

信息不对称视角下我国工业企业碳排放权 分配与定价机制研究

钱浩祺 吴力波*

摘要:设计完善的碳交易体系能够为我国实现碳达峰与碳中和目标作出重要贡献,其中,合理的碳排放权分配和定价机制能够通过形成有效的价格信号来促进企业的节能减排行为。本文提出了一个信息不对称情况下的碳排放权定价与分配的混合机制,该机制通过结合单一价格机制和单一数量机制的优点,能够实现有效的信息激励,促使企业将其自身真实的排放信息上报给决策者,用以制定最优政策目标。基于我国投入产出数据以及工业企业微观数据,并利用可计算一般均衡模型的仿真模拟对理论假设进行了验证。结果表明,本文提出的混合机制的减排效果优于单一碳税机制和单一碳排放权交易机制,最接近于完全信息情景,因而能够在实现碳排放总量控制的情况下形成有效的碳价信号。

关键词:信息不对称;碳排放权分配;可计算一般均衡模型;边际减排成本曲线;无监督学习

一、引言

碳定价政策是目前全球各国用来应对气候变化的政策工具之一,其主要目的是以市场化的手段对二氧化碳进行定价,以控制二氧化碳排放总量,进而引导企业进行低碳技术投资,这

*钱浩祺(通讯作者),复旦大学全球公共政策研究院、复旦大学-LSE全球公共政策研究中心、上海能源与碳中和战略研究院,邮政编码:200433,电子信箱:qianhaoqi@fudan.edu.cn;吴力波,复旦大学经济学院、复旦大学大数据研究院、上海能源与碳中和战略研究院,邮政编码:200433,电子信箱:wulibo@fudan.edu.cn。

本文系国家科技部国家重点研发计划“应对全球变化的可持续性转型模式研究”(2020YFA0608600)、国家杰出青年科学基金项目“能源环境经济与政策分析”(71925010)、国家自然科学基金青年科学基金项目“碳排放峰值约束下的中国绿色电力转型研究——基于电力大数据与中国多区域CGE模型”(71703027)、上海市人才发展资金资助(2021098)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议,文责自负。

对于我国实现“力争于2030年前达到峰值”和“努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标具有重要意义(何建坤,2021)。碳税(价格政策之一)和碳排放权交易(数量政策之一)是两种最常见的碳定价工具,在全球范围内被广泛采用,到2021年为止,全球共有64个国家或地区已经实行这两种碳定价政策来应对气候变化,覆盖全球约21.5%的温室气体排放量(World Bank,2021)。

边际减排成本(Marginal Abatement Cost, MAC)是影响碳定价政策有效性的核心因素,是决策者制定具体的碳定价政策的关键变量。在理想情况下,碳税政策与碳排放权交易政策的效果是等价的,即碳税税率、碳排放权交易价格与MAC这三者在均衡状态下是相同的。这种政策等价性主要依赖于两个要素:历史排放量和生产技术水平,当这两个要素的信息能够被准确度量与获取时,边际减排成本曲线(Marginal Abatement Cost Curve, MACC)就能够得以确认。目前,全球现有的碳定价政策均配套了碳监测、报告和核查(Monitoring, Reporting and Verification, MRV)体系,以最大程度保证历史排放量数据的准确性^①,但是MRV体系有效性依赖于一定的现实条件(孙永平、刘瑶,2017),因而MACC依然存在着不确定性,从而使得决策者在设定总量控制目标或碳税水平时出现偏差(段茂盛、庞韬,2014)。在信息不对称的情况下,即使决策者能够准确获取企业的历史排放量水平,由于生产技术水平在很大程度上属于企业私有信息,因此企业依然可以通过隐瞒其生产技术信息来影响决策者对其MACC的判断,从而影响碳定价政策的制定,为其自身谋求利益(Kwerel, 1977; Miyamoto, 2014; Wang et al., 2019)。在这种情况下,传统碳定价政策将无法有效控制碳排放总量,也无法通过合理的碳价格引导企业进行低碳投资,因而需要设计新的碳定价政策,来克服信息不对称现象所带来的弊端。

本文将从决策者与企业的最优决策出发,建立理论模型来设计一个能够让企业讲真话的碳排放权定价与分配机制,通过数值模拟分析该机制所能带来的环境效率提升,为我国未来建设全国碳排放权交易市场提供理论支撑。本文第二部分为文献综述,对信息不对称下的碳定价机制设计进行梳理与总结;第三部分构建了包含决策者与企业的两回合博弈模型,提出了一个具有信息激励效果的碳排放权分配机制;第四部分利用中国现实数据对该分配机制进行了数值模拟;第五部分为结论与政策分析。

