



No. 2315

Working Paper

中国碳交易市场的运行效率与风险测算

马勇 李美仪

【摘要】 碳交易市场稳定和高效运行是中国实现“碳达峰”和“碳中和”重要支撑。本文通过构建指标体系，对中国碳交易市场运行效率和市场风险水平进行定量测算，并进行国际比较分析。本文分析结果表明：一是在运行效率方面，国内碳排放配额发放以免费分配为主，企业参与碳交易以清缴履约为主要目的，市场资源配置功能尚未充分发挥，国内碳交易市场总体上属于弱有效或无效状态，市场定价效率有待进一步提高；二是在风险水平方面，受供需结构间歇性失调影响，中国碳价波动较国际成熟市场更大，区域之间呈现出较为明显异质性，且由于缺乏衍生品交易机制，中国碳交易市场风险管理体系仍不完善。在上述分析基础上，本文就如何提高中国碳交易市场效率和风险管理水平提出政策建议。

【关键词】 碳交易 碳减排 碳达峰 碳中和

【文章编号】 IMI Working Paper NO. 2315



微博·Weibo



微信·WeChat

更多精彩内容请登陆 国际货币网

<http://www.imi.org.cn/>

1937

中国碳交易市场的运行效率与风险测算

马 勇¹ 李美仪²

【内容摘要】碳交易市场稳定和高效运行是中国实现“碳达峰”和“碳中和”重要支撑。本文通过构建指标体系，对中国碳交易市场运行效率和市场风险水平进行定量测算，并进行国际比较分析。本文分析结果表明：一是在运行效率方面，国内碳排放配额发放以免费分配为主，企业参与碳交易以清缴履约为主要目的，市场资源配置功能尚未充分发挥，国内碳交易市场总体上属于弱有效或无效状态，市场定价效率有待进一步提高；二是在风险水平方面，受供需结构间歇性失调影响，中国碳价波动较国际成熟市场更大，区域之间呈现出较为明显异质性，且由于缺乏衍生品交易机制，中国碳交易市场风险管理体系仍不完善。在上述分析基础上，本文就如何提高中国碳交易市场效率和风险管理水平提出政策建议。

【关键词】 碳交易 碳减排 碳达峰 碳中和

引 言

减少碳排放量具有长久而深远的意义。2020年9月第七十五届联合国大会上，中国首次提出要在2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”目标，这意味着“减碳”将成为中国今后几十年一项长期发展战略。国际经验表明，碳排放权交易（以下简称“碳交易”）市场稳定和高效运行是实现碳减排的重要支撑力量，其通过竞价产生交易价格并传递给交易者实现资源配置，兼具经济属性和金融属性。根据《京都议定书》内容，发达国家已从2005年起履行减排规则，中国早期主要以参与发达国家减排项目为主，2012年起陆续启动地方碳交易试点，2021年启用全国碳排放权交易市场。总体来看，中国碳交易市场（尤其是配额交易市场）与发达国家和地区相比存在一定差距，相关体制和机制尚不完善，不少情况和问题尚待澄清和解决。

既往中国碳交易市场相关研究主要集中于从定性角度分析市场机制，或者从某个具体维度衡量碳交易市场发展水平，缺乏从整体上对中国碳交易市场发展和运行状况进行定量测度。本文创新点主要包括以下三个方面：第一，在现状分析方面，本文通过较为全面的指标体系构建，从定量角度对中国碳交易市场运行效率和风险进行测算，有助于从客观视角更加直观地理解中国碳交易市场运行特征和问题；第二，在实证分析方面，本文基于有效市场理

¹马勇，中国人民大学货币研究所特约研究员，中国人民大学财政金融学院教授

²李美仪，中国人民大学财政金融学院

论与分形市场理论检验中国碳交易市场有效性，同时运用在险价值（VaR）和条件在险价值（CVaR）模型刻画碳交易市场风险状态，并讨论碳交易市场区域异质性，这些分析不仅丰富了已有理论文献，且得出一些新的有价值结论；第三，在实践和政策分析方面，本文从多个维度比较分析中外碳交易市场，较为全面客观地显示中外碳交易市场发展差异及原因，在此基础上提出的政策建议对于理解中国未来碳交易市场发展具有一定参考价值。

一、文献综述

基于中国碳交易市场发展现状，国内学者对其市场效率以及风险水平进行初步探索和研究。市场效率评价方面，易兰等（2018）认为碳排放配额拍卖可避免集中分配带来的超量分配问题，通过推高碳排放成本促进市场参与者减排行为，王婷婷等（2016）、王扬雷等（2015）分别基于有效市场理论和分形市场理论对碳交易市场效率进行系统性分析，陈智颖等（2020）引入市场深度概念，进一步刻画碳交易市场发展水平。市场风险测度方面，王婷婷等（2016）对在险价值计算方法进行改进，更为细致地刻画中国碳交易市场风险。针对海外与国内碳交易市场风险水平差异，杨超（2011）、蒋晶晶（2015）、张晨（2015）、柴尚蕾等（2019）分别引入 Markov 波动转移和极值理论、条件方差和极值理论、ARMA-GARCH 模型和 Copula 函数、非参数核估计和 Copula 函数方法等，充实 VaR 值计算过程，度量欧美地区碳交易市场风险，为中国碳交易市场建设提供参考。

海外发达国家和地区碳交易市场发展更早且更为成熟，相关研究也更深入。除基本理论研究外，国外学者对于碳交易市场机制、定价、效率、风险等问题讨论较为充分。市场机制方面，已有研究主要围绕发达国家碳交易市场，较多为碳排放配额分配问题，如免费分配存在政策上便利性和可操作性（Cramton & Kerr, 2002），但拍卖分配更能提升市场公平性（Kruger & Pizer, 2004; Betz et al., 2010; Goeree et al., 2010; Lopomo et al., 2011），从配额免费发放到配额拍卖是碳交易市场发展必然结果（Holt et al., 2007）。定价与市场效率方面，Ehrhart et al.（2005）认为衍生品交易能够提高碳交易价格合理性并提升市场效率。Bredin et al.（2014）研究结果证明，随着碳排放权相关衍生品推出，EU ETS 定价能力增强、市场效率不断提升，Alberto & Frans（2010）基于有效市场假说检验发现 EU ETS 开设初期市场效率较低、之后逐步恢复，侧面印证交易产品丰富度提升对市场发育的作用。市场风险方面，Larson & Parks（1999）、Dutschke et al.（2005）、Blyth & Buun（2011）、Reboredo & Ugando（2015）、Wu & Kung（2020）认为在碳配额和项目交易中存在市场、价格、履约、技术、政策等诸多风险。此外，国外学者对碳交易市场价格波动进行大量测算，建立起风险量化体系并不断提高预测精度，为市场建设和发展提供数据支持。

二、中国碳交易市场的运行效率

本文主要选取市场化程度、市场活跃度、市场有效性三类指标衡量碳交易市场运行效率。由于项目型市场多以跨国形式存在，其覆盖碳排量不便于计入单个国家和地区，本文测算以配额碳交易市场为主。

为对中国碳交易市场发展情况进行较为完善刻画，本文引入国际比较分析，将中国与发达国家和地区进行对比，从碳交易市场成立期限以及交易规模两个方面看均具有可行性：第一，从发展历程看，国外发达国家和地区碳交易市场启动时间较早，发展中国家履约开始时间较晚，除中国外仅有哈萨克斯坦、墨西哥、黑山等国启动碳交易市场，而项目型交易市场除国际机制外中国是唯一设有本国项目型碳交易体系发展中国家，与其他发展中国家可比性较低。第二，从市场规模看，中国启动全国市场后碳交易覆盖碳排量超过欧盟成为全球第一，覆盖碳排量在本地占比预计超过 30%，已接近欧盟水平。整体而言，基于可供交易总量视角中国碳交易市场规模绝对领先，基于渗透率视角中国碳交易市场仍有横向扩展空间，与发达市场之间具备可比性。本文重点选取欧盟排放交易体系（EU ETS）与中国区域及全国碳交易市场进行比较，这是因为发达市场中欧洲地区碳交易发展最早，历经多个发展阶段，交易体系相较美国、加拿大等更为集中化、系统化，对于中国建设全国一体碳交易市场具有良好参考意义。

