\partial x_i} x_i$, 即初始资本可以完全对冲碳减排成本带来的负债损失,则企业在终期获得完全收益。

定理1 完全对冲条件下,控排企业在终期的总收益为

$$\begin{aligned}
X_T = & \sum_{i=1}^h Y_0^i \exp\left\{\int_0^T [(X_t - C(0))b_t^i - \right. \\
& \left. \frac{1}{2}[X_t - C(0)]^2(\sigma_t^i)^2]dt + \int_0^T [X_t - C(0)]\sigma_t^i dB_t^i + \right. \\
& (Q_1 - Q_2)S_0 \exp\left\{\int_0^T [a_t - \frac{1}{2}(\sigma_0)^2]dt + \right. \\
& \left. \int_0^T \sigma_0 dB_t\right\} - Q_1 \int_0^T \bar{S}_t r_t dt \quad (9)
\end{aligned}$$

证明:首先,求投资组合的终端价值。由(2)式可知, t 时刻第*i*支股票的价值为

$$dY_t^i = [X_t - C(0)]Y_t^i b_t^i dt + [X_t - C(0)]Y_t^i \sigma_t^i dB_t^i \quad (10)$$

其中, σ_t^i 为第*i*支股票价格的波动率。对(10)式运用Itô公式得

$$\begin{aligned}
& \{[X_t - C(0)]b_t^i Y_t^i \frac{\partial f}{\partial S_t} + [X_t - C(0)]Y_t^i b_t^i \frac{\partial f}{\partial t} + \\
& \frac{1}{2}[X_t - C(0)]^2(Y_t^i)^2 \sigma_t^i \frac{\partial^2 f}{\partial (Y_t^i)^2}\}dt + [X_t - C(0)]Y_t^i \sigma_t^i \frac{\partial f}{\partial Y_t^i} dB_t^i \quad (11)
\end{aligned}$$

其中, $f = \ln S_t$,则

$$\begin{aligned}
Y_t^i = & Y_0^i \exp\left\{\int_0^t \left\{[X_t - C(0)]b_t^i - \frac{1}{2}[X_t - C(0)]^2(\sigma_t^i)^2\right\} dt + \right. \\
& \left. \int_0^t [X_t - C(0)]\sigma_t^i dB_t^i\right\} \quad (12)
\end{aligned}$$

则*T*时刻,投资组合的全部价值为

$$\begin{aligned}
Y_T = & \sum_{i=1}^h Y_0^i \exp\left\{\int_0^T \left\{[X_t - C(0)]b_t^i - \frac{1}{2}[X_t - C(0)]^2(\sigma_t^i)^2\right\} dt + \right. \\
& \left. \int_0^T [X_t - C(0)]\sigma_t^i dB_t^i\right\} \quad (13)
\end{aligned}$$

其次,由(1)式可知,*T*时刻碳排放权的无风险负债成本为

$$\bar{S}_T = \int_0^T \bar{S}_t r_t dt \quad (14)$$

其中, \bar{S}_T 为全部交易时期购买碳配额形成的负债。

完全对冲条件下,终期排放权收益可完全弥补负债成本。因此,终期排放权的收益可表示为

$$S_T = (Q_1 - Q_2)S_0 \exp\left\{\int_0^T [a_t - \frac{1}{2}(\sigma_0)^2]dt + \int_0^T \sigma_0 dB_t\right\} \quad (15)$$

按照收益相加成本相减原则,得到定理1完全对冲条件下排放企业的终期收益。

2.4 不完全对冲下的终期收益

若企业的初始资本为*x*, $x < C(0)$,即企业不能通过雄厚的原始资本对冲碳排放权交易带来的风险。在此,引入最小期望净损失度量该条件下企业资产的风险测量^[48],即

$$V(x) = V(x; C) \inf_{x \in A} \exp\left(\frac{C - X_T^{\delta, \delta}}{S_t}\right) \quad (16)$$

其中, V 为企业资产的风险测量函数, δ 为使(16)式最小的可容许投资组合。

定理2 不完全对冲风险最小投资策略下的控排企业终期收益为

$$\begin{aligned}
X_T^{\delta, \delta} = & CI_{\{\zeta_T > 1\}} + AI_{\{\zeta_T > 1\}} - UI_{\{\zeta_T = 1\}} + \\
& (Q_1 - Q_2)S_0 \exp\left\{\int_0^T [a_t - \frac{1}{2}(\sigma_0)^2]dt + \right. \\
& \left. \int_0^T \sigma_0 dB_t\right\} - Q_1 \int_0^T \bar{S}_t r_t dt \quad (17)
\end{aligned}$$

其中, ζ 为随机系数; $I_{\{\zeta_T = 1\}}$ 为右连续单调递增函数; Z_T 为关于 \mathcal{F} 循序可测的; U 为随机变量,满足 $0 \leq U \leq C - A$ 。

定理2的证明类似于CVITANIĆ et al.^[48]中命题3.1的证明。

与定理1中相同,碳排放权的无风险负债成本由(14)式表示,终期排放权的收益由(15)式表示。按照收益相加成本相减原则,得到定理2的结果。

定理1和定理2的不同仅体现在股票市场的收益形式上。完全对冲情形下, Q_1 与 Q_2 的差值仅影响企业收益,不会引起生产成本的改变;在不完全对冲情形下,企业在其他市场的收益仅能部分抵消碳交易的潜在损失。因此,不完全对冲条件下,控排企业必将更加重视减排,努力增加碳市场收益。

