

引用格式: 齐绍洲, 徐珍珍, 杨芷萱. 欧盟碳边境调节机制下中国钢铁行业的碳配额分配策略[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 274-286. [Qi S Z, Xu Z Z, Yang Z X. Carbon allowance allocation strategy in China's steel industry under the EU carbon border adjustment mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 274-286.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.05

# 欧盟碳边境调节机制下中国钢铁行业的碳配额分配策略

齐绍洲<sup>1,2,3</sup>, 徐珍珍<sup>1,2</sup>, 杨芷萱<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学气候变化与能源经济研究中心, 武汉 430072; 3. 碳排放权交易湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

**摘要:** 欧盟启动碳边境调节机制将会影响中国钢铁行业的成本效率, 鲜有研究从碳市场角度考虑如何应对其导致的负面影响。基于此, 本文构建了两种价格可变的资源分配模型, 从碳市场角度研究在短期和长期中国减缓欧盟碳边境调节机制负面影响的碳配额分配策略。本文以中国各省份钢铁行业为例进行成本效率评估和碳配额分配, 研究发现: ①在短期中国碳价格不变和长期中国碳价格上涨情况下, 欧盟碳边境调节机制将会导致行业成本效率下降; ②中国出口到欧盟的钢铁产品数量越多则中国钢铁行业成本效率下降的幅度越大, 中国碳价格水平越高则钢铁行业的成本效率越稳定; ③通过碳市场优化配额分配能有效缓解欧盟碳边境调节机制的负面影响; ④在优化碳配额的同时进行能源消费量调整, 能够获得对配额总量影响较小的方案。本文研究结论为中国完善碳市场政策、有效应对欧盟碳边境调节机制的挑战提供了有益的政策启示。

**关键词:** 碳边境调节机制; 碳市场; 成本效率; 碳配额分配; 能源消费; 碳价格; 非参数前沿方法

DOI: 10.18402/resci.2022.02.05

## 1 引言

《巴黎协定》缔约方在气候政策严格性方面的差异可能会持续存在并不断增加, 这种不均衡的气候行动将会导致碳排放从管制更严格的国家转移到监管更宽松的地区, 即产生碳泄漏。为降低碳泄漏风险和避免境内产业竞争力的下降, 2021年7月14日, 欧盟在关于碳边境调节机制(carbon border adjustment mechanism, CBAM)的政策提案中, 提出对电力、钢铁、水泥、铝和化肥5个高能耗行业中隐含的碳排放征收碳关税, 2023—2025年是欧盟CBAM的试点阶段。中国是全球最大的CO<sub>2</sub>排放国和欧盟第一大商品进口国, 一旦欧盟启动CBAM, 一些能源密集型贸易暴露(energy intensive trade exposed, EITE)行业的出口成本、产出、就业和竞争力都将会受到影响<sup>[1]</sup>。欧盟CBAM是欧盟碳市场的补

充政策, 出口到欧盟的企业需要缴纳碳关税, 具体来说, 国外生产商需要购买“CBAM证书”, 该证书的价格将反映欧盟碳价格的动态变化。由于进口国调整关税会通过传递机制影响出口企业的成本<sup>[2]</sup>, 欧盟CBAM的实施将会导致被纳入中国全国碳市场的行业同时面临欧盟碳关税和中国碳价格的“双重碳成本”影响。因此, 对欧盟CBAM的影响进行评估, 以及从中国碳市场的角度出发制定应对欧盟CBAM负面影响的策略具有非常重要的现实意义。

中国于2021年7月正式启动了全国碳市场上线交易, 致力于2030年前实现碳达峰以及2060年前实现碳中和。碳市场是成本有效的市场化减排机制, 而配额分配是碳市场的核心要素之一<sup>[3]</sup>。将欧盟CBAM纳入中国配额分配等制度设计有利于保护中国行业竞争力。同时, 中国各省区减排能力

收稿日期: 2021-08-20, 修订日期: 2021-11-17

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA107)。

作者简介: 齐绍洲, 男, 河南平顶山人, 博士, 教授, 研究方向为气候变化与能源经济学。E-mail: cneus@126.com

2022年2月

和潜力差异较大<sup>[4-6]</sup>,即使同一行业的成本效率在不同省区也存在较大差异,因此,需要根据这些差异提出应对欧盟CBAM的区域性差异化策略。鉴于节能与减排具有协同效应<sup>[7]</sup>,研究如何合理地配置各省碳配额和能源消费目标、实施碳能联动,有利于增加中国应对欧盟CBAM的灵活性和协同性。

现有关于CBAM的研究大多集中在评估其对经济<sup>[8]</sup>、环境<sup>[9,10]</sup>、贸易<sup>[11]</sup>、福利<sup>[12,13]</sup>和排放<sup>[14]</sup>等的影响,如何缓解CBAM负面影响的文献相对较少。此外,在非参数前沿框架下进行配额分配的研究大多是基于技术效率进行优化<sup>[15-19]</sup>,目前尚未有文献基于成本效率进行优化。实际上,提高成本效率有助于降低企业生产成本和加强其竞争力<sup>[20]</sup>,在全国碳市场中基于成本效率进行配额分配优化,更符合碳市场成本有效性的政策特征,也可以更有效应对欧盟CBAM的挑战。在此背景下,本文构建了两种基于成本效率的配额分配理论模型,将CBAM纳入中国全国碳市场配额分配设计,并对如何科学分配各省份碳配额、合理配置能源消费、维持成本效率不变以保持行业国际竞争力展开实证研究。

本文以欧盟拟启动CBAM的年份(2023年)为研究年,并以中国30个省份(因数据缺失未包含西藏、香港、澳门、台湾)的钢铁行业为例,提出减缓欧盟CBAM负面影响的策略。选取钢铁行业作为代表性行业进行研究,是基于3个原因:①欧洲钢铁行业的碳泄漏率很高,是欧盟最先对外实施CBAM的领域;②钢铁行业已被纳入中国全国碳市场<sup>①</sup>;③中国是欧盟第四大钢铁产品进口国,2019年欧盟从中国进口的钢铁产品数量占其钢铁总进口量的9.49%<sup>②</sup>。因此,探究中国钢铁行业如何应对欧盟CBAM的影响对中国经济增长、就业、国际竞争力和完善碳市场政策设计等具有重要作用。本文旨在探索以下问题:在短期中国碳价格不变和在长期中国碳价格改变时,欧盟CBAM和中国碳市场背景下的“双重碳成本”将如何影响中国钢铁行业的成本效率,及如何优化碳配额分配以减缓欧盟CBAM的负面影响,从而保持中国钢铁行业的竞争力。

## 2 文献综述

### 2.1 应对CBAM负面影响的对策

CBAM通过内部化碳的社会成本来纠正市场缺陷,可被视作是全球外部性内部化的贸易工具<sup>[9]</sup>。实施CBAM能够激励目标国家进行减排行动,从而减少碳泄漏和抵消国际反馈效应引起的单方面减排的效率损失<sup>[21,22]</sup>。一些学者认为CBAM将会对其他国家的贸易和福利<sup>[11,12]</sup>产生负面影响,导致这些国家EITE行业的竞争力发生变化<sup>[12,23]</sup>。例如,Larch等<sup>[11]</sup>研究了CBAM对贸易、福利和排放的影响,结果表明CBAM能够减少全球碳排放和减少碳泄漏,但是这种减少是以降低全球贸易流量和降低福利为代价的,特别是对于发展中国家而言具有不利影响。Zhong等<sup>[12]</sup>认为,在国家层面,CBAM对于出口贸易更多的国家影响更大;在行业层面,CBAM将导致EITE行业市场份额的重新分配。