由于各国具体国情存在差异，碳交易受不同政治因素影响，本文讨论重点围绕其经济意义而非政治意义展开。本文在后续对碳交易市场发展水平讨论中引入其他衡量指标同理，其目的在于探究中国碳交易市场与发达国家及地区存在明显差异的具体方面，以此为完善中国碳交易市场提供政策建议。

表 1 全球各碳交易市场成立时间线

时间	新设碳交易市场	首次新设项目交易体系时间
2005 年	EU ETS（欧盟）	美国
2007 年	Alberta TIER（加拿大*）	加拿大
2008 年	Switzerland ETS（瑞士）、New Zealand ETS（新西兰）	
2009 年	Regional Greenhouse Gas Initiative（RGGI，美国*）	
2010 年	Tokyo CaT（日本*）	日本
2011 年	Saitama ETS（日本*）	
2012 年	California CaT（美国*）	澳大利亚、瑞士
2013 年	Beijing/Tianjin/Shanghai/Guangdong/Shenzhen pilot ETS（中国*）、Quebec CaT（加拿大*）、Kazakhstan ETS（哈萨克斯坦）	
2014 年	Chongqing / Hubei pilot ETS（中国*）	中国
2015 年	Korea ETS（韩国）	韩国
2016 年	Fujian pilot ETS（中国*）、BC GGIRCA（加拿大*）	
2018 年	Massachusetts ETS（美国*）	
2019 年	Canada federal OBPS（加拿大）、Newfoundland and Labrador PSS / Saskatchewan OBPS / Nova Scotia CaT（加拿大*）	
2020 年	Virginia ETS（美国*）、Mexico pilot ETS（墨西哥）	

2021 年	China National ETS（中国）、Germany ETS（德国）、UK ETS（英国）、New Brunswick ETS（加拿大*）、Oregon ETS（美国*）
2022 年	Austria ETS（奥地利）、Montenegro ETS（黑山）、Ontario EPS（加拿大*）
2023 年	Washington CCA（美国*）

资料来源：作者整理

注：括号内为所属国家或地区，*表示次国家级交易市场。

表 2 全球主要配额型市场碳交易体系覆盖全球碳排量比例

国家/地区	代表市场	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
中国	National & Pilot ETS	1.49%	2.09%	2.08%	2.45%	2.45%	2.45%	2.45%	2.45%	8.59%
欧盟	EU ETS	4.26%	4.06%	4.11%	4.11%	4.11%	4.11%	4.11%	4.11%	3.14%
美国	RGGI	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.30%
	California CaT	0.23%	0.23%	0.69%	0.69%	0.69%	0.69%	0.69%	0.69%	0.65%
加拿大	Québec CaT	0.05%	0.04%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.11%
韩国	Korea ETS	—	—	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.95%

资料来源：作者整理

表 3 全球主要配额型市场碳交易体系覆盖当地碳排量比例

国家/地区	代表市场	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
中国	National & Pilot ETS	40%	35%	35%	35%	35%	— ^①	—	—	21%
		~	~	~	~	~	—	—	—	~
		50%	60%	60%	60%	60%				37%
欧盟	EU ETS	45%	45%	41%	41%	41%	41%	41%	49%	39%
美国	RGGI	20%	20%	21%	21%	21%	21%	18%	18%	23%
	California CaT	35%	35%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	80%
加拿大	Québec CaT	30%	30%	85%	85%	85%	85%	—	—	78%
韩国	Korea ETS	60%	60%	66%	68%	68%	68%	70%	70%	74%

资料来源：作者整理

① 世界银行对 2018—2020 年中国各交易市场数据进行合并，与其他年份不具有可比性，故在此处略去；加拿大魁北克碳交易市场 2019—2020 年同理。

（一）市场化程度

本文从交易主体和交易对象两个维度对国内外碳交易市场的市场化程度进行讨论。

从交易主体市场化程度看，国内主体参与碳交易自主性弱于发达市场主体。在“配额盈余主体→中间主体（如有）→配额短缺主体”交易链上，各个国家和地区均对市场准入机制有规定，纳入主体通常为碳排放量较高行业或企业，国内外主体在选择是否进入碳市场进行交易方面并不具备自主权。即便如此，企业可通过技术创新减少碳排放量或参与相关项目建设获取盈余碳配额，在完成碳排放履约核定同时通过配额交易方式获利，具备自发减排和交易动机，站在交易供需主体角度国内外碳交易均具备一定市场化属性。然而，中间主体在中国

暂无法参与配额交易，欧洲等地金融机构则可根据业务需要选择是否参与交易以实现效益最大化，市场化程度显著高于中国。

从交易对象市场化程度看，在配额初次分配环节，全球各地碳排放配额通常以免费分配和有偿分配两种形式传递给市场参与者，其中有偿分配主要通过拍卖实现。对参与者而言，有限免费配额比例与较高配额拍卖价格从经济性角度形成激励，一定程度上促成其节能减排行为（易兰等，2018），可以发挥出市场资源配置作用，提高市场化程度。根据 Lofgren et al.（2015；2018）研究成果以及国际碳行动伙伴组织和世界银行披露数据，中国碳交易配额拍卖比例仍然处于极低水平，相比之下发达国家份额拍卖比例较高，能为当地政府提供可观的财政收入。碳排放配额拍卖具有较强政策导向作用，欧盟、韩国等地阶段性强制规定推动配额拍卖比例阶梯式上升，中国暂未全面推行这一举措。

表 4 全球主要市场配额拍卖比例

国家/地区	碳交易市场	配额拍卖比例
中国	National ETS	0%②
	Pilot ETS	北京、重庆：0% 上海、广东、深圳、天津、湖北、福建：极低
欧盟	EU ETS	2005—2007 年不足 1%，2008—2012 年约 5%，2013—2020 年 40%~50%，2021—2030 年预计更高
美国	RGGI	约 100%，每季度拍卖不超过 25%
	California CaT	约 58%
加拿大	Canada federal OBPS	约 67%
韩国	Korea ETS	2015—2017 年 0%，2018—2020 年 3%，2021—2025 年 10% 以上

资料来源：作者整理

注：部分市场拍卖比例阶段性提升显著，故分阶段列示。

根据 2021 年 3 月发布的《碳排放权交易管理暂行条例（草案修改稿）》，全国碳交易市场启动初期配额实行免费分配，后期将适时引入拍卖等有偿分配机制。

表 5 全球主要配额型市场财政收入（2020 年）

国家/地区	中国上海	中国天津	中国湖北	中国广东	中国深圳	欧盟	美国加州	美国 RGGI	加拿大全国市场	加拿大魁北克	加拿大艾伯塔	韩国
碳交易财政收入（百万美元）	13	9	8	2	<1	22548	1698	416	204	549	341	219

资料来源：作者整理

在配额定价环节，全球各碳交易市场价格水平差异较大，这在一定程度上与该地区或该地区配额分配市场化程度有关，较高配额拍卖比例意味着更高级市场定价并传导至配额交易二级市场，除此之外配额资产定价还与交易覆盖行业、采取的碳排放豁免和抵消措施等有关。

截至 2022 年 4 月 1 日，中国各个市场碳交易名义价格区间为 1~13 美元/吨二氧化碳当量，显著低于加拿大、欧盟等配额拍卖比例较高的国家和地区，也低于世界银行碳价格高级别委员会制定的 2030 年碳价格走廊下限（50~100 美元/吨二氧化碳当量）。截至 2022 年中国碳排放配额未经充分定价即进入交易环节，不利于激发国内主体参与减排积极性，在国际市场上碳资产定价权和话语权较弱。

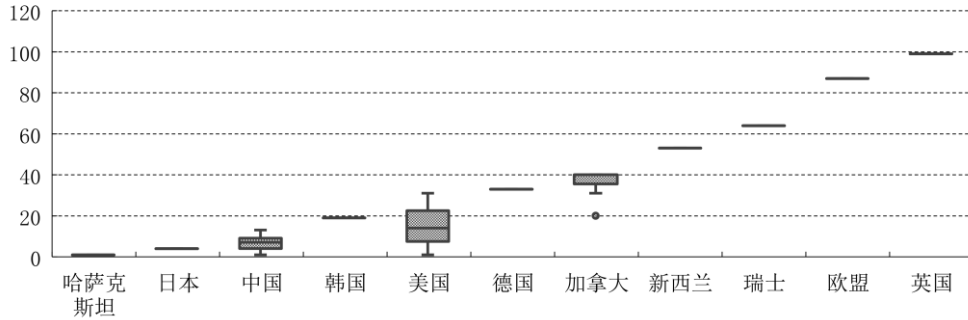


图 1 全球主要碳交易市场交易价格区间 (2022 年 4 月 1 日, 单位: 美元/吨二氧化碳当量)