3 碳市场案例分析:数据收集和处理

3.1 数据来源

上文从理论上探讨碳交易对不同资金规模控排企业的成本和终期收益的影响,下面从实践的角度量化具体影响程度,同时得到企业采取不同应对策略可实现的损失降低或收益提升范围。鉴于理论模型中的参数众多,首先对数据进行预处理。

本研究选取上海环境能源交易所2017年至2019年3个履约周期日交易收盘数据作为研究对象,碳市场履约以一个自然年为周期,在年中对上一年情况进行核查。以2017年履约周期为例,交易时间为2017年7月至2018年6月。选取该数据的原因有3个方面:①上海环境能源交易所是首批试点市场,具有成交数量较大、政策体系较完整、信息发布公开性程度较高和交易价格连续等优势,可满足本研究所需的连续交易日价格波动条件;②上海环境能源交易所纳入的行业多、企业覆盖范围广,可满足本研究企业类型中大型和中小型资金规模控排企业参与的基本假设;③上海环境能源交易所将作为全国碳市场交易中心,对该市场进行企业层面的风险测量和战略选择可最大程度地支持全国统一碳市场建设。

3.2 参数估计

本研究随机微分方程中参数估计的基础全部为真实交易数据。参考肖庆究^[49]的研究,随机微分方程的参数估计过程为:将 $[0, T]$ 区间等分成 n^2 个小区间,记为 $T_l = \frac{l}{n}$, $l = 1, \dots, n^2$,则有

$$n \rightarrow \infty \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{l=2}^{n^2} (S_{T_l} - S_{T_{l-1}})^2 \xrightarrow{P} (\sigma_0)^2 \\ n \sum_{l=2}^{n^2} (S_{T_l} - S_{T_{l-1}})^2 \xrightarrow{P} a_t \\ 2 \sum_{l=2}^{n^2} (S_{T_l})^2 \end{cases} \quad (18)$$

其中, P 为依概率收敛。

以(3)式为例, 估计式中的参数。假定可在 $[0, T]$ 时间段内等间隔地观察单位碳排放价格数据 S_t , 则参数 a_t 和 σ_0 的相合估计量为

$$\hat{a}_t = \frac{n \sum_{t=2}^{n^2} (S_{T_t} - S_{T_{t-1}})^2}{2 \sum_{t=2}^{n^2} (S_{T_t})^2} \quad \hat{\sigma}_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n^2} (S_{T_t} - S_{T_{t-1}})^2 \quad (19)$$

其中, \hat{a}_t 为 a_t 的相合估计量, $\hat{\sigma}_0$ 为 σ_0 的相合估计量。由(19)式得出的估计量非负。运用(19)式, 得到上海环境能源交易所3年履约期日收盘价格的波动率和漂移率。

4 案例分析和投资策略

对冲是一种通过特定金融工具可实现的、以减少或消除风险暴露概率为目标的风险控制手段。理论上, 只要市场中存在一个与风险暴露头寸方向相反、数额相同的对冲头寸, 就可实现风险的完全对冲。由于存在市场波动和策略选择等一系列不确定因素, 实现完全对冲的条件较为苛刻, 更多企业采取不完全对冲策略。一般而言, 大型企业拥有独立融资部门, 资本雄厚, 市场交易经验丰富, 可能实现完全对冲; 而中小型企业资金存量和市场投资意愿均较低, 更多是以不完全对冲规避风险。因此, 本研究以本金存量和抗风险能力作为划分碳市场中企业规模的标准。完全对冲情况即控排企业在初始时刻拥有雄厚资金, 其投放于其他风险资产中的收益可以完全对冲由碳排放价格引发的负债; 不完全对冲情况即企业在初始时刻拥有的资金量在购买碳排放权之后不足以投放于其他风险资产以完全对冲由碳排放价格引发的负债。

碳市场运营初期, 控排企业关注的重点在于明确市场给企业带来的收益(或损失)。具备商品属性的

碳排放权参与碳市场交易的前提是企业持有相应配额, 同时履约期持有配额与使用配额的差值决定企业将承担碳交易损失或取得碳交易收益。因此, 本研究将重点放在初始碳排放权和终期碳排放权持有量, 探索其对企业终期收益的影响。同时, 由于不完全对冲条件下企业面临可容许投资规模对终期收益的影响, 本研究将进一步展示这两组变量之间的关系。

4.1 完全对冲下的终期收益和投资策略

控排企业终期碳排放权持有量与碳排放量的差值决定企业碳市场收益。由于控排企业参与碳市场交易的积极性不高, 目前全国各试点市场普遍存在履约期内量价齐升、履约期外有价无市现象, 控排企业倾向于购买初始时刻碳排放权以进行碳市场投资、购买终端时刻碳排放权以完成履约。在此背景下, 需要重点考察初始碳排放权购买比例和终期持有碳排放权数量与控排企业碳市场终期收益之间的关系。

假定初始时刻企业拥有的资金量最多可购买500单位的金融资产(碳配额或股票), 履约期内交易获得碳配额120单位, 终期需要220单位碳配额。

(1) 考察企业初始碳排放权与终期总收益之间的关系, 结果见图1。

图1中横坐标表示履约期内企业持有的碳排放权增加量, 纵坐标表示完全对冲条件下企业获得的终期总收益, 图中3条曲线分别代表企业购买的100、200、300单位初始碳排放权。总体上, 图1中各履约年走势差异不大, 总收益随着购买的初始碳排放权的增加呈现出不同速率和两种增长趋势。首先, 在持有的初始碳排放权总量较低时, 总收益随购买的初始碳排放权的增加而迅速增加。其次, 在持有的初始碳排放权总量较高时, 总收益随购买的初始碳排放权的增加而减少。分析这一现象产生的原因, 由于当前碳市场的流动性较低, 该市场的收益绝大