目前,对于如何应对CBAM负面影响的研究集中于定性分析<sup>[24-29]</sup>,但是对于如何减缓CBAM负面影响的定量分析文献较少,并且尚未有研究从碳市场角度考虑应对CBAM负面影响的对策。例如,Burke等<sup>[25]</sup>认为欧盟是英国碳密集型产品的主要贸易伙伴,欧盟CBAM将对英国原材料出口商不利,英国应考虑与欧盟进行密切的多边合作,包括将碳市场联系起来、设计公平的CBAM、逐步淘汰免费配额分配等,还应针对不同行业制定有针对性的出口政策。Acar等<sup>[24]</sup>研究了欧盟CBAM对土耳其出口的影响,结果表明欧盟市场上的土耳其出口商将面临11亿~18亿欧元的碳账单,并且水泥和电力行业将是受影响最严重的行业;而加快土耳其碳市场的筹备进程,将有助于最大程度地减少其经济损失。一些学者认为,从地区和行业层面开展应对CBAM负面影响的对策研究至关重要。例如,Lin等<sup>[26]</sup>、Li等<sup>[27]</sup>认为CBAM将会减少受该机制影响的国家的福利,并且对中国不同区域和不同行业的影响存在显著差异,因此有必要从区域和行业的角度考虑如何应对CBAM的影响。

### 2.2 碳排放配额分配方法

在现有文献中,碳配额分配方法可以大致分为

① 2021年中国生态环境部应对气候变化司发出《关于委托中国钢铁工业协会开展钢铁行业碳排放权交易相关工作的函》,委托中国钢铁工业协会开展钢铁行业纳入全国碳市场相关工作。

② 数据来源于欧洲钢铁工业联盟([www.eurofer.eu/](http://www.eurofer.eu/))。

4类,即指标法<sup>[30,31]</sup>、优化法<sup>[15,18,32]</sup>、博弈论法<sup>[33,34]</sup>和混合法<sup>[35-37]</sup>。其中,指标法被广泛应用,但却面临选择适当权重的问题;博弈论法和混合法由于缺乏透明度和比较复杂<sup>[38]</sup>,无法被广泛使用;相对而言,优化法被认为是有效的评估绩效和分配配额的方法<sup>[39]</sup>。本文在进行配额分配时需要对本成本效率进行评估,参数方法和非参数方法是进行效率分析的两种重要方法,其中,非参数方法不用设置特定的函数形式,能够避免参数假设错误引起的潜在问题。在非参数前沿框架下最具代表性的优化法是数据包络分析(DEA)方法,该方法的投入产出指标权重互为内生,能够弥补指标评价类方法的主观性不足<sup>[40]</sup>。本文按照国家、省份、行业和企业层面,总结了基于DEA模型进行研究的文献如何选取投入和产出指标(表1)。

Lins等<sup>[45]</sup>提出的零和博弈DEA(ZSG-DEA)模型为基于技术效率进行碳配额分配优化的研究奠定了良好基础,已被现有文献广泛使用<sup>[15,16,18,32]</sup>,但是目前尚未有文献基于成本效率进行碳配额分配优化。当考虑生产要素价格的影响时,成本效率比技术效率更为重要。欧盟CBAM将会影响中国出口企业的成本,甚至将对中国全国碳市场覆盖行业造成“双重碳成本”的影响,因此,基于成本效率进行配额分配优化研究具有重要的现实意义。

2.3 成本效率DEA方法

成本效率是指当产出一定时以最小投入成本进行生产的效率,即调整生产技术时必须考虑投入要素的价格以削减成本。在非参数前沿框架下,可

使用成本效率数据包络分析(成本效率DEA)模型对决策单元(DMU)的成本效率进行评估。目前,鲜有研究基于成本效率DEA模型进行配额分配优化。Dehnokhalaji等<sup>[46]</sup>在成本效率DEA模型基础上提出了一个资源分配模型,在投入要素价格不变的前提下,使用该模型对投入产出要素进行重新分配后任何DMU的成本效率都不下降,但是该模型无法解决要素价格改变情况下的分配问题。CBAM将会影响目标国出口产品的碳价格,在此背景下进行成本效率核算必须要考虑碳价格的改变因素。

通过上述文献梳理发现,现有研究还存在以下几点不足:首先,欧盟CBAM将对中国全国碳市场覆盖行业造成“双重碳成本”的影响,“双重碳成本”如何影响行业成本效率还未展开具体探析;其次,由于不同区域的不同行业受到CBAM的影响不同,中国政府如何在省级层面制定减缓CBAM负面影响的政策尚待研究;最后,现有大多数关于碳配额分配的研究均是基于技术效率角度,是否能够基于成本效率进行碳配额分配优化还有待进一步探索。

基于上述分析,本文可能的边际贡献体现在以下3个方面:①本文评估了“双重碳成本”对中国钢铁行业成本效率的影响,并从省级层面给出中国碳市场应对欧盟CBAM负面影响的对策;②不同于其他基于技术效率进行碳配额分配优化的研究,本文基于成本效率进行优化,致力于得到碳价格改变后成本效率不变的方案;③在理论模型方面,本文构造了两种允许价格变动的资源分配(VPRA)模型,两种模型均允许要素价格的改变。首先,VPRA(a)

表1 DEA模型的投入和产出指标

Table 1 Input and output indicators of the data envelopment analysis (DEA) model

作者	研究层面	投入	产出	人口或劳动力是投入或产出?	CO <sub>2</sub> 或温室气体是投入或产出?
Lei等 <sup>[41]</sup>	省	资本存量、人口和能源消耗	GDP、CO <sub>2</sub>	投入	产出
Cai等 <sup>[17]</sup>	省	CO <sub>2</sub>	GDP、人口	产出	投入
Cucchiella等 <sup>[32]</sup>	国家	温室气体排放、最终能源消耗、可再生能源消耗	GDP、人口	产出	投入
Pang等 <sup>[42]</sup>	国家	人口、能源消耗	GDP、CO <sub>2</sub>	投入	产出
Nolan等 <sup>[43]</sup>	行业	技术效率	劳动力、非柴油燃料、安全事故和路线里程	产出	
Oum等 <sup>[44]</sup>	行业	劳动力、资本、运营成本 and 乘客花费的时间	客运公里数、CO <sub>2</sub>	投入	产出
Zhang等 <sup>[15]</sup>	行业	CO <sub>2</sub>	能源消耗、工业产值		投入
Ma等 <sup>[18]</sup>	企业	装机容量、CO <sub>2</sub>	发电量		投入



2022年2月

模型是根据价格变化信息对碳配额按比例进行调整,最终使所有DMU的成本效率不变;其次,本文对Dehnohalaji<sup>[46]</sup>提出的资源分配模型进行拓展和改进,提出VPRA(b)模型,该模型克服了原模型中不允许要素价格改变的缺点,使用改进后的模型不仅能获得使所有DMU成本效率不变的配额分配方案,还能获得成本效率提升的方案。本文的研究方法和结论也可为其他受CBAM影响的行业、地区和国家特别是发展中国家和地区提供政策启示。

### 3 模型构建和数据处理

#### 3.1 模型构建

##### 3.1.1 成本效率DEA模型

现考虑 $n$ 个DMU,消费 $m$ 种投入要素并生产 $p$ 种产出。令 $X_j = (X_{1j}, \dots, X_{mj})$ 和 $Y_j = (Y_{1j}, \dots, Y_{pj})$ 分别代表第 $j$ 个DMU的投入向量和产出向量,其中 $j = 1, 2, \dots, n$ 。则与这些投入和产出相对应的生产可能性集 $T$ 定义如下:

$$T = \left\{ (X, Y) \mid \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq X, \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq Y, Y \geq 0, \lambda \in A \right\} \quad (1)$$

式中: $\lambda_j$ 为线性组合系数, $A = \mathbf{R}_+^n$ 代表规模收益可行集( $n$ 维正实数集)。当投入要素的单位价格(成本)已知时,可计算每个DMU的成本效率。假设 $c_i$ 是第 $i$ 种投入要素的价格, $i = 1, 2, \dots, m$ 。则衡量第 $k$ 个DMU的成本效率最小值 $CE_k$ 的模型为:

$$\begin{aligned} CE_k &= \text{Min} \theta \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \sum_{i=1}^m c_i X_{ij} \leq \theta \sum_{i=1}^m c_i X_{ik}, & k = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_{rj} \geq Y_{rk}, & r = 1, 2, \dots, p \\ \lambda \in A \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