资料来源: 作者整理

(二) 市场活跃度

市场活跃度反映投资者参与交易积极性，参与交易主体多样化带来交易需求多元化，一定程度上推升市场活跃度。碳交易供需两端为参与减排主体，从碳交易覆盖行业看中国碳交易从区域试点过渡至全国市场过程中以发电行业为先，部分试点市场覆盖供水、建材、造纸、航空等领域，相比之下发达国家和地区碳配额交易主体更为多元。在碳交易中间环节，国内仅部分试点市场允许控排企业以外其他主体参与交易以活跃市场，全国市场则只允许控排企业参与交易，欧美地区包括金融机构及其他投资者在内市场主体也被允许参与其中，可起到活跃市场交易作用。

表 6 全球主要碳交易市场配额交易供需主体所属领域

国家/地区	碳交易市场	覆盖领域和企业
中国	National ETS	电力 (发电、热电联产)
	Pilot ETS	电力 ^②
欧盟	EU ETS	电力、工业、航空
英国	UK ETS	电力、工业、航空
德国	Germany ETS	EU ETS 监管之外的燃料排放领域
美国	RGGI	电力
加拿大	Canada federal OBPS	电力、工业
韩国	Korea ETS	碳排放量超过规定数额的企业

资料来源: 作者整理

② 中国部分试点市场还覆盖供水、建材、造纸、航空领域。

从市场参与者行为看，交易越频繁、交易量越大说明市场中资金进出体量越大，市场也更活跃。本文以欧盟碳交易所为比较分析对象，考虑到中国碳交易产品以现货为主、欧盟碳交易产品以期货为主，选取 2013—2021 年中国 8 家试点交易所与 2021 年中国全国碳交易

市场现货成交均价及 2005—2021 年欧洲气候交易所欧盟碳排放配额（EUA）期货结算价作为初始样本（如未单独说明，下文所用样本与此相同），由于欧盟排放交易体系 EU ETS 发展历经多个阶段，本文对其划分阶段逐一分析。参考易兰等（2018）做法，首先计算中欧碳市场有效交易日比例，具体表示为“年度发生交易的交易日数量/交易日总数”，发现中国碳交易市场活跃度分化程度较高，平均有效交易日比例约 70%，而 EU ETS 自试点以来有效交易日比例长期接近 100%，与之历史初期水平相比中国碳交易市场交易连续度不足、整体活跃度偏低，全国市场的引入有望改变这一现状。

表 7 中国碳交易市场有效交易日比例

市场	首次交易时间	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
北京	2013.11.28	33.3%	76.8%	59.4%	75.9%	51.2%	60.5%	62.8%	56.3%	54.4%
上海	2013.11.26	73.1%	67.1%	58.2%	36.9%	66.9%	58.8%	56.4%	61.7%	56.0%
广东	2013.12.19	22.2%	51.2%	72.5%	74.7%	92.7%	86.8%	98.0%	99.2%	97.6%
深圳	2013.06.18	98.9%	94.7%	96.7%	89.6%	88.3%	92.6%	90.0%	83.8%	83.1%
天津	2013.12.26	100.0%	80.5%	75.0%	26.5%	3.2%	6.6%	6.4%	75.0%	37.5%
重庆	2014.06.19	—	0.7%	11.1%	15.3%	70.2%	41.6%	38.0%	52.9%	66.1%
湖北	2014.04.28	—	98.8%	98.0%	95.2%	96.0%	99.6%	97.6%	86.7%	97.6%
福建	2017.01.09	—	—	—	—	84.4%	55.1%	52.8%	37.5%	23.0%
全国	2021.07.16	—	—	—	—	—	—	—	—	97.4%
平均	—	79.9%	70.4%	67.3%	59.2%	69.1%	62.7%	62.8%	69.1%	66.3%

资料来源：作者测算

表 8 欧盟碳交易市场有效交易日比例

EU ETS 发展阶段	特征	有效交易日比例
Phase_1（2005.01.01—2007.12.31）	试点阶段，建立起碳交易工具以及所需基础设施，配额免费分配。	99.9%
Phase_2（2008.01.01—2012.12.31）	覆盖领域扩展至航空业，配额上限与免费分配比例逐步降低。	99.5%
Phase_3（2013.01.01—2020.12.31）	市场统一性提升，纳入更多行业和温室气体种类，配额主要为拍卖分配。	99.3%
Phase_4（2021.01.01—2030.12.31）	调整减排规划以实现 2030 年气候目标，预计将涵盖更多行业。	99.6%④
平均（2005.01.01—2030.12.31）	—	99.5%

资料来源：作者测算

④ 为保证与中国数据的可比性，欧盟第四阶段碳交易数据取至 2021 年 12 月 31 日。下同。

碳交易市场运行伴有“履约期效应”，企业为满足履约要求往往在履约期之前进行交易，导致市场活跃度呈现周期性变动（齐绍洲和张振源，2019）。以全国市场及区域市场中交易规模最大北京市场为例，中国碳交易市场履约期效应较为明显，通常呈现脉冲式波动，每年有相当多时间交易量几乎为零，大量交易聚集在碳配额清缴期之前时段；EU ETS 碳交易则

更为连贯，交易量波动虽大但整体保持上升态势。本文通过“年度交易量前 20%交易日的交易总量/年度交易总量”对各市场交易量集中度进行测算，结果显示中国区域市场交易集中度明显高于 EU ETS 各阶段水平，从交易量分布看控排企业参与碳交易动机更偏向于满足履约要求而非自愿参加。