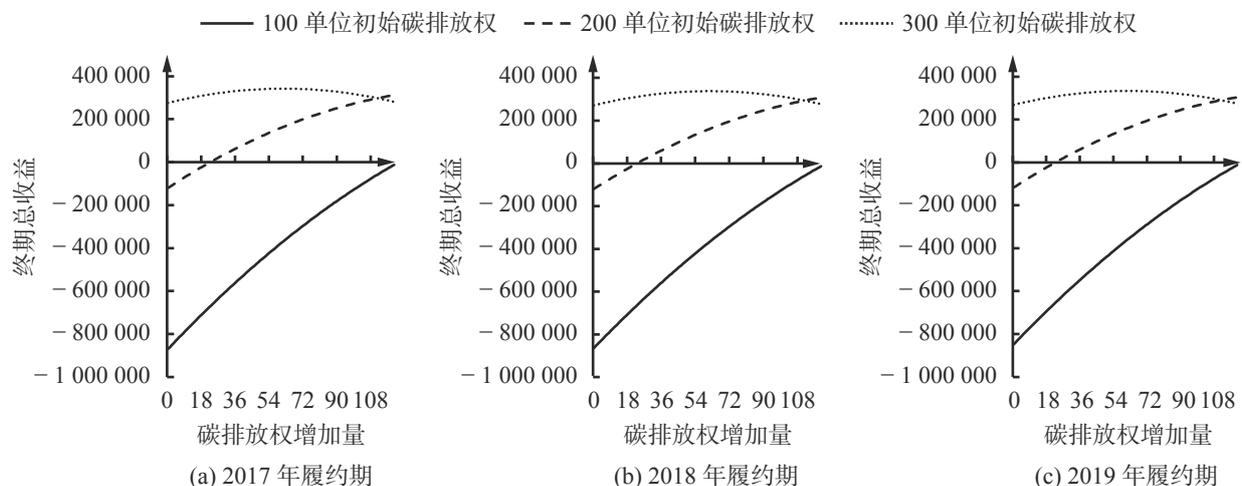


图1 完全对冲条件下控排企业购买的初始碳排放权与总收益关系

Figure 1 Relationship between Initial Carbon Emission Rights and Total Income of Emission Control Firms under the Condition of Complete Hedging

部分来源于终期碳排放权交易,合理的购买初始碳排放权可将剩余资金进行频繁的投资组合,带来可观的风险投资利润,而过量的购买初期碳排放权将挤占企业进行其他风险投资的资金空间。因此,在该种条件下,企业在购买初始碳排放权的同时应积极参与投资组合交易,以降低市场不确定性带来的风险,在保证自身碳排放权足够使用的同时获得投资组合和剩余碳排放权的双重收益。

(2)考察企业终期碳排放权与终期总收益之间的关系,结果见图2。

图2中横坐标表示整个履约企业参与碳交易获得的碳排放权增加量,纵坐标表示完全对冲条件下企业获得的终期总收益,图中3条曲线分别代表企业为履约而留存的不同数量碳排放权(整个履约期均不参与交易)。由图2可知,总收益随着终期拥有碳排放权的增加呈现出3种趋势。首先,终期拥有的碳排放权越少,企业获得的总收益增加速率越大。其次,终期拥有的碳排放权越大,企业获得的总收益将减少。最后,终期碳排放权拥有数量适中时,呈现出企业总收益先上升后下降的趋势。分析其原因,本研究认为,由于企业拥有的资金量限制,购买碳市场的配额应在合理范围之内。若超出该范围,投资碳市场将挤占企业其他投资空间,反而降低总收益。本研究中,碳市场风险均可对冲,故即使配额持有量不足以履约,也可由投资组合抵消该部分风险。过多的配额持有需占用大量资金进行投资组合,当其超出假设的资金持有总量,再增加碳配额的购买则会导致总收益降低。同时,当前碳市场处于初期发展阶段,市场交易频率较低,碳价格波动性大,持有配额至终期的风险性远高于收益性。因此,终期拥有的碳排放权在完成履约且无留存时可使企业总收益最大。

综上,在完全对冲条件下,企业应充分认识碳市场的价格波动性和流动性风险,严格控制碳市场的

参与程度。同时,企业不应盲目地追求多购买初期碳配额以保证终期碳排放权数量的增长,而是通过技术升级或参与市场交易获得终期的碳排放权,提高总收益。

4.2 不完全对冲下的收益

假定初始时刻企业拥有的资金量可购买500单位的金融资产(碳配额或股票),终期需要220单位碳配额,未定权益和投资组合均为定值100。

(1)考察企业购买的初始碳排放权与终期总收益之间的关系,结果见图3。

图3中横坐标表示整个履约企业参与碳交易获得的碳排放权增加量,纵坐标表示不完全对冲条件下企业获得的终期总收益,图中曲线代表企业购买的100和200单位初始碳排放权。由图3可知,不完全对冲条件下,控排企业总收益与购买的初始碳排放权之间呈线性关系,且总收益随着购买的初始碳排放权数量的增加而减少。分析其原因,在整个交易时期内,由于控排企业拥有的投资资金不足,致使金融市场中投资组合的收益不足以抵消投放于购买的初始碳排放权上的损失。虽然终期的碳排放收益能够抵消一部分损失,但由于碳市场价格不平稳,波动率大,且购买更多的初始碳排放权意味着更多的初期碳市场投资,故该种情景下,控排企业会因参与碳市场程度的加深而产生亏损。因此,现阶段控排企业资金不足时,应审慎参与碳交易市场,仅购买企业自身需要的初始碳排放权。