基于“核算当产出和就业一定时以最小投入成本进行生产的效率”的研究目的,设置工业总产值和劳动力为产出变量,能源消费和碳配额为投入变量。其中,将劳动力作为产出变量的原因是增加行业就业可视为积极的社会目标;各省份碳配额从本质上可视为中国总排放控制目标下的资源分配,因此可将其作为投入要素。将上述投入产出变量代入公式(2),可计算出钢铁行业的成本效率。

成本效率的计算需要明确能源消费和碳配额这两种投入要素的价格。令 $c_{\text{EU}}$ 代表欧盟碳价格,

$c_1$ 为中国能源消费价格, $c_2$ 为中国碳价格。其中, $c_{\text{EU}} > 0$ ,  $c_1 > 0$ ,  $c_2 > 0$ 。假设欧盟根据中欧碳市场的价格差异征税,隐含碳的核算是基于化石燃料投入的直接碳排放和电力投入的间接碳排放。那么,欧盟实施CBAM后,中国钢铁行业面临的综合碳价格 $c'_2$ 由中国出口到欧盟的钢铁量占中国钢铁总量比例 $\alpha$ 、中国碳价格 $c_2$ 和欧盟碳价格 $c_{\text{EU}}$ 构成,如公式(3)所示:

$$c'_2 = (1 - \alpha)c_2 + \alpha c_{\text{EU}} \quad (3)$$

假设在短期中国碳价格不发生改变,在长期中国碳价格将发生改变,能源消费价格 $c_1$ 在欧盟实施CBAM前后始终保持不变。令中国最初的碳价格为 $c_0$ ,则在公式(3)中,在短期, $c_2$ 表示不发生改变的中国碳价格,即 $c_2 = c_0$ ;在长期, $c_2$ 表示改变之后的中国碳价格,此时 $c_2 > c_0 > 0$ 或者 $c_0 > c_2 > 0$ 。分别把 $c_2$ 和 $c'_2$ 代入公式(2)即可得到欧盟实施CBAM前后中国钢铁行业的成本效率,比较二者差异可得到中国钢铁行业受欧盟CBAM影响的程度。

##### 3.1.2 VPRA模型

下面将构建两种不同的VPRA模型。VPRA(a)模型的构建是基于所有DMU可以根据其投入或产出等比例调整的假设。本文专注于投入要素的调整,以最小的成本实现一定量的产出,对应的VPRA(a)模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Min} \Delta X &= [\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n] \mathbf{I} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} X_{ij} \leq X_{ik} + \Delta X_{ik} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} Y_{rj} \geq Y_{rk} \\ \Delta X_{ik} = \left( \frac{c_i}{c'_i} - 1 \right) X_{ik} \\ \lambda \in A \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $(X_{ik} + \Delta X_{ik}, Y_{rk})$ 是对投入要素重新分配后的第 $k$ 个DMU向量, $\Delta X_{ik}$ 是投入要素的改变量, $\mathbf{I}$ 是 $n$ 维单位向量, $c_i$ 是初始价格, $c'_i$ 是改变后的要素价格。根据式(4), $\Delta X_{ik} = \left( \frac{c_i}{c'_i} - 1 \right) X_{ik}$ ,其中 $0 < \frac{c_i}{c'_i} < 1$ 。

令 $X'_{ik} = X_{ik} + \Delta X_{ik}$ ,那么,当 $\frac{X'_{ik}}{X_{ik}} = \frac{c_i}{c'_i}$ 时,所有DMU的成本效率保持不变。

VPRA(b)模型是对Dehnohalaji等<sup>[46]</sup>开发的资

源分配模型的拓展和改进,该模型克服了原模型在进行投入产出调整时必须保持要素价格不变的缺点,使用VPRA(b)模型对每个DMU进行要素调整后能够保持最终成本效率不低于初始成本效率。对应的VPRA(b)模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Min} \Delta X &= [\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n] I \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} X_{ij} \leq X_{ik} + \Delta X_{ik} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} Y_{rj} \geq Y_{rk} \\ \sum_{i=1}^m c'_i (X_{ik} + \Delta X_{ik}) \leq \sum_{i=1}^m c_i X_{ik} \\ -X_k < l_k \leq \Delta X_k \leq u_k \\ \lambda \in A \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\Delta X_{ik}$  代表投入要素的改变量,  $l_k$  和  $u_k$  分别代表  $\Delta X_k$  的上界和下界,  $c_i$  和  $c'_i$  分别代表调整前后的要素价格。

在构建了上述两种VPRA模型的基础上,分别讨论在短期和长期如何调整碳配额以缓解欧盟CBAM对成本效率的影响。令  $X_{1k}$  和  $X_{2k}$  分别代表能源消费和碳配额量,  $X'_{1k}$  和  $X'_{2k}$  分别代表调整后的能源消费量和碳配额量,  $\Delta X_{1k}$  和  $\Delta X_{2k}$  分别代表能源消费和碳配额的调整量。

首先,根据VPRA(a)模型,当  $\Delta X_{1k}=0, \Delta X_{2k}>0$  时,得到  $\frac{X'_{2k}}{X_{2k}} = \frac{c_0}{c_2}$ , 它表示当调整后的碳配额量和调整前的碳配额量恰好等于中国最初的碳价格和欧盟实施CBAM后的综合碳价格之比时,行业成本效率能够保持不变。其次,根据VPRA(b)模型,当  $\Delta X_{1k}>0, \Delta X_{2k}>0$  时,令  $\sum_{i=1}^m c'_i (X_{ik} + \Delta X_{ik}) = \sum_{i=1}^m c_i X_{ik}$ , 代入  $c_1, c_0$  和  $c_2$  可得到:

$$c_1 (X_{1k} + \Delta X_{1k}) + c'_2 (X_{2k} + \Delta X_{2k}) = c_1 X_{1k} + c_0 X_{2k} \quad (6)$$

$$X'_{1k} = X_{1k} + \Delta X_{1k} = \frac{c_1 X_{1k} + c_0 X_{2k} - c'_2 X'_{2k}}{c_1} \quad (7)$$

根据公式(7)调整碳配额和能源消费,由于VPRA(b)模型的特性,所有DMUs的成本效率均不低于最初的成本效率。调整之后,应使各省份的最终能源消费量 $\leq$ 初始能源消费量,同时,各省份的最终碳配额 $\leq$ 初始碳配额量,即  $X'_{1k} \leq X_{1k}$  且  $X'_{2k} \leq X_{2k}$ 。根据公平原则,令各省份在其各自的初

始碳配额分配基础上缩减相同比例,即令  $X'_{2k} = \gamma X_{2k}$ 。可以验证,当  $\gamma = \frac{c_0}{c_2}$  时,  $X'_{2k} = \frac{c_0}{c_2} X_{2k} < X_{2k}$ , 且  $X'_{1k} = X_{1k}$ , 调整之后的最终成本效率等于初始成本效率;当  $\frac{c_0}{c_2} < \gamma \leq 1$  时,有

$X'_{1k} < X_{1k}$  且  $X'_{2k} \leq X_{2k}$  成立,调整之后的最终成本效率大于初始成本效率。

通过以上分析,可知利用VPRA(a)模型和VPRA(b)模型缓解欧盟CBAM的影响有以下异同点:首先,使用VPRA(a)模型只需要调整碳配额,而使用VPRA(b)模型需要同时调整碳配额和能源消费量;其次,使用VPRA(a)模型可以获得成本效率不变的方案;而使用VPRA(b)模型不仅可以获得成本效率不变的方案,而且还能进一步获得最终成本效率大于初始成本效率的方案。