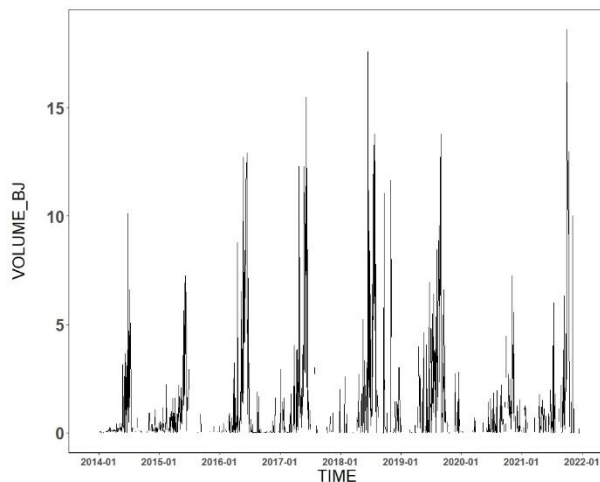


图 2 北京环境交易所碳交易量分布（单位：万吨二氧化碳当量）

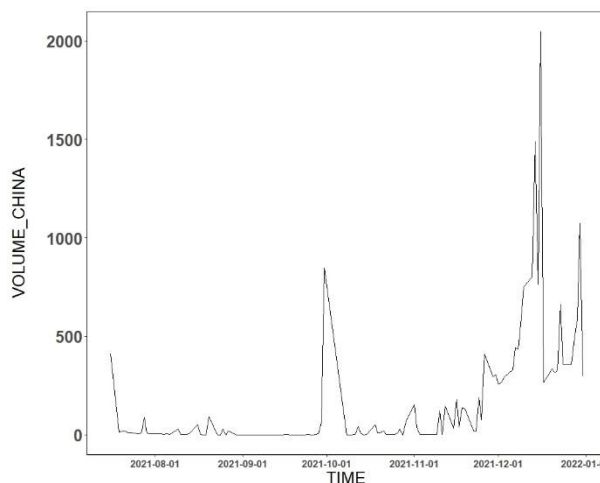


图 3 中国碳排放权交易市场碳交易量分布（单位：万吨二氧化碳当量）

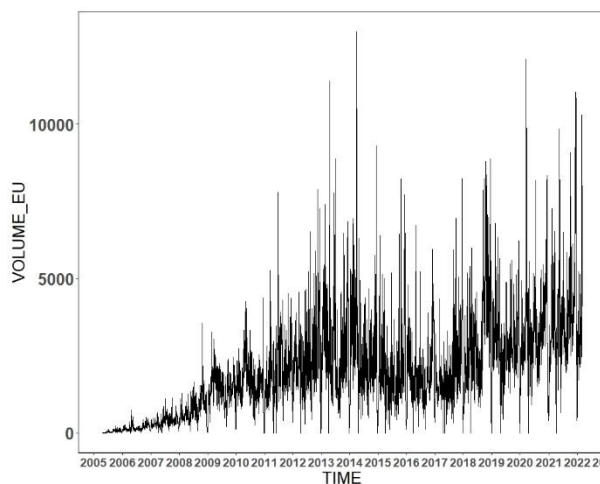


图 4 欧洲气候交易所碳交易量分布（单位：万吨二氧化碳当量）

表9 中国碳交易市场交易量集中度

市场	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
北京	88.0%	87.7%	93.1%	91.4%	84.0%	79.8%	84.8%	91.2%
上海	84.2%	67.7%	96.9%	91.7%	90.7%	89.3%	91.8%	92.1%
广东	99.9%	97.3%	87.9%	81.7%	90.6%	75.8%	66.5%	76.1%
深圳	86.8%	62.8%	88.3%	89.3%	67.1%	79.1%	96.3%	95.7%
天津	93.4%	98.1%	99.8%	100.0% ①	100.0%	100.0%	88.9%	94.1%
重庆	—	100.0%	100.0%	99.6%	99.4%	99.4%	97.5%	88.4%
湖北	—	70.4%	70.3%	71.3%	77.5%	84.6%	55.6%	86.3%
福建	—	—	—	—	93.6%	99.3%	>99.9%	>99.9%

资料来源：作者测算

注：由于各市场起始年度未能涵盖完整履约周期，故剔除启动首年数据，下同；交易量集中度 100%或接近 100%意味着年度有效交易日比例不足 20%，市场非常不活跃。

表10 欧盟碳交易市场交易量集中度

Phase_1	2006	2007						
	40.3%	33.5%						
Phase_2	2008	2009	2010	2011	2012			
	35.6%	30.2%	32.9%	34.6%	34.4%			
Phase_3	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	37.6%	37.5%	39.8%	36.3%	38.4%	37.3%	30.9%	32.6%
Phase_4	2021							
	33.4%							

资料来源：作者测算

（三）市场有效性

1. 基于有效市场理论的实证检验

美国经济学家 Fama 于上世纪 70 年代提出，金融市场中信息能否及时反映在资产价格上以及价格对信息反应充分程度决定金融市场是否存在效率以及效率高低。杜莉和张云（2013）指出，拓展到碳交易市场，交易价格同样能够从微观角度反映该市场效率。尽管政策机构可能出于减排目标削减配额发放量，真正进入碳交易二级市场流通的是企业配额中盈余部分，其不仅与当期取得配额数量有关，还与企业自身减排行为相关，碳交易价格具有一定不可预测性。根据 Fama 提出的有效市场理论，市场效率有弱式有效、半强式有效、强式有效三种表现形态，学界对其实证研究主要集中在前两种情况的验证上，参考张小艳和张宗成（2005；2007）、王婷婷等（2016）做法，本文主要检验碳交易市场是否存为弱式有效，有效市场理论下对市场效率检验主要通过随机游走模型实现：

$$P_t = \rho * P_{t-1} + e_t$$

$$\rho = 1 \text{ 时, } P_t = P_0 + e_t + e_{t-1} + \dots + e_1$$

其中，AR(1)过程若满足 $\rho = 1$ 即表明价格 P 遵循随机游走，市场有效成立，反复迭代后当前

价格 P_0 与未来多期后价格 P_t 的关联度取决于革新值 e_t 。1997 年 Campbell 等人将革新值 e_t 的分布状态分为三种，对应 e_t 独立同分布的随机游走 (RW1)、 e_t 独立的随机游走 (RW2)、 e_t 不相关的随机游走 (RW3)，从 RW1 到 RW3 对 e_t 的假设条件逐步放宽。基于此，本文通过单位根检验对市场是否存在弱式有效进行判断，若不存在单位根则认为市场无效，若存在单位根则在此基础上进行增量自相关检验和增量方差比率检验。

首先对各市场碳价时间序列数据进行 ADF 检验 (Augmented Dickey-Fuller Test)，EU ETS 碳价计算所得 ADF 统计量在每个阶段均不显著，表明碳价序列均存在单位根过程；在中国，全国市场及区域市场中北京、上海、重庆、福建四地碳价时间序列存在单位根过程。通过非参数检验 (Philips-Perron Test) 对以上结果进行验证，除深圳市场外其余市场碳价均存在单位根过程。

表 11 中国碳交易价格 ADF 检验结果

碳交易市场	ADF 统计量	1%临界值	5%临界值	10%临界值	Prob.
北京	-2.514	-3.430	-2.860	-2.570	0.1122
上海	-1.930	-3.430	-2.860	-2.570	0.3182
广东	-3.025	-3.430	-2.860	-2.570	0.0197**
深圳	-5.709	-3.430	-2.860	-2.570	0.0000***
天津	-3.792	-3.430	-2.860	-2.570	0.0030***
重庆	-1.126	-3.445	-2.872	-2.570	0.7045
湖北	-2.758	-3.430	-2.860	-2.570	0.0646*
福建	-1.708	-3.447	-2.873	-2.570	0.4268
全国	-0.631	-3.525	-2.899	-2.584	0.8638

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

表 12 欧盟碳交易价格 ADF 检验结果

碳交易阶段	ADF 统计量	1%临界值	5%临界值	10%临界值	Prob.
Phase_1	-1.592	-3.430	-2.860	-2.570	0.4874
Phase_2	-1.993	-3.430	-2.860	-2.570	0.2898
Phase_3	-0.483	-3.430	-2.860	-2.570	0.8952
Phase_4	-1.502	-3.474	-2.883	-2.573	0.5326

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

表 13 中国碳交易价格 PP 检验结果

碳交易市场	PP 统计量	1%临界值	5%临界值	10%临界值	Prob.
北京	-2.311	-3.430	-2.860	-2.860	0.1686
上海	-1.699	-3.430	-2.860	-2.570	0.4314
广东	-1.721	-3.430	-2.860	-2.570	0.4201
深圳	-4.575	-3.430	-2.860	-2.570	0.0001***
天津	-2.479	-3.430	-2.860	-2.570	0.1207
重庆	-1.365	-3.430	-2.860	-2.570	0.5990
湖北	-2.236	-3.430	-2.860	-2.570	0.1935
福建	-1.814	-3.430	-2.860	-2.570	0.3735
全国	-0.495	-3.525	-2.899	-2.584	0.8929

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

表 14 欧盟碳交易价格 PP 检验结果

碳交易阶段	PP 统计量	1%临界值	5%临界值	10%临界值	Prob.
Phase_1	-1.703	-3.430	-2.860	-2.570	0.4294
Phase_2	-1.997	-3.430	-2.860	-2.570	0.2877
Phase_3	-0.377	-3.430	-2.860	-2.570	0.9139
Phase_4	-1.436	-3.474	-2.883	-2.573	0.5651

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

若要证明存在随机游走，还需对序列增量 e_t 进行自相关检验。借鉴 Ljung 和 Box 的方法，对碳价序列做一阶差分后通过 QLB 统计量进行验证，滞后阶取 $m=40$ 。结合前文 ADF 和 PP 检验结果，中国市场中仅重庆、全国市场 QLB 统计量不显著，可认为满足 RW1，市场达到弱有效状态，欧盟碳交易市场则从第二阶段起达到弱有效状态。

表 15 中国碳交易价格增量自相关检验结果

碳交易市场	滞后阶 m	QLB 统计量	相伴概率 p	结论
北京	40	114.03	<0.001	拒绝 H0
上海	40	90.85	<0.001	拒绝 H0
广东	40	395.09	<0.001	拒绝 H0
深圳	40	478.13	<0.001	拒绝 H0
天津	40	134.48	<0.001	拒绝 H0
重庆	40	47.44	0.195	接受 H0
湖北	40	88.19	<0.001	拒绝 H0
福建	40	60.95	0.018	拒绝 H0
全国	40	16.07	0.999	接受 H0

表 16 欧盟碳交易价格增量自相关检验结果

碳交易阶段	滞后阶 m	QLB 统计量	相伴概率 p	结论
Phase_1	40	110.19	<0.001	拒绝 H0
Phase_2	40	36.874	0.612	接受 H0
Phase_3	40	28.639	0.910	接受 H0
Phase_4	40	12.247	1.000	接受 H0