(2)考察控排企业拥有的终期碳排放权与企业总收益之间的关系,结果见图4。

图4中横坐标表示整个履约企业参与碳交易获得的碳排放权增加量,纵坐标表示不完全对冲条件下企业获得的终期总收益,图中曲线代表企业为履约而留存的不同数量碳排放权(整个履约期均不参与交易)。由图4可知,不完全对冲条件下,控排企业总收益与终期碳排放权之间呈线性关系,且总收益

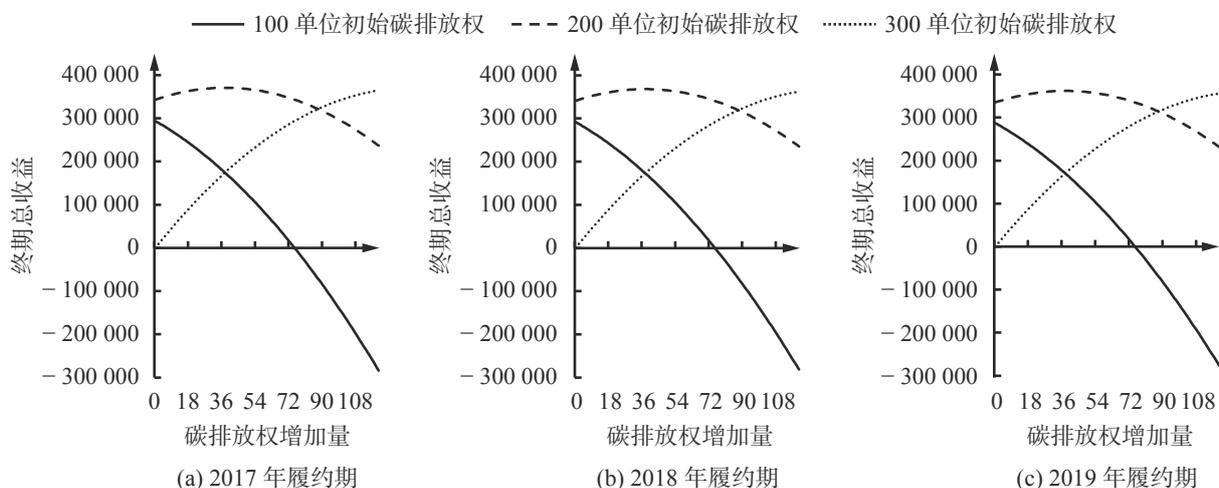


图2 完全对冲条件下控排企业拥有的终期碳排放权与总收益关系

Figure 2 Relationship between Terminal Carbon Emission Rights and Total Income of Emission Control Firms under the Condition of Complete Hedging

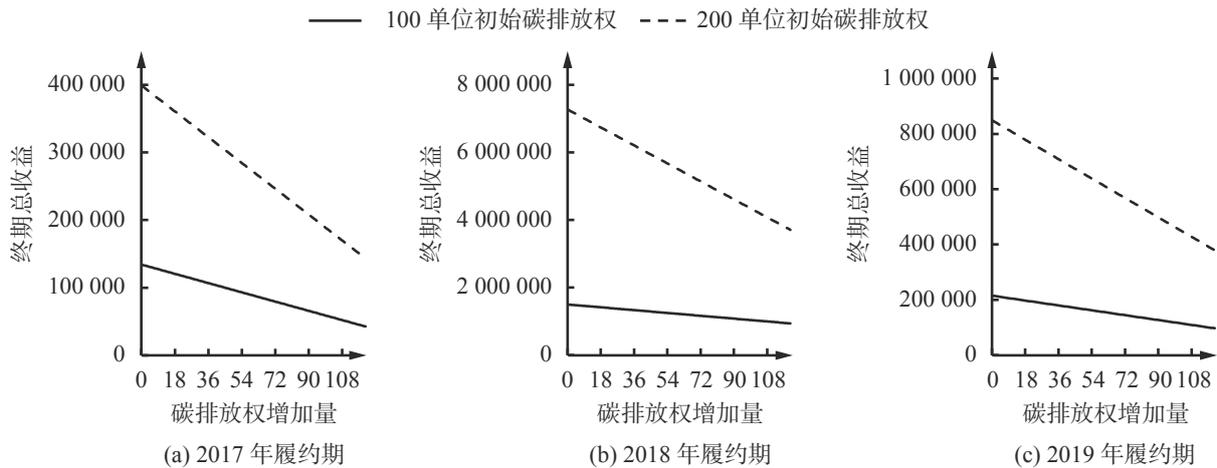


图3 不完全对冲条件下控排企业购买的初始碳排放权与总收益关系
Figure 3 Relationship between Initial Carbon Emission Rights and Total Income of Emission Control Firms under the Condition of Incomplete Hedging