### 3.2 数据和情景设置

#### 3.2.1 数据来源和处理

以中国30个省份的钢铁行业为研究对象,有4个相关的投入产出指标,分别包括工业总产值、劳动力投入、化石能源消费和CO<sub>2</sub>排放。上述指标在2023年的估计数据,是根据各指标的历史数据,调整离群值后使用一次移动平均法、二次移动平均法、一次指数平滑法、二次指数平滑法、阻尼趋势法和ARIMA模型6种方法预测,然后选择均方根误差作为确定最佳时间序列预测方法的误差度量。相关指标的历史数据及来源如下:工业总产值原始数据来源于《中国工业统计年鉴》(2002—2018年),利用《中国价格统计年鉴》中的工业生产者出厂价格指数将数据平减为2001年不变价格;劳动力投入表示年均就业水平,原始数据来源于各省统计年鉴(2002—2018年),其中2012年数据缺失,使用2011年和2013年的平均值补充;1997—2017年化石能源消费和CO<sub>2</sub>排放数据来源于中国碳排放数据库(<https://www.ceads.net/>),将不同类型的能源转换为标准煤后进行加总获得能源消费总量。

2020年,中国GDP仅增长2.30%<sup>③</sup>,中国政府考虑经济运行恢复情况,将2021年GDP预期目标设定为6%以上,该目标能够与今后目标平稳衔接,有

③ 数据来源于国家统计局。

2022年2月

助于推动中国经济高质量发展<sup>④</sup>。基于上述背景,本文将2021—2023年中国GDP增速均设置为6.50%。中国国家自主贡献目标是到2020年碳排放强度比2005年下降40%~45%,2030年碳排放强度比2005年下降60%~65%。因此,本文以2020年碳排放强度相对于2005年的下降率为基础,设置2021—2023年的下降率在上述基础上逐年降低2%。根据上述碳排放强度下降率和GDP目标值,预测2021—2023年中国碳排放总量分别为100.78亿、101.26亿和101.37亿t。2005—2017年中国钢铁行业碳排放量占中国碳排放总量的比例比较稳定,平均占比在13%~15%之间,取中间值14%,并据此推算出中国2021—2023年钢铁行业碳排放量分别为14.11亿、14.18亿和14.19亿t。中国钢铁行业产品结构比较复杂,因此使用历史强度下降法核算各省钢铁行业在2023年的初始碳配额,然后分别使用两种VPRA模型进行配额再分配。

### 3.2.2 参数和情景设置

在碳市场中,碳价格将根据供求关系变化。现有文献根据研究目的,分别将碳价格设置为外生变量<sup>[47]</sup>或者内生变量<sup>[48,49]</sup>。由于需要研究欧盟CBAM的影响及中国碳市场的应对措施,而非研究碳市场的影响,因此本文将碳价格设置为外生变量。根据欧盟历年碳价格走势<sup>⑤</sup>,同时借鉴Sakai等<sup>[50]</sup>的做法,将2023年欧盟碳价格设置为300元/t,该价格是短期内高度发达经济体的合理目标<sup>[50,51]</sup>。中国全国碳市场尚未形成成熟的碳价格机制,因此参考中国7个碳交易试点的碳价格<sup>[52]</sup>,将中国碳价格范围设置在0~100元/t之间(表2)。中国秦皇岛港是全球最大的煤炭海运港口,其煤炭价格是中国煤炭市场的“风向标”。根据2020年前的秦皇岛港煤炭价格<sup>⑥</sup>,线性外推得2023年中国煤炭价格为537元/t,换算成标准煤价格为752元/t。假设欧盟实施CBAM前后中国能源价格不变,则5种情景下的能源消费价格均为752元/t标准煤。

2010—2019年欧盟从中国进口的钢材占中国

表2 关于价格的情景设置(元/t)

	中国碳价格	欧盟碳价格	能源消费价格
情景一	20	300	752
情景二	40	300	752
情景三	60	300	752
情景四	80	300	752
情景五	100	300	752

钢铁产量的比例 $\alpha$ 约为0.20%~0.90%<sup>⑦</sup>。本文设置 $\alpha=0.20\%, 0.40\%, 0.60\%, 0.80\%, 1.00\%$ ,将 $\alpha$ 带入公式(3)可分别计算5种情景下的综合碳价格 $c_2'$ 。

## 4 结果与讨论

### 4.1 欧盟CBAM对成本效率的影响特征分析

图1和图2<sup>⑧</sup>分别展示了在短期和长期欧盟CBAM对中国钢铁行业成本效率的影响。

在短期:①中国碳价格不发生改变时,欧盟实施CBAM后将会导致中国钢铁行业的成本效率下降,并且欧盟从中国进口钢铁产品数量越多(即当 $\alpha$ 越大时),成本效率的降低幅度就越大。②当欧盟从中国进口的钢铁产品数量相同时(即当 $\alpha$ 相同时),中国碳价格越高,钢铁行业成本效率下降的幅度就越小。这说明中国碳价格水平越高,钢铁行业的成本效率就越稳定,抵御欧盟CBAM的负面影响的能力也越强。③对比欧盟启动CBAM之前5种情景下的初始成本效率,可以发现,中国碳价格越高

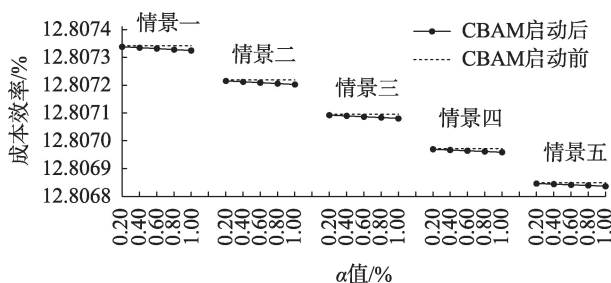


图1 短期中国碳价格不变时欧盟CBAM对成本效率影响

Figure 1 Impacts of the EU carbon border adjustment mechanism (CBAM) on cost efficiency when the carbon price in China remains unchanged in the short term

④ 资料来源于第十三届全国人民代表大会第四次会议《政府工作报告》。

⑤ 数据来源于EMBER(<https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>)。

⑥ 数据来源于中国煤炭市场网(<https://www.cctd.com.cn/>)。

⑦ 数据来源:作者计算。欧盟从中国进口的钢材数量来自Eurofer(<https://www.eurofer.eu/>);中国钢材产量数据来自《中国钢铁工业年鉴》(2011—2020年)。

⑧ 限于篇幅限制,长期结果仅展示情景一下中国碳价格发生改变时CBAM的影响。



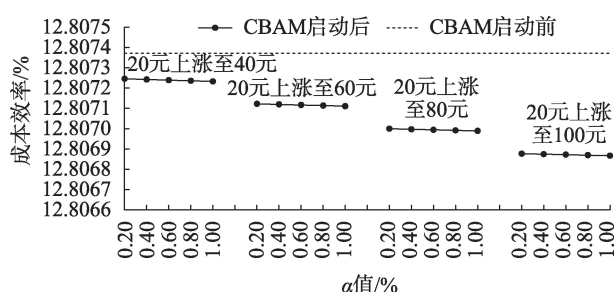


图2 长期(情景一)中国碳价格发生改变时欧盟CBAM对成本效率影响

Figure 2 Impacts of the EU carbon border adjustment mechanism (CBAM) on cost efficiency when the carbon price in China changes in the long term (scenario 1)

时中国钢铁行业的初始成本效率越低。欧盟启动CBAM之后虽然各情景下的中国钢铁行业的成本效率随着 $\alpha$ 的增大逐渐下降,但不同情景下的成本效率依然差距较大,这是因为更高的中国碳价格会迫使中国钢铁企业承担更大的成本。随着中国全国碳市场的推进,纳入碳市场的钢铁企业将会受到更严格的碳约束,企业必须为使用碳排放权这一稀缺环境资源承担相应的成本。为了增强竞争力和提高成本效率,中国钢铁企业需要将碳排放管理提升至企业战略层面,通过加大低碳技术投资、利用清洁能源等方式减少企业碳排放。