考虑到随机游走过程中增量方差与时间差线性相关，根据 Lo & Mackinlay (1989) 研究结果，方差比率检验 (Variance Ratio Test) 相较 ADF 检验更为有效，进一步对中欧碳交易价格收益率进行 VR 检验，重点观察异方差调整后 $Z^*(q)$ 统计量检验情况：在中国，天津、福建和全国市场各滞后期下 $Z^*(q)$ 值在 1% 和 5% 水平上均不显著，无法拒绝原假设，可以认为价格波动满足 RW3，市场达到弱式有效；北京、重庆市场仅部分滞后期 $Z^*(q)$ 值不显著，无法认定为所有情况下均达到弱式有效；其余市场均未达到弱式有效。在欧洲市场，进入第二阶段后各滞后期 $Z^*(q)$ 值均不显著，也即是 2008 年以来市场处于弱式有效运行状态，与增量自相关检验结果一致。

表 17 中国碳交易价格增量方差比率检验结果

碳交易市场	q	VR (q)	Z (q)	single-level	$Z^*(q)$	single-level
北京	2	0.924	-2.6600	0.0078	-1.5431	0.1228
	4	0.827	-3.2345	0.0012	-1.9441	0.0519

上海	8	0.595	-4.7916	0.0000	-3.0594	0.0022
	12	0.462	-4.2641	0.0000	-2.9219	0.0035
	2	0.785	-7.3842	0.0000	-3.0905	0.0020
	4	0.558	-8.1048	0.0000	-3.8257	0.0001
广东	8	0.338	-7.6702	0.0000	-4.1452	0.0000
	12	0.262	-5.7294	0.0000	-3.4745	0.0005
	2	0.544	-18.4968	0.0000	-6.6219	0.0000
	4	0.381	-13.4241	0.0000	-5.1714	0.0000
深圳	8	0.270	-9.9882	0.0000	-4.2301	0.0000
	12	0.179	-7.5310	0.0000	-3.6262	0.0003
	2	0.529	-20.2037	0.0000	-9.5164	0.0000
	4	0.343	-15.0537	0.0000	-7.8793	0.0000
天津	8	0.236	-11.0778	0.0000	-6.4410	0.0000
	12	0.148	-8.3055	0.0000	-5.1676	0.0000
	2	0.731	-7.3635	0.0000	-0.9286	0.3531
	4	0.582	-6.1146	0.0000	-0.9440	0.3452
重庆	8	0.491	-4.6917	0.0000	-0.9518	0.3412
	12	0.422	-3.5618	0.0004	-0.9738	0.3302
	2	1.088	2.3515	0.0187	1.3555	0.1753
	4	1.256	3.6452	0.0003	2.1448	0.0320
湖北	8	1.399	3.5789	0.0003	2.2123	0.0269
	12	1.319	1.9199	0.0549	1.2597	0.2078
	2	0.759	-10.2314	0.0000	-4.5554	0.0000
	4	0.657	-7.7875	0.0000	-3.5573	0.0004
福建	8	0.547	-6.5000	0.0000	-3.1515	0.0016
	12	0.404	-5.7325	0.0000	-3.0191	0.0025
	2	0.923	-1.8886	0.0589	-0.7827	0.4338
	4	0.885	-1.5004	0.1335	-0.6707	0.5024
全国	8	0.828	-1.4219	0.1550	-0.7132	0.4757
	12	0.664	-1.8598	0.0629	-1.0168	0.3093
	2	0.846	-1.5225	0.1279	-1.0676	0.2857
	4	0.500	-2.6162	0.0089	-1.7693	0.0769
	8	0.364	-2.1066	0.0352	-1.6193	0.1054
	12	0.333	-1.4850	0.1375	-1.3684	0.1712

表 18 欧盟碳交易价格增量方差比率检验结果

碳交易阶段	q	VR (q)	Z (q)	single-level	Z*(q)	single-level
Phase_1	2	1.096	2.4973	0.0125	1.7840	0.0744
	4	1.174	2.4079	0.0160	1.9553	0.0505
	8	1.290	2.5295	0.0114	2.4550	0.0141
	12	0.972	-0.1625	0.8709	-0.1827	0.8550
Phase_2	2	1.070	2.4973	0.0125	1.8762	0.0606
	4	1.062	1.1802	0.2379	0.9008	0.3677
	8	1.071	0.8497	0.3955	0.6502	0.5156

Phase_3	12	1.145	1.1681	0.2428	0.9045	0.3657
	2	0.960	-1.7926	0.0730	-0.9932	0.3206
	4	0.958	-1.0249	0.3054	-0.5514	0.5814
	8	0.905	-1.4502	0.1470	-0.7813	0.4346
Phase_4	12	0.875	-1.2901	0.1970	-0.7267	0.4674
	2	0.734	-4.1319	0.0000	-1.8769	0.0605
	4	0.607	-3.2546	0.0011	-1.6653	0.0959
	8	0.604	-2.0717	0.0383	-1.1620	0.2452
	12	0.567	-1.5228	0.1278	-0.8970	0.3697

2.基于分形市场理论的实证检验

分形市场理论最早由 Edgar E. Peters 提出，表现为资本市场中投资者特性与信息传递非均匀。从实际应用看，分形市场理论相较于有效市场理论能够更好刻画市场非线性特征（王扬雷和杜莉，2015），从适用性看具备诸多优势（樊智和张世英，2002）。分形市场理论常用检验方法为重标极差分析法（R/S 分析法），核心在于随机序列极差随度量时长平方根增加而增加，主要通过计算 Hurst 指数实现，参考杨胜刚和卢向前（2003）、王扬雷和杜莉（2015）做法，将对数化处理后收益率序列划分为 A 个长度为 n 的子序列 $X_k (k=1,2,\dots,A)$ ，子序列极差和标准差分别为：

$$R_k = \max(X_k) - \min(X_k), (k=1,2,\dots,A)$$

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (X_{i,k} - \bar{X}_k)^2}, (i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,A)$$

其中单个子序列的重标极差为 $R_k / S_k, (k=1,2,\dots,A)$ ，得到 A 个长度为 n 的子序列的重标极差之均值 $(R/S)_n$ 。改变子序列长度和划分次数可构成一系列 n 以及与之对应的重标极差均值 $(R/S)_n$ ，则有 $\ln(R/S)_n = \ln c + H \ln n$ ，其中 c 为常数， H 即为 Hurst 指数， H 值越接近 0.5 表明原序列趋势不确定性越强，越接近随机游走状态，市场越接近有效。

按此思路，参考经验准则取 $n=10,11,\dots,\frac{N}{2}$ 进行计算。参考王扬雷（2015）做法，对随机游走判定标准稍加放松，假设 H 值介于 0.45~0.55 之间视作价格序列满足随机游走形式，则天津市场、重庆市场、全国市场、欧洲市场第三和第四阶段弱有效成立。

表 19 中国碳交易价格重标极差分析结果

碳交易市场	Hurst 值	p 值	R-squared
北京	0.3504	0.000	0.9188
上海	0.5714	0.000	0.9749
广东	0.4210	0.000	0.9379
深圳	0.2918	0.000	0.7851
天津	0.5082	0.000	0.9567
重庆	0.4865	0.000	0.9413
湖北	0.5687	0.000	0.9565
福建	0.2811	0.000	0.7521

全国	0.4663	0.000	0.9679
----	--------	-------	--------

表 20 欧盟碳交易价格重标极差分析结果

碳交易阶段	Hurst 值	p 值	R-squared
Phase_1	0.6297	0.000	0.9832
Phase_2	0.6036	0.000	0.9804
Phase_3	0.4811	0.000	0.9498
Phase_4	0.5424	0.000	0.9689

综合以上分析，可以看到 EU ETS 已达到弱式有效，中国仅全国市场和少量区域试点市场为弱式有效。总体来看，中国碳交易市场效率较欧盟整体偏低，国内地区之间发展水平差异较大，全国碳交易市场状况明显优于试点市场。

表 21 中欧碳交易市场效率检验结果汇总

碳交易市场/ 阶段	ADF 检验		PP 检验		增量自相 关检验	方差比率 检验（异 方差调整 后）	重标极差 分析	综合结论
	经检验存在单位根过程：				经检验达到随机游走状态：			
北京	○	○				○		接近弱式有效
上海	○	○						无效
广东		○						无效
深圳								无效
中国		○				○	○	接近弱式有效
天津		○				○	○	弱式有效
重庆	○	○	○			○	○	弱式有效
湖北		○						无效
福建	○	○				○		接近弱式有效
全国	○	○	○			○	○	弱式有效
Phase_1	○	○				○		接近弱式有效
欧盟	○	○	○			○	○	弱式有效
Phase_2	○	○	○			○	○	弱式有效
Phase_3	○	○	○			○	○	弱式有效
Phase_4	○	○	○			○	○	弱式有效