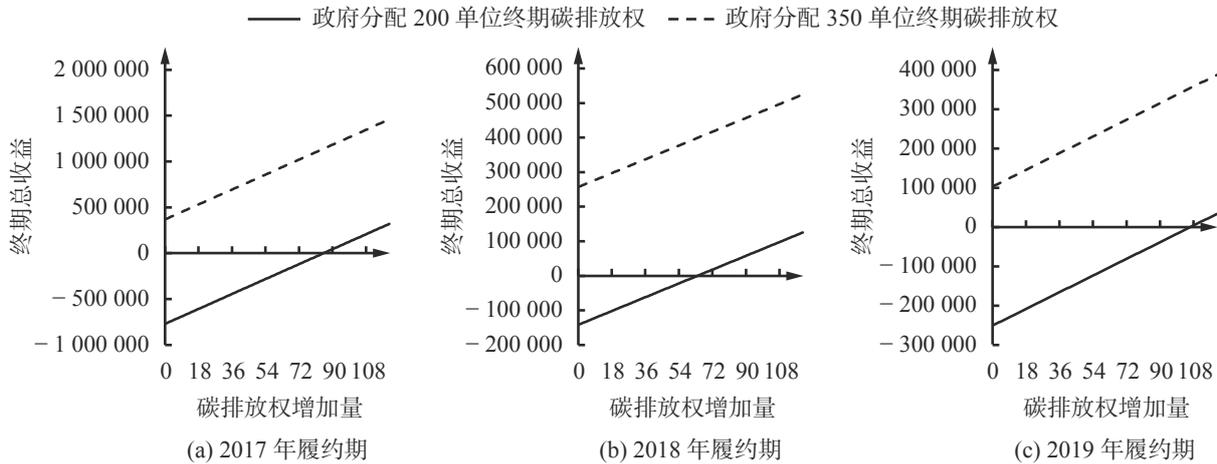


图4 不完全对冲条件下控排企业拥有的终期碳排放权与总收益关系
Figure 4 Relationship between Terminal Carbon Emission Rights and Total Income of Emission Control Firms under the Condition of Incomplete Hedging

随着拥有的终期碳排放权数量的增加而增加,但随着碳价格的上升而迅速减少(履约期碳排放权均价为2017年28.80元/吨,2018年36.20元/吨,2019年41.10元/吨)。究其原因,与碳税不同,控排企业可在碳市场中自由交易碳排放权,并获取相应利益。然而,资金有限增加了风险对冲成本,碳排放权价格上升进一步加剧了该风险,使控排企业若想真正获得正向收益需拥有大量终期碳排放权。因此,控排企业若想获得超额收益,必须保证终期拥有大量碳排放权。

(3) 与完全对冲条件不同,不完全对冲下的企业总收益还受到未定权益和可容许投资组合的影响。假定初始时刻控排企业拥有的资金量可购买500单位的金融资产(碳配额或股票),终期拥有的碳排放权数量为150,则控排企业终期收益与未定权益和可容许投资组合之间的关系见图5。

图5中,横坐标表示风险对冲策略资金投入增加

值,纵坐标表示不同风险对冲策略带来的企业终期总收益。由图5可知,不完全对冲情况下,总收益与未定权益和可容许投资组合之间呈线性增长关系,总收益随着未定权益和可容许投资组合的增加而增加。且与未定权益相比,投资组合对企业终期总收益的贡献量更大,未定权益增加对企业终期总收益的贡献速率更显著,即相对于投资组合变化时的终期总收益增长幅度,未定权益变化时的终期总收益曲线更陡峭。究其原因,控排企业拥有的碳排放权数量均视为负债,因此,投资组合和未定权益的收益均会部分对冲购买碳排放权带来的损失,保证终期收益为正。其中,未定权益的保值效果更佳,投资组合的潜力更优。同时,投资组合和未定权益带来的总收益值显著少于控排企业参与碳市场交易的收益值。这一结果表明,虽然未定权益和投资组合可有效对冲碳市场风险,但过于保守的投资策略也限制了企业获得超额收益的空间。

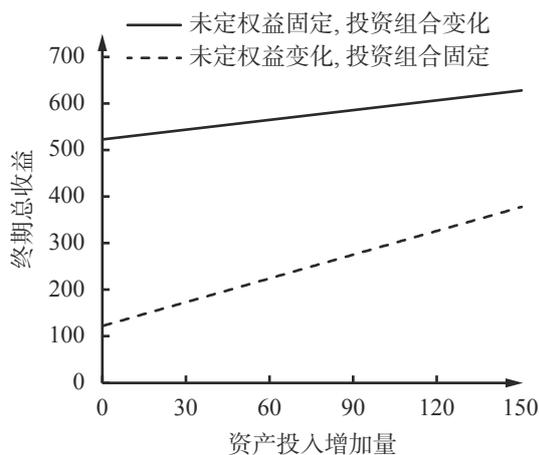


图5 不完全对冲条件下未定权益、
可容许投资组合与总收益关系
Figure 5 Relationship among Contingent Claim,
Permissible Portfolio and Total Income
under the Condition of Incomplete Hedging

综上,在风险不能完全对冲的前提下取得碳市场收益,企业不仅需要购买一定碳排放权,还需要加强在技术和管理领域的改革和创新,实现终期持有碳排放权数量的增加。同时,在良好的投资环境中,控排企业可以通过投资组合对冲碳市场交易带来的风险,适当参与碳交易有助于保证企业终期收益。

5 结论

本研究从控排企业角度,以风险对冲理论为基础,以上海环境能源交易所碳现货价格为依托,量化不同风险水平下控排企业参与碳市场的程度与其终期总收益之间的关系,得到以下结果。

(1) 完全对冲条件下,适度购买初始碳排放权和大量持有终期碳排放权均会提升控排企业总收益。由于有能力完全对冲碳排放权损失的控排企业一般为规模以上企业,因此本研究认为,该类型企业应充分认识碳市场风险,适度参与碳市场交易,并积极研发节能减排技术,从碳市场发展中获得收益。

(2) 不完全对冲条件下,碳市场政策依赖度高,碳价格波动性强,因此只有持有超额的终期碳排放权和良好的风险资产投资环境才有可能帮助企业获得终期收益。同时,鉴于使用不完全对冲策略的控排企业规模一般较小,本研究认为该类型企业应审慎参与碳市场,并积极提升自身技术和管理能力,降低碳排放。