在长期:①欧盟启动CBAM后,当中国碳价格上升时,钢铁行业的成本效率将会下降。②当欧盟进口钢铁数量相同时( $\alpha$ 值相同),中国碳价格增长绝对值越大则欧盟启动CBAM后导致中国钢铁行业的成本效率下降越多。例如,当中国碳价格由20元/t分别上涨至40、60、80和100元/t时,欧盟启动CBAM后导致中国钢铁行业的成本效率下降幅度越来越大。由此可见,政府有必要对碳价格进行有效调控,构建完善的碳价格稳定机制以避免碳价格出现大幅波动。

通过以上分析可知,在短期和长期,欧盟启动CBAM以及中国碳价格的变动将会导致综合碳价格变动,进而影响中国钢铁行业的成本效率水平。中国碳市场可以通过配额分配机制激励中国钢铁企业完成碳减排目标,推动企业向低碳领域发展;然而,若配额分配过于宽松可能导致中国碳价格水平偏低,此时企业将失去进行低碳技术创新的动力,甚至可能在短期内扩大生产并增加碳排放,这

将不利于碳市场的健康发展<sup>[53]</sup>。因此,中国碳市场在进行配额分配时需要逐步优化配额分配方法,并且分配配额要适度从紧<sup>[54]</sup>,这意味着中国碳价格水平在未来可能会持续上涨,企业将面临成本效率下降的风险。在此背景下,有必要对中国碳配额进行合理配置,探究在短期和长期维持各省钢铁行业成本效率不变的方案。

接下来,本文分析了利用VPRA(a)模型和VPRA(b)模型对碳配额进行调整的策略,这些策略能够保持各省钢铁行业成本效率在短期和长期不变,最终的配额分配和能源消耗的配置方案可以有效应对欧盟CBAM的负面影响。

## 4.2 使用VPRA(a)模型调整碳配额的策略分析

表3展示了在短期内中国碳价格不变时,使用VPRA(a)模型缓解欧盟CBAM负面影响的配额总量调整方案。本文估算的中国2023年钢铁行业总配额为14.19亿t。当 $\alpha$ 的范围为0.20%~1.00%时,各省份若要维持钢铁行业最初的成本效率水平,则必须削减其初始配额量,使调整后的配额总量减少到12.45亿~14.13亿t,即调整之后的碳配额总量需要达到初始配额量的87.74%~99.58%。对VPRA(a)模型调整碳配额的策略进行分析可知:

在短期:①当欧盟进口固定数量的钢铁产品时(即在恒定的 $\alpha$ 下),中国碳价格水平越高,钢铁行业需要削减的碳配额越少。②在同一情景下,欧盟从中国进口的钢铁数量越多(即 $\alpha$ 越高),中国钢铁行业需要削减的碳配额量越多。例如,在情景一下,对比 $\alpha=0.20\%$ 和 $1.00\%$ 时需要削减的碳配额量,差距达到了1.35亿t。图3以情景一为例,展示了当 $\alpha=1.00\%$ 时,为应对欧盟CBAM对成本效率的负面影响,中国各省份的碳配额分配调整策略。

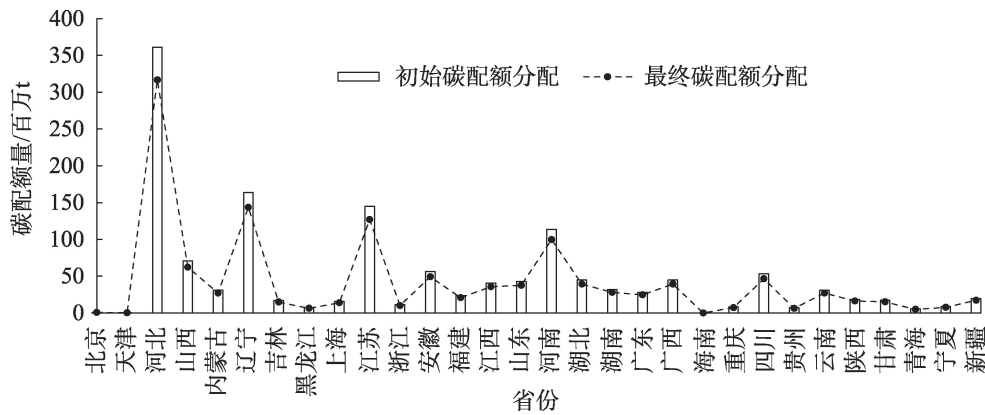
在长期,当中国初始碳价格分别为20、40、60和80元/t,且在碳价格均增长至100元/t的情况下,根

表3 短期碳配额调整方案(亿t)

Table 3 Short-term carbon allowance adjustment schemes ( $10^8$  t)

$\alpha$ /%	情景一	情景二	情景三	情景四	情景五
0.20	13.80	14.01	14.08	14.11	14.13
0.40	13.44	13.83	13.97	14.04	14.08
0.60	13.09	13.66	13.86	13.96	14.02
0.80	12.76	13.49	13.75	13.88	13.97
1.00	12.45	13.32	13.64	13.81	13.91

2022年2月

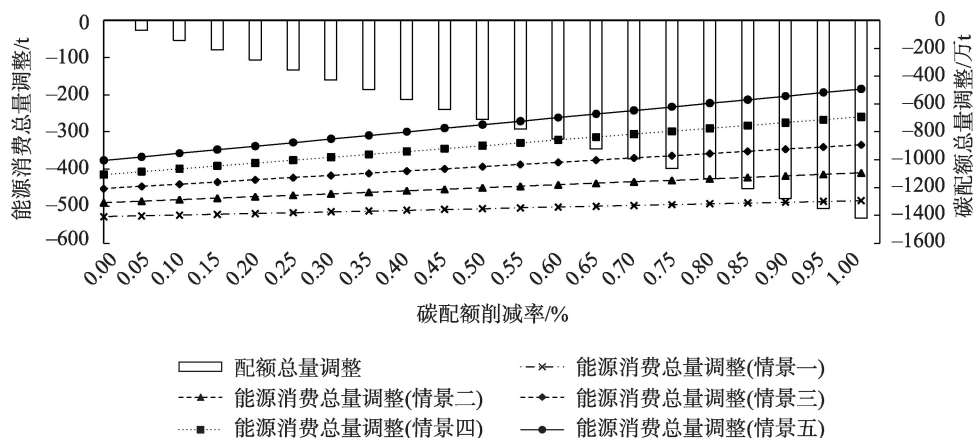
图3 情景一旦 $\alpha=1.00\%$ 时中国各省份的碳配额分配Figure 3 Carbon allowance allocation of Chinese provinces under scenario 1 and when  $\alpha=1.00\%$ 

据本文的测算结果,使用VPRA(a)模型缓解欧盟CBAM的负面影响时,不同 $\alpha$ 下需要削减的平均配额量分别为11.39亿、8.58亿、5.78亿和2.97亿t。这说明,初始中国碳价格水平越低,在长期中国碳价格上涨时钢铁行业为避免成本效率下降需要削减的碳配额越多。由此可见,中国碳价格越高,中国钢铁行业应对欧盟CBAM负面影响的能力越强。但是,在长期使用VPRA(a)模型需要进行较大幅度的碳配额调整,才能缓解欧盟CBAM的负面影响,这将会给中国钢铁企业带来很大的减排压力,因此本文认为VPRA(a)模型不适用于获得长期中国碳价格上涨时应对欧盟CBAM负面影响的方案。

#### 4.3 使用VPRA(b)模型调整碳配额的策略分析

为避免中国钢铁行业的成本效率降低,同时为

了获得对中国碳配额总量影响较小的方案,在使用VPRA(b)模型时,限制碳配额的削减率不超过1.00%。图4展示了在短期中国碳价格不变时<sup>⑨</sup>,为应对欧盟CBAM负面影响的碳配额总量和能源消费总量调整方案。本文估算的中国钢铁行业在2023年的能源消费总量为6.91亿t标准煤。分析VPRA(b)模型的测算结果,在短期:①当 $\alpha$ 的范围为0.20%~1.00%,并且碳配额的削减率范围是0.00%~1.00%时,若要维持钢铁行业最初的成本效率水平,在碳配额削减量不超过1419万t的情况下还需要同时削减184.92~528.35 t标准煤的能源消费总量。②在相同的欧盟进口数量( $\alpha$ 相同)和相同的碳配额削减率下,中国碳价格水平越高需要削减的能源消费总量越少。这说明中国碳价格水平越高,中国钢