三、中国碳交易市场的风险测算

在对风险来源进行分析的基础上，本文对中欧碳交易市场风险水平进行测算与比较，并对中国试点碳交易市场风险进行异质性分析，以厘清区域间碳交易风险水平差异原因。

（一）风险来源

从风险来源角度可将碳交易市场风险划分为市场流动性风险、政策风险、微观主体转型

风险等：一是市场流动性风险反映市场主体完成理想碳排放配额交易难度，较高流动性风险可能造成盈余配额浪费，加大配额短缺者履约难度。二是政策风险反映相关政策变动对碳交易市场冲击，以发展周期较长的欧盟碳交易市场为例，2008年、2013年、2021年三轮政策调整对市场构成较大扰动，反映在交易价格为配额期货结算价的阶梯式波动。三是微观主体风险反映交易主体为满足履约要求面临的转型风险，最直接为减排开支增加带来的财务风险，其次为相关监管风险，微观主体转型不及预期将影响局部市场运行，若多个主体同时受影响则可能诱发连锁反应放大市场波动。除以上因素外，区域特征也可能对该地区碳交易市场产生影响，使得不同地区市场呈现差异化风险特征。

（二）风险测算

1.碳价离散程度

碳交易过程中风险主要源自碳价波动。参考易兰等（2018）、陈智颖等（2020）做法，中国区域碳交易市场运行时长大致与EU ETS第三阶段对应，而区域市场碳价标准差与EU ETS相比持平或偏高，全国碳交易市场的出现一定程度上缓解这种价格风险。

表 22 中欧碳价描述性统计

碳交易市场/阶段	N	St.Dev	Mean	min	Median	max
中 北京	1232	16.495	59.981	24.000	53.310	107.260
国 上海	1187	10.097	33.266	4.210	36.590	49.930
广东	1661	13.069	23.880	1.270	20.080	77.000
深圳	1858	19.603	31.967	1.000	29.405	122.970
天津	764	6.046	24.439	7.000	24.885	62.380
重庆	727	12.576	16.724	1.000	14.570	47.520
湖北	1818	7.364	24.579	9.380	24.720	54.640
福建	619	8.015	21.736	7.190	19.500	42.280
全国	114	5.272	45.371	30.919	43.899	58.700
欧 Phase_1	686	10.140	12.559	0.010	15.300	30.450
盟 Phase_2	1283	5.304	14.121	5.720	14.090	29.330
Phase_3	2064	8.514	11.863	2.700	7.180	33.290
Phase_4	259	12.707	53.592	31.530	53.420	89.090

2.碳价收益率波动情况

EU ETS 自成立以来碳价收益率多集中在 $\pm 10\%$ 之间，少数时间超过 $\pm 20\%$ ，整体风险较低。相比之下国内北京、上海等试点市场因受到干预，碳价收益率被限制在 $\pm 10\%$ 或 $\pm 20\%$ 以内，不受干预的广东、深圳市场收益率变化剧烈，随着收益率波动相对较小的全国碳交易市场规模扩张，中国碳交易收益率剧烈波动或将缓解。

3.碳价收益率在险价值

在险价值（VaR）指一定时期内给定置信水平下投资者的最小期望损失，条件在险价值（CVaR）则用于衡量给定置信水平下超过 VaR 值部分的期望损失，能更好反映资产价格波

动极端情况。参考王婷婷等（2016）、王影等（2020）做法，本文基于对数收益率进行测算，综合偏度、峰度、Jarque–Bera 统计量检验结果，中欧市场碳价序列均不满足正态分布特征，ARCH 检验结果显著说明收益率序列呈现波动聚集特征，应对波动风险进行更详细刻画。

表 23 中欧碳价对数收益率描述性统计

碳交易市场/ 阶段	N	St.Dev	Mean	Median	偏度	峰度	J-B 统计 量	ARCH 效应
中 北京	1231	8.267%	0.029%	0.096%	0.099	1.755***	81.537***	1230***
国 上海	1186	7.618%	0.031%	0.000%	0.039	1.774***	74.531***	1185***
广东	1660	186.633%	-0.016%	0.000%	-0.164***	1.900***	91.031***	1659***
深圳	1857	31.441%	-0.030%	-0.072%	0.055	1.804***	111.550***	1856***
天津	763	7.145%	-0.008%	0.000%	0.340***	1.367***	99.483***	762***
重庆	726	12.009%	0.035%	0.728%	-0.141	1.891***	39.600***	725***
湖北	1817	3.966%	0.024%	0.000%	0.027	1.808***	107.790***	1816***
福建	618	10.278%	-0.063%	0.000%	0.527***	2.150***	47.191***	617***
全国	113	6.152%	0.024%	0.001%	-0.032	1.704***	7.926**	112***
欧 Phase_1	685	31.433%	0.042%	0.000%	-0.008	1.797***	41.283***	684***
盟 Phase_2	1282	2.709%	-0.099%	0.000%	-0.007	1.801***	76.859***	1281***
Phase_3	2063	3.420%	0.079%	0.000%	0.000	1.800***	123.870***	2062***
Phase_4	258	2.733%	0.338%	0.483%	-0.008	1.802***	15.444***	257***

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

本文使用蒙特卡罗模拟法测算中欧碳价收益率尾部风险。考虑到 CVaR 具有更好使用效果，主要关注 CVaR 计算结果：一是中国市场 CVaR 整体高于 EU ETS，说明尾部风险高于欧盟市场；二是中国全国碳交易市场 CVaR 整体低于区域市场，说明全国市场建立一定程度上缓解碳价波幅较大情况；三是 EU ETS 第二阶段其 CVaR 降低，说明随着碳交易市场不断趋于成熟，碳交易价格震荡幅度逐步减小，或可为国内碳交易发展提供参考。结合前文对市场运行效率的讨论，中国碳交易市场交易量不规律变化对价格体系冲击较大，对交易者而言发生极端风险可能性较高。

表 24 中欧碳价收益率在险价值（90%置信水平）

碳交易市场/阶段	风险指标	Mean	Min	Max	N
中国 北京	VaR	-0.1061	-0.1110	-0.1017	1232
	CVaR	-0.1928	-0.1976	-0.1885	1232
上海	VaR	-0.0979	-0.1017	-0.0928	1187
	CVaR	-0.1363	-0.1390	-0.1335	1187
广东	VaR	-0.2386	-0.2490	-0.2293	1661
	CVaR	-0.5080	-0.5369	-0.5076	1661
深圳	VaR	-0.4026	-0.4181	-0.3870	1858
	CVaR	-0.7904	-0.8279	-0.7502	1858
天津	VaR	-0.0915	-0.0965	-0.0878	764
	CVaR	-0.1670	-0.1745	-0.1657	764
重庆	VaR	-0.1542	-0.1601	-0.1479	727
	CVaR	-0.2107	-0.2127	-0.2089	727

欧盟	湖北	VaR	-0.0511	-0.0528	-0.0486	1818
		CVaR	-0.0853	-0.0881	-0.0839	1818
	福建	VaR	-0.1313	-0.1368	-0.1264	619
		CVaR	-0.3884	-0.3894	-0.3657	619
	全国	VaR	-0.0792	-0.0828	-0.0760	114
		CVaR	-0.1526	-0.1637	-0.1468	114
	Phase_1	VaR	-0.4034	-0.4176	-0.3867	686
		CVaR	-0.8741	-0.9048	-0.8381	686
	Phase_2	VaR	-0.0337	-0.0350	-0.0324	1283
		CVaR	-0.0531	-0.0548	-0.0520	1283
	Phase_3	VaR	-0.0446	-0.0464	-0.0422	2064
		CVaR	-0.0748	-0.0771	-0.0723	2064
	Phase_4	VaR	-0.0385	-0.0402	-0.0369	259
		CVaR	-0.0726	-0.0750	-0.0720	259

表 25 中欧碳价收益率在险价值 (95%置信水平)