(3) 当前中国的碳市场处于发展阶段的初期,其投资意义远不及其促进节能减排的价值。故企业应该充分认识碳市场的风险,确定已掌握碳资产的规模,稳健参与碳市场的交易,为自身在将来的碳排放权竞争中争取一席之地。

基于以上结论,本研究认为中国控排企业应尽早开展碳盘查,确定碳排放的组织边界,识别温室气体

排放源,并针对不同排放源,科学选择量化方法,确保这些系统性文件随企业内部生产调整而更新,保证碳盘查的准确性和动态反馈性。同时,应提升控排企业碳资产管理能力,编制企业的低碳发展规划,跟踪国内外碳市场动向,进行专题研究,保证企业能够及时、准确地获取碳市场最新信息。此外,控排企业还需依据自身条件适度参与碳市场交易,根据自身所处的发展阶段和资金能力选择相应的碳市场交易策略,选择直接参与碳市场和适当引入金融机构介入碳资产管理等不同方式,规避碳市场参与中的交易风险。

本研究的不足在于仅将资金规模作为划分碳市场中的控排企业的标准,且将控排企业投资范围仅设定于股票市场。未来研究可考虑控排企业所属行业和排放份额对其碳市场收益的影响,进一步丰富控排企业风险对冲策略的选择范围,拓展模型的适用性。

参考文献:

- [1] BOYCE J K. Carbon pricing: effectiveness and equity. *Ecological Economics*, 2018, 150: 52-61.
- [2] 段宏波,汪寿阳. 中国的挑战: 全球温控目标从2℃到15℃的战略调整. *管理世界*, 2019, 35(10): 50-63.
DUAN Hongbo, WANG Shouyang. From 2℃ to 15℃: China's challenges to attain the global warming-limit targets. *Journal of Management World*, 2019, 35(10): 50-63.
- [3] NGUYEN D K, HUYNH T L D, NASIR M A. Carbon emissions determinants and forecasting: evidence from G6 countries. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 111988-1-111988-10.
- [4] HINTERMAYER M. A carbon price floor in the reformed EU ETS: design matters!. *Energy Policy*, 2020, 147: 111905-1-111905-12.
- [5] AKTER S, BROUWER R, BRANDER L, et al. Respondent uncertainty in a contingent market for carbon offsets. *Ecological Economics*, 2009, 68(6): 1858-1863.
- [6] SHEN J, TANG P C, ZENG H. Does China's carbon emission trading reduce carbon emissions? Evidence from listed firms. *Energy for Sustainable Development*, 2020, 59: 120-129.
- [7] 杨敏,朱淑珍,厉无畏. 基于结构突变点的欧盟及中国碳市场有效性研究. *工业技术经济*, 2020, 39(7): 92-99.
YANG Min, ZHU Shuzhen, LI Wuwei. Study on efficiency of EU and China's pilot carbon markets based on structural breaks. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2020, 39(7): 92-99.
- [8] PEACE J, JULIANI T. The coming carbon market and its impact on the American economy. *Policy and Society*, 2009, 27(4): 305-316.
- [9] 郑爽. 提高我国在国际碳市场竞争力的研究. *中国能源*, 2008, 30(5): 11-16.
ZHENG Shuang. Research on how to increase China's competitiveness in world carbon market. *Energy of China*, 2008, 30(5): 11-16.
- [10] WU R R, QIN Z F. Assessing market efficiency and liquidity: evidence from China's emissions trading scheme pilots. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144707-1-144707-10.
- [11] DAI P F, XIONG X, HUYNH T L D, et al. The impact of economic policy uncertainties on the volatility of European carbon market.