图4 短期 $\alpha=1.00\%$ 时应对欧盟CBAM的配额总量和能源消费总量调整方案Figure 4 Total allowance and total energy consumption adjustment plan for the EU carbon border adjustment mechanism (CBAM) in the short term when  $\alpha=1.00\%$ 

⑨ 限于篇幅限制,仅展示 $\alpha=1\%$ 时中国碳价格发生改变时CBAM的影响结果。



铁行业应对欧盟 CBAM 负面影响的能力越强。图 5 以情景一为例,展示了当  $\alpha=1.00\%$  时对中国各省份钢铁行业进行 0.10% 的碳配额削减,同时根据 VPRA(b)模型对各省份钢铁行业的初始能源消费量进行调整的策略。由图 5 可知,在短期中国碳价格不变时,北京、湖南、重庆和河南在削减碳配额的同时需要进行较多的能源消费调整,天津和海南进行调整的幅度较小。这是因为天津和海南以最小成本利用投入要素进行生产的能力更强,在面对欧盟 CBAM 负面影响时钢铁行业的成本效率更稳定;相对而言,北京、湖南、重庆和河南需要付出更大程度的节能和减排努力,才能有效抵御欧盟 CBAM 的负面影响。

图 6 展示了在长期中国碳价格改变时,中国钢铁行业为应对欧盟 CBAM 负面影响的碳配额总量和能源消费总量调整方案。根据 VPRA(b)模型的

测算结果,在长期:①当  $\alpha$  的范围为 0.20%~1.00%,并且碳配额的削减率范围为 0.00%~1.00%时,若要维持最初的成本效率水平,在碳配额削减量不超过 1419 万 t 的情况下还需要同时削减的能源消费总量为 14982~15473 t 标准煤。②在相同的碳价格增长量、相同的欧盟进口数量( $\alpha$  相同)以及相同的碳配额削减率下,初始的中国碳价格水平越高,需要削减的能源消费总量越少。图 7 以情景一为例,展示了当  $\alpha=1.00\%$  时,中国碳价格由 20 元/t 上涨至 100 元/t,中国钢铁行业为应对欧盟 CBAM 的负面影响,在进行 0.10% 的碳配额削减的同时使用 VPRA(b)模型对能源消费量进行调整的策略。图 7 展示的趋势与图 5 相似,结合二者可知,无论在短期中国碳价格不变或者是在长期中国碳价格上涨的情景,那些应对欧盟 CBAM 负面影响能力较强的省份(例如天津和海南)需要进行的节能和减排努力始终较小,在

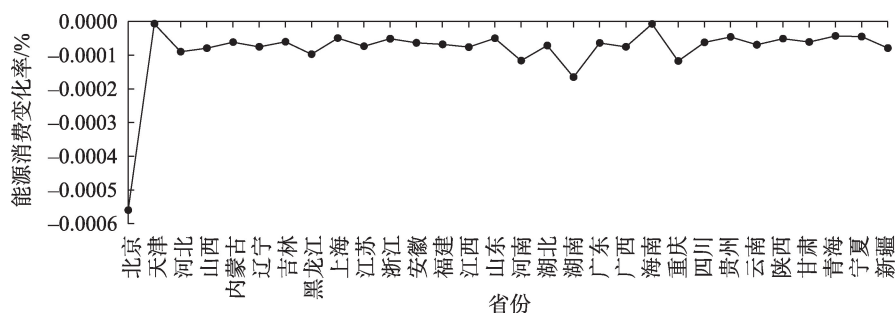


图 5 短期(情景一)当  $\alpha=1.00\%$  时的中国各省份能源消费变化率

Figure 5 Change rate of energy consumption in each province in China under scenario 1 and when  $\alpha=1.00\%$  in the short term

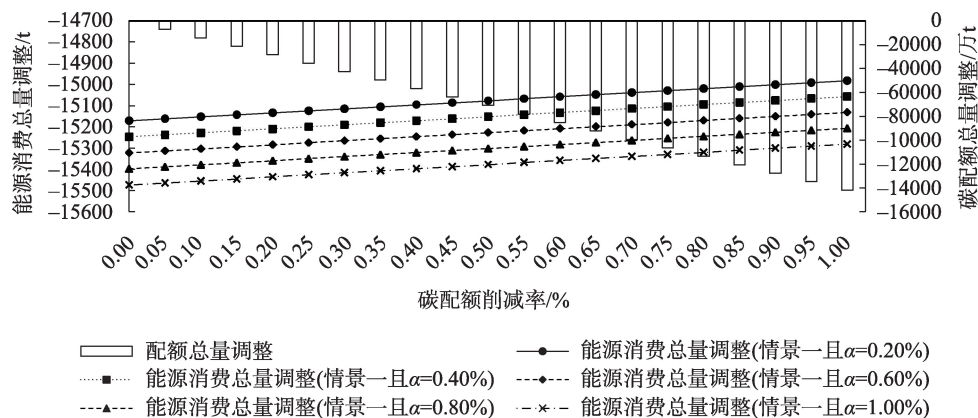
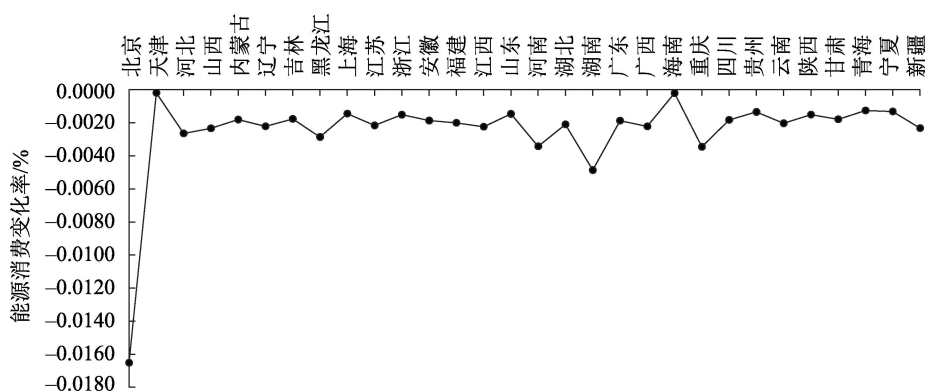


图 6 长期中国碳价格从 20 元/t 上涨至 100 元/t 时应对欧盟 CBAM 的调整方案

Figure 6 China's long-term carbon price increases from 20 yuan/ton to 100 yuan/ton in response to the EU carbon border adjustment mechanism (CBAM) adjustment plan

注:情景一下中国初始碳价格为 20 元/t,在长期,中国碳价格从初始的 20 元/t 上涨至 100 元/t。

2022年2月

图7 在长期情景一下当 $\alpha=1.00\%$ 时中国各省份能源消费变化率Figure 7 Energy consumption change rate of each province in China under scenario 1 and when  $\alpha=1.00\%$  in the long run

注:情景一下中国初始碳价格为20元/t,在长期,中国碳价格从初始的20元/t上涨至100元/t。各省份碳配额削减率均为0.10%。

长期,北京、湖南、重庆和河南这些省份需要加强以最小成本利用投入要素进行钢铁生产的能力,提升钢铁行业的成本效率水平。

## 5 结论与政策建议

### 5.1 结论

欧盟启动CBAM将会对中国钢铁行业的成本效率产生负面影响,削弱中国企业的竞争力。能否维持行业成本效率、有效配置碳配额和能源消费关系到中国经济的高质量发展。目前,尚未有文献从碳市场角度考虑如何应对CBAM的影响。为了得到维持行业成本效率不变的配额分配方案,本文在非参数前沿框架下,构建了维持行业成本效率不变的资源分配理论模型,以中国钢铁行业数据为例,评估了在短期和长期欧盟实施CBAM对行业成本效率的影响,并从碳市场角度提出应对欧盟CBAM负面影响的策略。研究结果表明:

(1)短期中国碳价格不变时,欧盟实施CBAM将会导致中国钢铁行业成本效率下降;欧盟从中国进口钢铁产品数量越多,成本效率下降幅度就越大;中国碳价格水平越高越有助于提升中国钢铁行业抵御欧盟CBAM负面影响的能力。

(2)在长期中国碳价格上涨以及欧盟CBAM的双重影响下,中国钢铁行业成本效率将会下降;中国碳价格增长绝对值越大时,成本效率下降幅度越大;保持稳定的碳价格水平有助于提升中国钢铁行业抵御欧盟CBAM负面影响的能力。

(3)为缓解欧盟CBAM的负面影响,中国钢铁行业需要削减一部分碳配额,并且当中国碳价格水

平越低时,需要削减的配额量越多。那些以最小成本利用投入要素进行生产的能力较差的省份,需要付出更大程度的节能和减排努力,才能有效抵御欧盟CBAM的负面影响。

(4)在优化碳配额的同时进行能源消费量调整,能够获得对碳市场配额总量影响较小的减缓欧盟CBAM负面影响的方案。

(5)本文构建的允许要素价格改变的VPRA模型,克服了以往模型中不允许要素价格改变的缺点,利用VPRA模型进行配额分配时,能够充分考虑欧盟碳关税和中国碳价格的“双重碳成本”影响。

### 5.2 政策建议

本文为中国应对欧盟CBAM影响策略的制定提供了以下政策启示:

(1)在中国全国碳市场顶层制度设计中应纳入CBAM,建议在省级层面优化碳配额的同时进行能源消费调整,协同推进节能和减排政策,以此获得对碳市场配额总量影响较小的减缓欧盟CBAM负面影响的方案。

(2)鉴于较高以及稳定的中国碳价格水平能够增强中国钢铁行业抵御欧盟CBAM负面影响的能力,应尽快完善中国全国碳市场定价机制,逐步缩小中欧碳价格差距,充分发挥碳价格对碳配额的优化配置作用。

(3)各省份应加强以最小成本利用投入要素进行钢铁生产的能力,例如通过开展先进能源技术和低碳技术的研发与应用,提高能源效率等手段,降低生产过程中的碳排放强度和能源强度,从而降低

单位产出的综合成本,这有助于在面对欧盟 CBAM 的负面影响时保持钢铁行业成本效率的稳定性。

(4)中国钢铁企业应将低碳生产融入企业战略目标,提高清洁能源消费比重以降低化石燃料燃烧产生的碳排放,通过绿色低碳技术进步和创新降低减排成本。

鉴于本文结论仅建立在中国钢铁行业数据基础之上,未来应进一步探究欧盟 CBAM 对中国不同行业是否会造成不同影响,以便获得具有针对性的方案。此外,如何寻找合适的中国碳价格区间,既能保护中国企业竞争力又可以提升抵御欧盟 CBAM 负面影响的能力,也是未来值得进一步深入研究的问题。

### 参考文献(References):

- [1] 李季,王宇. 边境碳调节对中国 EITE 产业竞争力和碳泄漏的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 87-93. [Li J, Wang Y. Effects of border carbon adjustment to competitiveness of China's EITE industries and carbon leakage[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 87-93.]
- [2] 吴杨伟,王胜,李晓丹. 国际贸易中的关税吸收问题研究进展: 兼述一个理论框架[J]. 国际贸易问题, 2018, (5): 160-174. [Wu Y W, Wang S, Li X D. Research progress on tariff absorption in international trade: And a theoretical framework[J]. Journal of International Trade, 2018, (5): 160-174.]
- [3] 赵永斌,丛建辉,杨军,等. 中国碳市场配额分配方法探索[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 872-883. [Zhao Y B, Cong J H, Yang J, et al. An innovative allowance allocation method in China's unified national emissions trading scheme[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 872-883.]
- [4] 韩梦瑶,刘卫东,谢漪甜,等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710-721. [Han M Y, Liu W D, Xie Y T, et al. Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 710-721.]
- [5] 姜宛贝,刘卫东. 中国经济空间格局演变及其 CO<sub>2</sub> 排放效应[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 722-732. [Jiang W B, Liu W D. Effect of change of the spatial pattern of economic activities on CO<sub>2</sub> emissions in China[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 722-732.]
- [6] 屈秋实,王礼茂,王博,等. 中国有色金属产业链碳排放及碳减排潜力省际差异[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 756-763. [Qu Q S, Wang L M, Wang B, et al. Carbon emissions of China's nonferrous metal industry from the view of industrial chain and provincial differences[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 756-763.]
- [7] 邵帅,张可,豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60. [Shao S, Zhang K, Dou J M. Effects of economic agglomeration on energy saving and emission reduction: Theory and empirical evidence from China[J]. Management World, 2019, 35(1): 36-60.]
- [8] Böhringer C, Schneider J, Asane-Otoo E. Trade in carbon and carbon tariffs[J]. Environmental and Resource Economics, 2021, 78: 669-708.
- [9] Al Khourdajie A, Finus M. Measures to enhance the effectiveness of international climate agreements: The case of border carbon adjustments[J]. European Economic Review, 2020, DOI: 10.1016/j.euroecorev.2020.103405.
- [10] Mörsdorf G. A simple fix for carbon leakage? Assessing the environmental effectiveness of the EU carbon border adjustment[J]. Energy Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112596.
- [11] Larch M, Wanner J. Carbon tariffs: An analysis of the trade, welfare, and emission effects[J]. Journal of International Economics, 2017, 109: 195-213.
- [12] Zhong J R, Pei J S. Beggar thy neighbor? On the competitiveness and welfare impacts of the EU's proposed carbon border adjustment mechanism[J]. Energy Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112802.
- [13] Pató Z, Mezösi A, Szabó L. Is border carbon adjustment the right tool for the power sector?[J]. Climate Policy, 2022, DOI: 10.1080/14693062.2022.2043819.
- [14] Cheng H T. Border carbon adjustments with endogenous assembly locations[J]. Economic Modelling, 2021, DOI: 10.1016/j.econmod.2021.105666.
- [15] Zhang Y J, Hao J F. Carbon emission quota allocation among China's industrial sectors based on the equity and efficiency principles[J]. Annals of Operations Research, 2017, 255(1): 117-140.
- [16] Fang K, Zhang Q F, Long Y, et al. How can China achieve its Intended nationally determined contributions by 2030? A multi-criteria allocation of China's carbon emission allowance[J]. Applied Energy, 2019, 241: 380-389.
- [17] Cai W G, Ye P Y. A more scientific allocation scheme of carbon dioxide emissions allowances: The case from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.043.
- [18] Ma C Q, Ren Y S, Zhang Y J, et al. The allocation of carbon emission quotas to five major power generation corporations in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.006.
- [19] Chen B, Zhang H Y, Li W, et al. Research on provincial carbon quota allocation under the background of carbon neutralization[J]. Energy Reports, 2022, 8: 903-915.
- [20] Ojo O M, Adenuga A H, Lauwers L, et al. Unraveling the impact of variable external input use on the cost efficiency of dairy farms in Europe[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2020, DOI: 10.1016/j.indic.2020.100076.
- [21] Böhringer C, Balistreri E J, Rutherford T F. The role of border carbon adjustment in unilateral climate policy: Overview of an energy modeling forum study (EMF 29)[J]. Energy Economics, 2012, 34:



2022年2月

- S97-S110.
- [22] Banerjee S. Conjugation of border and domestic carbon adjustment and implications under production and consumption-based accounting of India's national emission inventory: A recursive dynamic CGE analysis[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2021, 57: 68-86.
  - [23] Evans S, Mehling M A, Ritz R A, et al. Border carbon adjustments and industrial competitiveness in a European Green Deal[J]. *Climate Policy*, 2021, 21(3): 307-317.
  - [24] Acar S, Asici A A, Yeldan A E. Potential Effects of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy[R]. Working Papers 1500, 2021.
  - [25] Burke J, Sato M, Taylor C, et al. What does an EU Carbon Border Adjustment Mechanism mean for the UK?[R]. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, Centre for Climate Change Economics and Policy, 2021.
  - [26] Lin B Q, Li A J. Impacts of carbon motivated border tax adjustments on competitiveness across regions in China[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 5111-5118.
  - [27] Li A J, Zhang A Z. Will carbon motivated border tax adjustments function as a threat?[J]. *Energy Policy*, 2012, 47: 81-90.
  - [28] 王谋, 吉治璇, 康文梅, 等. 欧盟“碳边境调节机制”要点、影响及应对[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(12): 45-52. [Wang M, Ji Z X, Kang W M, et al. Key points and impact of EU's carbon border adjustment mechanism and China's responses[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(12): 45-52.]
  - [29] 刘斌, 赵飞. 欧盟碳边境调节机制对中国出口的影响与对策建议[J]. *清华大学学报(哲学社会科学版)*, 2021, 36(6): 185-194, 210. [Liu B, Zhao F. The impact of EU carbon tariff policy on China's export and suggestions for China[J]. *Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences)*, 2021, 36(6): 185-194, 210.]
  - [30] Zhou H J, Ping W Y, Wang Y, et al. China's initial allocation of interprovincial carbon emission rights considering historical carbon transfers: Program design and efficiency evaluation[J]. *Ecological Indicators*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106918.
  - [31] He W J, Zhang B. A comparative analysis of Chinese provincial carbon dioxide emissions allowances allocation schemes in 2030: An egalitarian perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142705.
  - [32] Cucchiella F, D'Adamo I, Gastaldi M, et al. Efficiency and allocation of emission allowances and energy consumption over more sustainable European economies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 805-817.
  - [33] Wu J J, Guo Q H, Yuan J H, et al. An integrated approach for allocating carbon emission quotas in China's emissions trading system [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 143: 291-298.
  - [34] Qin Q D, Liu Y, Huang J P. A cooperative game analysis for the allocation of carbon emissions reduction responsibility in China's power industry[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104960.
  - [35] Guo J, Du L M, Wei C. Equity-efficiency trade-off in China's energy capping policy[J]. *Energy Policy*, 2019, 126: 57-65.
  - [36] Chen F, Zhao T, Xia H M. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on Super-SBM model and ZSG-DEA model[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, 23: 2285-2301.
  - [37] Cui X Y, Zhao T, Wang J. Allocation of carbon emission quotas in China's provincial power sector based on entropy method and ZSG-DEA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124683.
  - [38] 王勇, 王丁玉, 陈彦汝. 不同配额分配方式对中国碳交易市场运行的影响: 基于流动性、波动性与有效性视角的考察[J]. *资源科学*, 2021, 43(12): 2503-2513. [Wang Y, Wang D Y, Chen Y R. Impact of different quota allocation methods on the operation of China's carbon trading market: From the perspective of liquidity, volatility and effectiveness[J]. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2503-2513.]
  - [39] Du J, Pan M, Chen Y, et al. An efficiency-based allocation of carbon emissions allowance: A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119346.
  - [40] 朱卫未, 缪子阳, 金贵生. 基于 Context-dependent DEA 方法的碳排放减排分配策略[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2170-2183. [Zhu W W, Miao Z Y, Gan G S. Carbon emission reduction allocation strategy based on the context-dependent DEA method[J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2170-2183.]
  - [41] Lei W, Zhang E N. Regional allocation of carbon emissions in China based on zero sum gains data envelopment analysis model[J]. *Environmental Engineering Research*, 2016, 21(1): 91-98.
  - [42] Pang R Z, Deng Z Q, Chiu Y H. Pareto improvement through a reallocation of carbon emission quotas[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 419-430.
  - [43] Nolan J F, Ritchie P C, Rowcroft J E. Identifying and measuring public policy goals: ISTE and the US bus transit industry[J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2002, 48(3): 291-304.
  - [44] Oum T H, Pathomsiri S, Yoshida Y. Limitations of DEA-based approach and alternative methods in the measurement and comparison of social efficiency across firms in different transport modes: An empirical study in Japan[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2013, 57: 16-26.
  - [45] Lins M P E, Gomes E G, Mello J C C S, et al. Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 148(2): 312-322.
  - [46] Dehnokhalaji A, Ghiyasi M, Korhonen P. Resource allocation based on cost efficiency[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2017, 68: 1279-1289.
  - [47] Heinrichs H U, Markewitz P. Long-term impacts of a coal phase-out in Germany as part of a greenhouse gas mitigation strategy[J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 234-246.

- [48] Hobbie H, Schmidt M, Möst D. Windfall profits in the power sector during phase III of the EU ETS: Interplay and effects of renewables and carbon prices[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118066.
- [49] Carlén B, Dahlqvist A, Mandell S, et al. EU ETS emissions under the cancellation mechanism: Effects of national measures[J]. *Energy Policy*, 2019, 129: 816–825.
- [50] Sakai M, Barrett J. Border carbon adjustments: Addressing emissions embodied in trade[J]. *Energy Policy*, 2016, 92: 102–110.
- [51] Atkinson G, Hamilton K, Ruta G. Trade in virtual carbon: Empirical results and implications for policy[J]. *Global Environmental Change*, 2011, 21(2): 563–574.
- [52] Chang C L, Mai T K, Mcleer M J. Establishing national carbon emission prices for China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 106: 1–16.
- [53] 魏立佳, 彭妍, 刘潇. 碳市场的稳定机制: 一项实验经济学研究[J]. *中国工业经济*, 2018, (4): 174–192. [Wei L J, Peng Y, Liu X. The stability mechanism of the carbon market: A study of experimental economics[J]. *China Industrial Economics*, 2018, (4): 174–192.]
- [54] 齐绍洲, 杨光星, 王班班. 中国碳价格对覆盖行业贸易竞争力的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(4): 107–115. [Qi S Z, Yang G X, Wang B B. Analysis on the impact of China's carbon prices on the trade competitiveness of covered industries[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(4): 107–115.]

## Carbon allowance allocation strategy in China's steel industry under the EU carbon border adjustment mechanism

QI Shaozhou<sup>1,2,3</sup>, XU Zhenzhen<sup>1,2</sup>, YANG Zhixuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Climate Change and Energy Economics Study Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Center of Hubei Cooperative Innovation for Emissions Trading System, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The upcoming EU carbon border adjustment mechanism (CBAM) may affect the cost efficiency of the Chinese steel industry. However, few studies have looked into the ways to cope with the negative impact of the CBAM taking into consideration the main features of the carbon market. This study constructed two variable price resource allocation models and examined the allowance allocation strategies to mitigate the negative influences of the EU CBAM in the short and long term from the perspective of the carbon market. Both models were applied to the steel industry's allowance allocation in provinces of China's mainland. The results show that: (1) When China's carbon price is constant in the short run and rises in the long run, the EU CBAM will reduce the cost efficiency of the steel industry. (2) The higher the quantity of steel products exported from China to the EU, the greater the decrease in cost efficiency of the Chinese steel industry, and the higher the level of carbon price in China the more stable the cost efficiency of the steel industry. (3) Optimizing allowance allocation through the carbon market can effectively alleviate the negative impact of the EU CBAM. (4) By adjusting the energy consumption while optimizing the carbon allowance allocation, it is possible to develop a scheme with less influence on the total allowance. The conclusions of this study provide some policy implications for China to improve its carbon market policy while effectively responding to the challenges of the EU CBAM.

**Key words:** carbon border adjustment mechanism; carbon market; cost efficiency; carbon allowance allocation; energy consumption; carbon price; non-parametric frontier method