碳交易市场/阶段		风险指标	Mean	Min	Max	N
中国	北京	VaR	-0.1361	-0.1414	-0.1298	1232
		CVaR	-0.2069	-0.2083	-0.2043	1232
	上海	VaR	-0.1255	-0.1307	-0.1197	1187
		CVaR	-0.2300	-0.2353	-0.2225	1187
	广东	VaR	-0.3062	-0.3176	-0.2946	1661
		CVaR	-0.6261	-0.6409	-0.5945	1661
	深圳	VaR	-0.5166	-0.5394	-0.4949	1858
		CVaR	-0.9405	-0.9509	-0.9168	1858
	天津	VaR	-0.1174	-0.1221	-0.1126	764
		CVaR	-0.2917	-0.2981	-0.2841	764
	重庆	VaR	-0.1979	-0.2071	-0.1895	727
		CVaR	-0.2215	-0.2226	-0.2205	727
	湖北	VaR	-0.0655	-0.0686	-0.0632	1818
		CVaR	-0.1002	-0.1013	-0.0985	1818
	福建	VaR	-0.1685	-0.1744	-0.1610	619
		CVaR	-0.3894	-0.4030	-0.3720	619
	全国	VaR	-0.1017	-0.1057	-0.0967	114
		CVaR	-0.1904	-0.1978	-0.1811	114
欧盟	Phase_1	VaR	-0.5181	-0.5413	-0.4967	686
		CVaR	-1.0148	-1.0505	-0.9730	686
	Phase_2	VaR	-0.0435	-0.0455	-0.0416	1283
		CVaR	-0.0624	-0.0628	-0.0609	1283
	Phase_3	VaR	-0.0570	-0.0595	-0.0548	2064
		CVaR	-0.0896	-0.0930	-0.0868	2064
	Phase_4	VaR	-0.0485	-0.0502	-0.0466	259
		CVaR	-0.0767	-0.0776	-0.0750	259

表 26 中欧碳价收益率在险价值 (99%置信水平)

碳交易市场/阶段		风险指标	Mean	Min	Max	N
----------	--	------	------	-----	-----	---

中国	北京	VaR	-0.1921	-0.2029	-0.1819	1232
		CVaR	-0.2213	-0.2232	-0.2193	1232
	上海	VaR	-0.1774	-0.1877	-0.1681	1187
		CVaR	-0.3015	-0.3075	-0.2808	1187
	广东	VaR	-0.4328	-0.4545	-0.4082	1661
		CVaR	-0.7789	-0.7790	-0.7670	1661
	深圳	VaR	-0.7297	-0.7675	-0.6892	1858
		CVaR	-1.1935	-1.3159	-1.1749	1858
	天津	VaR	-0.1662	-0.1738	-0.1580	764
		CVaR	-0.3312	-0.3487	-0.3311	764
	重庆	VaR	-0.2793	-0.2951	-0.2645	727
		CVaR	-0.2851	-0.3001	-0.2716	727
	湖北	VaR	-0.0924	-0.0976	-0.0879	1818
		CVaR	-0.1236	-0.1258	-0.1220	1818
	福建	VaR	-0.2383	-0.2504	-0.2269	619
		CVaR	-0.4342	-0.4606	-0.4340	619
	全国	VaR	-0.1436	-0.1537	-0.1366	114
		CVaR	-0.2257	-0.2416	-0.2146	114
欧盟	Phase_1	VaR	-0.7315	-0.7677	-0.6961	686
		CVaR	-1.2425	-1.3039	-1.1823	686
	Phase_2	VaR	-0.0619	-0.0652	-0.0591	1283
		CVaR	-0.0794	-0.0803	-0.0780	1283
	Phase_3	VaR	-0.0803	-0.0845	-0.0765	2064
		CVaR	-0.1274	-0.1322	-0.1214	2064
	Phase_4	VaR	-0.0671	-0.0706	-0.0642	259
		CVaR	-0.0952	-0.1128	-0.0871	259

(三) 区域市场风险异质性分析

前文分析表明中国各碳交易市场风险指标分化明显, 本文进一步对其成因进行探究。由于项目型市场受政策因素影响较大且为存量交易状态, 本文研究主要围绕中国配额碳交易市场, 选取 8 家试点碳交易所及其所在地区为初始样本, 参考俞红海(2010)、赵云辉等(2019)、陈智颖等(2020)做法, 以碳交易价格及收益率波动代表市场风险水平, 选取经济状况、法制水平、工业水平、能耗水平为解释变量, 构建回归模型如下:

$$Risk_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Economy_{i,t} + \alpha_2 \cdot Legal_{i,t} + \alpha_3 \cdot Industry_{i,t} + \alpha_4 \cdot Energy_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 8$, $t = 2013, 2014, \dots, 2021$, 被解释变量市场风险水平 $Risk$ 分别以 $Risk1$ (碳交易价格收益率标准差)、 $Risk2$ (碳交易价格对数收益率的标准差) 表示, 解释变量依次为 $Economy$ (人均 GDP 的自然对数, 单位万元)、 $Legal$ (樊纲市场化指数“市场中介绍组织发育和法律制度环境”分项)、 $Industry$ (工业增加值的自然对数, 单位亿元)、 $Energy$ (能源强度, 表示为“能源消费总量/GDP”, 单位吨标准煤/万元), 数据来自各碳交易所、国家统计局、各省市统计局、中国能源统计年鉴、各省市统计年鉴、Wind, 部分指

标为手动计算，涉及广东省的各项数据均拆解为广东（除深圳）和深圳两部分。考虑到经济发展、政策执行、产业结构变动等因素的影响可能不会在当期显现，本文进行滞后一期回归，以考察各解释变量影响时滞。对以上变量进行固定效应的冗余变量似然比检验和 Hausman 检验，根据检验结果选择随机效应模型。

表 27 为市场风险水平影响因素实证检验结果。可以看到，不论是从当期还是滞后一期的角度，人均经济指标对当地碳交易市场风险水平均无显著影响，相反法制化水平对市场风险有较为显著负向作用，也即是法制化水平愈高的区域其下属试点碳交易市场交易价格波动幅度愈低，这一关系在当期和未来一期均成立。工业水平对碳交易市场风险呈现显著正向作用，表现在对数工业增加值愈高则对应市场风险水平愈高，这是由于工业企业是中国碳交易参与主体，工业发展水平高意味着参与碳交易主体及潜在交易量愈多，加之履约效应明显，易对市场产生较大冲击。能源强度对碳交易市场风险水平的影响呈现统计学显著，但不具备经济学上显著意义。总的来看，法制化与工业水平是造成中国试点碳交易市场风险特征分化的主要因素，强有力的政策执行有助于缓解碳价波动、降低市场风险。

表 27 市场风险水平影响因素实证检验结果

VARIABLES	当期模型		VARIABLES	当期模型	
	<i>Risk1_t</i>	<i>Risk2_t</i>		<i>Risk1_t</i>	<i>Risk2_t</i>
<i>Economy_t</i>	0.0881 (0.0857)	0.0323 (0.0480)	<i>Economy_{t-1}</i>	0.2289 (0.1429)	0.0691 (0.0547)
<i>Legal_t</i>	-0.0157* (0.0087)	-0.0130** (0.0055)	<i>Legal_{t-1}</i>	-0.0265* (0.0134)	-0.0175*** (0.0065)
<i>Industry_t</i>	0.1824*** (0.0488)	0.1231*** (0.0248)	<i>Industry_{t-1}</i>	0.2242*** (0.0720)	0.1245*** (0.0265)
<i>Energy_t</i>	-0.0001*** (0.0000)	-0.0001*** (0.0000)	<i>Energy_{t-1}</i>	-0.0001** (0.0000)	-0.0001*** (0.0000)
Constant	-1.4354*** (0.4819)	-0.8425*** (0.2493)	Constant	-1.9615** (0.7954)	-0.8791*** (0.2731)
Prob > F	0.0078	0.0001	Prob > F	0.0348	0.0002
Adj. R ²	0.2680	0.3672	Adj. R ²	0.1803	0.3283

注：（）内为 P/t 值，***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著。

四、结论与建议

本文通过构建指标体系对中国碳交易市场运行效率和市场风险水平进行定量测算，并进行国际比较分析。分析结果显示：第一，运行效率方面，各国碳交易市场准入环节均有政策指引机制，但中国碳排放配额以免费分配为主，配额交易价格偏低，难以充分激励市场主体，同时与发达市场相比，国内碳交易市场仍属于弱有效或无效状态，定价功能尚未完全发挥，碳交易以清缴履约为主要目的致使交易量集中在短时间内，不利于资源有效配置；第二，风险水平方面，供需结构间歇性失调导致中国碳价波动相较成熟市场更大，碳价收益率尾部风险较为突出，由于缺乏衍生品交易机制，叠加政策执行与法制水平的影响，中国碳交易市