- Journal of Commodity Markets* (Online), 2021: 100208-1-100208-13.
- [12] BARANZINI A, VAN DEN BERGH J C J M, CARATTINI S, et al. Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2017, 8(4): e462-1-e462-17.
- [13] 赵黎明, 殷建立. 碳交易和碳税情景下碳减排二层规划决策模型研究. *管理科学*, 2016, 29(1): 137-146.
ZHAO Liming, YIN Jianli. Bi-level programming model of carbon emission reduction decision-making under the coexistence of carbon trading and carbon tax. *Journal of Management Science*, 2016, 29(1): 137-146.
- [14] FAN J H, TODOROVA N. Dynamics of China's carbon prices in the pilot trading phase. *Applied Energy*, 2017, 208: 1452-1467.
- [15] 宋亚植, 刘天森, 梁大鹏, 等. 碳市场合理初始价格区间测算. *资源科学*, 2019, 41(8): 1438-1449.
SONG Yazhi, LIU Tiansen, LIANG Dapeng, et al. Reasonable initial price interval calculation of carbon market. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1438-1449.
- [16] WEN F H, ZHAO H C, ZHAO L L, et al. What drive carbon price dynamics in China?. *International Review of Financial Analysis*, 2022, 79: 101999-1-101999-10.
- [17] 张晨, 杨仙子. 基于多频组合模型的中国区域碳市场价格预测. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3017-3025.
ZHANG Chen, YANG Xianzi. Forecasting of China's regional carbon market price based on multi-frequency combined model. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3017-3025.
- [18] DECLERCQ B, DELARUE E, D'HAESELEER W. Impact of the economic recession on the European power sector's CO₂ emissions. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1677-1686.
- [19] YANG T R, LIU W L. Inequality of household carbon emissions and its influencing factors: case study of urban China. *Habitat International*, 2017, 70: 61-71.
- [20] PAN D, ZHANG C, ZHU D D, et al. A novel method of detecting carbon asset price jump characteristics based on significant information shocks. *Finance Research Letters* (Online), 2021: 102626-1-102626-8.
- [21] CHESNEY M, TASCHINI L. The endogenous price dynamics of emission allowances and an application to CO₂ option pricing. *Applied Mathematical Finance*, 2012, 19(5): 447-475.
- [22] HUO X J, CHENG H, WAN Y H, et al. Research on risk decision of trading emission rights in power enterprises. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 448/453: 4496-4503.
- [23] MA C S, DU Y F, WU Z R, et al. Under the carbon emissions and cap-and-trade enterprises' pricing strategy research when put into technology// *Proceedings of 4th International Conference on Logistics, Informatics and Service Science(LISS)*. Berlin: Springer, 2014: 147-153.
- [24] ZHANG H G, CAO T T, LI H X, et al. Dynamic measurement of news-driven information friction in China's carbon market: theory and evidence. *Energy Economics*, 2021, 95: 104994-1-104994-18.
- [25] ETIENNE X L, YU J M. Inverse price spread and illiquid trading in Korea-ETS. *Carbon Management*, 2017, 8(3): 225-235.
- [26] ZHOU J G, HUO X J, JIN B L, et al. The efficiency of carbon trading market in China: evidence from variance ratio tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(14): 14362-14372.
- [27] CHANG C L, MAI T K, MCALEER M. Establishing national carbon emission prices for China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2019, 106: 1-16.
- [28] FENG Z H, WEI Y M, WANG K. Estimating risk for the carbon market via extreme value theory: an empirical analysis of the EU ETS. *Applied Energy*, 2012, 99: 97-108.
- [29] 田园, 陈伟, 宋维明. 基于GARCH-EVT-VaR模型的国际主要碳排放交易市场风险度量研究. *科技管理研究*, 2015, 35(2): 224-231.
TIAN Yuan, CHEN Wei, SONG Weiming. The study on measuring the risk of major international carbon emissions trading market based on the model of GARCH-EVT-VaR. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(2): 224-231.
- [30] ZHU B Z, YE S X, HE K J, et al. Measuring the risk of European carbon market: an empirical mode decomposition-based value at risk approach. *Annals of Operations Research*, 2019, 281(1/2): 373-395.
- [31] ADEKOYA O B, OLIYIDE J A, NOMAN A. The volatility connectedness of the EU carbon market with commodity and financial markets in time- and frequency-domain: the role of the U.S. economic policy uncertainty. *Resources Policy*, 2021, 74: 102252-1-102252-17.
- [32] 杜莉, 孙兆东, 汪蓉. 中国区域碳金融交易价格及市场风险分析. *武汉大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 68(2): 86-93.
DU Li, SUN Zhaodong, WANG Rong. Analysis of the carbon prices and market risks in the regional carbon market. *Wuhan University Journal (Philosophy & Social Science)*, 2015, 68(2): 86-93.
- [33] 翟大恒. 我国与欧盟碳交易的市场风险比较研究. 济南: 山东财经大学, 2016: 38-39.
ZHAI Daheng. *Market risk comparative study on Chinese and the European Union's carbon trading market*. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2016: 38-39.
- [34] 邱谦, 郭守前. 我国区域碳金融交易市场的风险研究. *资源开发与市场*, 2017, 33(2): 188-193.
QIU Qian, GUO Shouqian. Analysis of regional trading market risks in carbon finance. *Resource Development & Market*, 2017, 33(2): 188-193.
- [35] 张志俊, 闫丽俊. 碳排放权交易价格的VaR风险度量研究. *生态经济*, 2020, 36(1): 19-25, 33.
ZHANG Zhijun, YAN Lijun. Research on VaR risk measurement of trading price of carbon emission rights. *Ecological Economy*, 2020, 36(1): 19-25, 33.
- [36] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链企业减排合作策略研究. *管理科学*, 2013, 26(3): 108-119.
XIE Xinpeng, ZHAO Daozhi. Research on cooperation strategy of enterprises' carbon emission reduction in low carbon supply chain. *Journal of Management Science*, 2013, 26(3): 108-119.
- [37] 凤振华, 魏一鸣. 欧盟碳市场系统风险和预期收益的实证研究. *管理学报*, 2011, 8(3): 451-455.
FENG Zhenhua, WEI Yiming. Systematic risk and expectations of returns in EU carbon market. *Chinese Journal of Management*, 2011, 8(3): 451-455.
- [38] 刘维泉, 郭兆晖. EU ETS碳排放期货市场风险度量: 基于SV模型的实证分析. *系统工程*, 2011, 29(10): 14-23.

- LIU Weiyan, GUO Zhaohui. EU ETS EUA future market risk measurement: an empirical research based on SV models. *Systems Engineering*, 2011, 29(10): 14–23.
- [39] KNOX-HAYES J. The spatial and temporal dynamics of value in financialization: analysis of the infrastructure of carbon markets. *Geoforum*, 2013, 50: 117–128.
- [40] 郭伟. 碳市场发展对能源行业的机遇与挑战. *能源*, 2015(2): 102–105.
- GUO Wei. Opportunities and challenges for the energy sector in the development of carbon markets. *Energy*, 2015(2): 102–105.
- [41] 潘家华. 碳排放交易体系的构建、挑战与市场拓展. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(8): 1–5.
- PAN Jiahua. Construction, challenges and market expansion of emissions trading system. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(8): 1–5.
- [42] ZHAO X G, WU L, LI A. Research on the efficiency of carbon trading market in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 1–8.
- [43] SZOLGAYOVÁ J, GOLUB A, FUSS S. Innovation and risk-averse firms: options on carbon allowances as a hedging tool. *Energy Policy*, 2014, 70: 227–235.
- [44] BARRADALE M J. Investment under uncertain climate policy: a practitioners' perspective on carbon risk. *Energy Policy*, 2014, 69: 520–535.
- [45] 孙雨薇, 王灿. 碳市场政策下企业对碳信用的支付意愿及影响因素研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(3): 11–21.
- SUN Yuwei, WANG Can. Estimate companies' willingness to pay for carbon credit and the influencing factors. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(3): 11–21.
- [46] ZHANG Y J, WANG A D, TAN W P. The impact of China's carbon allowance allocation rules on the product prices and emission reduction behaviors of ETS-covered enterprises. *Energy Policy*, 2015, 86: 176–185.
- [47] JIANG X, ZHU K, WANG S. The potential for reducing China's carbon dioxide emissions: role of foreign-invested enterprises. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 2015, 35: 22–30.
- [48] CVITANIĆ J, KARATZAS I. On dynamic measures of risk. *Finance and Stochastics*, 1999, 3(4): 451–482.
- [49] 肖庆宪. Ornstein-Uhlenbeck过程的参数估计. *应用概率统计*, 2005, 21(1): 1–8.
- XIAO Qingxian. The parameter estimation of Ornstein-Uhlenbeck process. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics*, 2005, 21(1): 1–8.

Return Measurement and Strategic Choice for Emission Control Firms in Carbon Market

SONG Yazhi¹, LI Yin², LIU Tiansen³, LI Zhongfei⁴

1 Business School, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

2 School of Business, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

3 School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

4 Business School, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: In order to achieve the emission reduction goal as soon as possible, Chinese government has successively established several carbon trading pilots, and launched the national carbon emission trading market in 2021, focusing on increasing the stress of carbon emission control firms assisted by market tools and thus stimulating such firms' willingness to invest in carbon emission reduction. The emergence of carbon price suggests carbon emission control firms involving in carbon market investment basing on own development needs, which helps reduce trading risks.

Prior literature focused on the formulation and evaluation of carbon market construction rules and pilot market operations efficiency, while rarely analyzed the opportunities and challenges brought by the carbon market from the perspective of firms' returns. From the perspective of firms, this study assumed that the carbon emission control firms are risk-averse and would offset the carbon market risk by portfolio. Then we use the stochastic differential equation to simulate the carbon price and stock price; and calculate the terminal income of carbon emission control firms in different capital scales that involve in carbon trading according to risk hedging under the condition of complete market. The empirical analysis selects the carbon spot price of Shanghai Environment and Energy Exchange as the research target, and then quantify the relationship between carbon market involvement and terminal income of carbon emission control firms.

The results of this study indicate that, currently, the development of China's carbon market promotes the technology upgrading and energy conservation and emission reduction of emission control firms. While due to the volatility of carbon prices and the aggregation of actual carbon trading, the return of carbon emission control firms with abundant capital and full hedging

of trading risk is significantly higher than that of small-and medium-sized firms with only partial hedging of trading risk. Meanwhile, the significance of carbon market investment is weak at present. Carbon emission control firms of different sizes need to improve their management capacity of carbon assets on the basis of detailed inventory of their own carbon emissions, develop carbon market investment strategies in line with firms' capability levels and future planning, and use carbon trading tools to solve the lack of emission reduction investment that restricts the long-term development of carbon emission control firms.

The conclusions of this study help carbon emission control firms to clarify carbon market risks and quantify carbon market incomes. They also provides theoretical underpinnings and practical options for carbon emission control firms to involve in carbon trading according to their own development stage.

Keywords: carbon market; emission control firms; risk hedging; terminal income; investment strategies

Received Date: April 12th, 2021 **Accepted Date:** November 10th, 2021

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (71991474, 71721001), the China Postdoctoral Science Foundation (2021T140758), the Humanity and Social Sciences Research of Ministry of Education of China (20YJC630123), and the Philosophy and Social Science Research Planning Project of Heilongjiang Province (19JLC117)

Biography: SONG Yazhi, doctor in management, is a lecturer in the Business School at Jiangsu Normal University. Her research interests include carbon finance and carbon trading system design. Her representative paper titled "Linking carbon market and electricity market for promoting the grid parity of photovoltaic electricity in China" was published in the *Energy* (Volume 211, 2020). E-mail: songyazhi@jsnu.edu.cn

LI Yin, doctor in science, is a postdoctoral fellow in the School of Business at Sun Yat-sen University. His research interest focuses on financial engineering. His representative paper titled "A fuzzy stochastic model for carbon price prediction under the effect of demand-related policy in China's carbon market" was published in the *Ecological Economics* (Volume 157, 2019). E-mail: liyin57@mail.sysu.edu.cn

LIU Tiansen, doctor in management, is an associate professor in the School of Economics and Management at Harbin Engineering University. His research interests include energy economics and environmental governance. His representative paper titled "Bridging production factors allocation and environmental performance of China's heavy-polluting energy firms: the moderation effect of financing and internationalization" was published in the *Energy* (Volume 222, 2021). E-mail: tiansen0328@hrbeu.edu.cn

LI Zhongfei, doctor in management, is a chair professor in the Business School at Southern University of Science and Technology. His research interests cover quantitative finance, financial economics, financial engineering, and risk management. His representative paper titled "Data-driven robust mean-CVaR portfolio selection under distribution ambiguity" was published in the *Quantitative Finance* (Issue 1, 2019). E-mail: lizf6@sustech.edu.cn □