场风险管理体系和机制尚不完善。

中国碳交易市场发展相对较晚，建设水平相较发达市场仍有较大提升空间，市场政策属性总体强于金融属性。本文认为，造成上述结果的主要原因在于国内碳交易市场化调节力度不足，覆盖领域、配额发放等存在较强政策性，未能充分调动市场主体参与减排和交易积极性；同时，由于缺乏完善价格机制和风险管理机制，碳排放配额交易的二级市场定价功能较弱，难以有效调和碳排放履约和碳配额交易之间期限错配的矛盾，进一步抑制市场主体积极性。为解决上述问题，中国需要在有效吸收发达国家碳交易市场建设经验基础上，充分发挥国内可供交易碳排放量规模优势，释放市场潜能，提升碳交易市场运行效率并有效控制风险。

根据上述分析结论，本文提出以下两个方面政策建议：第一，配额分配方面，中国碳交易市场应改良和完善市场机制，逐步引入并推广配额拍卖等更为市场化的分配方式，更好发挥市场经济激励和约束机制，改变企业“为了交易而交易”的被动参与现状，不断提升市场主体积极性。同时，可以考虑通过在一年中多次进行配额市场化分配，鼓励企业提前购置排放配额，降低履约期截止前短时间内交易需求，缓解市场运行中“履约期效应”。第二，针对市场运行机制带来的效率及风险问题，为提高市场活跃度、降低交易风险，应完善现有碳交易工具体系，丰富交易主体，发展相关衍生品市场，为市场参与者提供套期保值等风险管理手段，避免交易量过于集中破坏市场运行秩序，同时更低价格波动风险也能提高市场活跃度，更好发挥衍生品市场定价功能，争取国际碳排放定价权。自愿减排方面，对于建设期较长的主动减排项目，应尽快恢复和完善国家核证自愿减排量（Chinese Certified Emission Reduction, CCER）管理体系，作为配额交易重要补充，以完善中国碳交易市场激励机制。

参考文献

- [1] 柴尚蕾,周鹏. 基于非参数 Copula-CVaR 模型的碳金融市场集成风险测度[J]. 中国管理科学,2019, 27 (8) : 1-13
- [2] 陈智颖,许林,钱崇秀. 中国碳金融发展水平测度及其动态演化[J]. 数量经济技术经济研究,2020, 37 (8) : 62-82
- [3] 杜莉,张云. 我国碳排放总量控制交易的分配机制设计——基于欧盟排放交易体系的经验[J]. 国际金融研究, 2013 (7) : 51-58
- [4] 樊智,张世英. 金融市场的效率与分形市场理论[J]. 系统工程理论与实践, 2002 (03) : 13-19
- [5] 蒋晶晶,叶斌,马晓明. 基于 GARCH-EVT-VaR 模型的碳市场风险计量实证研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51 (3) : 511-517
- [6] 齐绍洲,张振源. 碳金融对可再生能源技术创新的异质性影响——基于欧盟碳市场的实证研究[J]. 国际金融研究, 2019 (5) : 13-23
- [7] 王定祥, 琚丽娟. 碳金融的概念及属性[J]. 经济研究参考, 2013 (24) : 19-21
- [8] 王婷婷, 张亚利, 王森晗. 中国碳金融市场风险度量研究[J]. 金融论坛, 2016, 21 (9) : 57-68
- [9] 王扬雷, 杜莉. 我国碳金融交易市场的有效性研究——基于北京碳交易市场的分形理论分析[J]. 管

理世界, 2015 (12) : 174-175

[10] 王影, 张远晴, 董锋. 中国碳市场风险测度[J]. 环境经济研究, 2020, 5 (4) : 30-53

[11] 杨超, 李国良, 门明. 国际碳交易市场的风险度量及对我国的启示——基于状态转移与极值理论的 VaR 比较研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2011, 28 (4) : 94-109+123

[12] 杨胜刚, 卢向前. 噪声交易、H 指数与中国外汇市场效率研究[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2003 (02) : 27-31

[13] 易兰, 李朝鹏, 杨历, 刘杰. 中国 7 大碳交易试点发育度对比研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28 (2) : 134-140

[14] 俞红海, 徐龙炳, 陈百助. 终极控股股东控制权与自由现金流过度投资[J]. 经济研究, 2010, 45 (08) : 103-114

[15] 张晨, 杨玉, 张涛. 基于 Copula 模型的商业银行碳金融市场风险整合度量[J]. 中国管理科学, 2015, 23 (4) : 61-69

[16] 张小艳, 张宗成. 期货市场有效性理论与实证检验[J]. 中国管理科学, 2005 (6) : 1-5

[17] 张小艳, 张宗成. 关于我国期货市场弱式有效性的研究[J]. 管理工程学报, 2007 (1) : 145-147+154

[18] 赵云辉, 张哲, 冯泰文, 陶克涛. 大数据发展、制度环境与政府治理效率[J]. 管理世界, 2019, 35 (11) : 119-132

[19] Alberto M, Frans P D. Carbon trading thickness and market efficiency[J]. Energy Economics, 2010, 32 (6) : 1331-1336

[20] Bredin D, Hyde S, Muckley C. A microstructure analysis of the carbon finance market[J]. International Review of Financial Analysis, 2014, 34: 222-234

[21] Betz R, Seifert S, Cramton P, Kerr S. Auctioning greenhouse gas emissions permits in Australia[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2010, 54 (2) : 219-238

[22] Blyth W, Bunn D. Coevolution of policy, market and technical price risks in the EU ETS[J]. Energy Policy, 2011, 39 (8) : 4578-4593

[23] Cramton P, Kerr S. Tradeable carbon permit auctions: How and why to auction not grandfather[J]. Energy policy, 2002, 30 (4) : 333-345

[24] Ehrhart K M, Hoppe C, Schleich J, Seifert S. The role of auctions and forward markets in the EU ETS: Counterbalancing the cost-inefficiencies of combining generous allocation with a ban on banking[J]. Climate Policy, Routledge, 2005 (5)

[25] Goeree J K, Palmer K, Holt C A, Shobe W, Burtraw D. An experimental study of auctions versus grandfathering to assign pollution permits[J]. Journal of the European Economic Association, 2010, 8 (2-3) : 514-525

[26] Holt C, Shobe W, Burtraw D, Palmer K, Goeree J, Myers E. Auction design for selling CO2 emission allowances under the regional greenhouse gas initiative[J]. Available at SSRN 2459462, 2007

[27] Kruger J, Pizer W A. The EU emissions trading directive: Opportunities and potential pitfalls[J]. Resources for the future Discussion Paper No.04-24

[28] Larson D F, Parks P. Risks, lessons learned, and secondary markets for greenhouse gas reductions[J]. World Bank Publications, 1999

[29] Lofgren Å, Burtraw D, Wråke M, Malinovskaya A. Architecture of the EU Emissions Trading System in Phase 3 and the Distribution of Allowance Asset Values[J]. Working Papers in Economics 634, University of Gothenburg, Department of Economics, 2015

[30] Lofgren Å, Burtraw D, Wråke M, Malinovskaya A. Distribution of Emissions Allowances and the Use of Auction Revenues in the European Union Emissions Trading System[J]. Review of Environmental Economics and Policy, 2018, 12 (2) : 284-303

[31] Lopomo G, Marx L M, McAdams D, Murray D. Carbon allowance auction design: An assessment of options for the United States[J]. Review of Environmental Economics and Policy, 2011 (5) : 25-43

[32] Dutschke M, Schlamadinger B, Wong J L P, Rumberg M. Value and risks of expiring carbon credits from afforestation and reforestation projects under the CDM[J]. Climate Policy, 2005, 5 (1) : 109-125

[33] Reboredo J C, Ugando M. Downside risks in EU carbon and fossil fuel markets[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2015 (111) : 17-35

[34] Wu T, Kung C C. Carbon emissions, technology upgradation and financing risk of the green supply chain competition[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020 (152) : 1-7



中国人民大学国际货币研究所

INTERNATIONAL MONETARY INSTITUTE OF RUC

地址：北京市海淀区中关村大街 59 号文化大厦 605 室，100872 电话：010-62516755 邮箱：imi@ruc.edu.cn