^① 根据国家发展改革委办公厅发布的发改办气候[2016]57号文件,我国针对计划建立的全国性碳排放权交易市场,已经开始在全国范围内展开企业历史碳排放的核算、报告与核查工作,根据文件内容,拟纳入碳排放权交易范围的企业将根据《企业温室气体排放核算方法与报告指南》上报2013年至2015年的温室气体排放量及相关数据,并且报告部分其他相关基础数据,来满足排放权配额分配的需要,此外还将由第三方核查机构对企业的排放数据进行核查。

二、文献综述

当存在信息不对称时,企业会利用其对自身减排成本的私有信息优势,来做出策略行为,从而降低传统碳定价政策的效果。Kwerel(1977)指出,在单一碳税政策下,企业会通过低估其减排成本来促使决策者制定一个较低的碳税税率,以此降低其总成本,而在单一碳排放权交易政策下,企业则会通过夸大其减排成本来促使决策者发放更多的排放权许可,以此降低其总成本。Weitzman(1978)指出单一价格信号或总量控制信号在经济计划中是不一致的信号,因此采用任意一种单一政策都不是最优的政策安排。虽然在一些特定的假设下,单一政策仍有可能达到最优均衡解(Dasgupta et al., 1980; Spulber, 1985; McKittrick, 1999; Costello & Karp, 2004),但是这些强假设很难具有现实可操作性。此外,通过动态修正单一政策这种试错的方式,例如在单一价格拍卖之后实行事后供应调整(Khezz & MacKenzie, 2021a)等措施,在一定程度上也能够克服信息不对称问题,但这种方法不仅具有较高的政策成本,且容易造成政策在企业中的可信度不断下降(Weitzman, 1978)。

针对单一碳定价政策在面对信息不对称时的不足,混合碳定价政策开始受到关注,这类政策通过更加巧妙的机制设计而不是增加强假设条件,来解决信息不对称问题。混合政策最早由Roberts和Spence(1976)正式提出,其本质是结合价格政策和数量政策,来对碳排放同时进行价格约束和总量控制。Roberts和Spence(1976)指出,通过设立一个排放权交易市场,同时对超额排放进行惩罚或对超额减排进行补贴,这一机制可以近似模拟不确定的边际损失函数,从而使决策者能够将期望总成本最小化。Kwerel(1977)提出只要在设立排放权交易市场的基础上,设定一个最优补贴率对企业的超额减排进行补贴,就能够让企业真实上报其私有的减排信息。但是该机制仅仅是一个纳什均衡,因而企业讲真话的策略并非是一个占优策略,当出现企业合谋等情况时,这一机制将无法达到最优。在Kwerel(1977)之后,陆续有研究提出了不同的基于企业之间完全信息的排放权分配机制设计(Varian, 1994; Duggan & Roberts, 2002),也有研究提出了基于Vickrey-Clarke-Groves(VCG)机制的定价机制(Dasgupta et al., 1980; Montero, 2008; Shrestha, 2017),但这些机制与现实政策应用之间存在着较大的差距(Khezz & MacKenzie, 2021b),且基于简化拍卖规则的分配机制将会陷入低价均衡的结果(Wilson, 1979)。

一个设计良好的混合政策机制,能够促使企业的最优策略在碳排放权交易市场中对排放权价格形成一个合理波动的“价格区间”,以此来保证价格信号的激励作用。然而,如果是采用补贴和税收的方式来形成价格区间将存在巨大的政策成本,基于这一考量,Pizer(2002)提出决策者通过预留排放权数量并进行事后动态发放的方式来增加排放权的市场供给,从而为碳排放权价格设置上限,Fell和Morgenstern(2010)、Fell等(2012)以及Holt和Shobe(2016)等学者也从不同研究视角对设定“价格区间”这一政策进行了拓展分析,使得混合政策在现实中

的可操作性得到了提升。此外, Burtraw等(2010)提出决策者在发放保留排放权时(通常以出售或拍卖方式进行), 可以设定一个最低出售价格或拍卖保留价格, 从而为碳排放权价格设置下限, Khezzr和MacKenzie(2021b)则设计了一个允许决策者在收集全部出价信息后决定排放权供应量的机制, 来促使企业提交真实出价。目前这一类可变数量排放权供给的拍卖机制正得到越来越多的关注, 事实上, 类似机制也已被用于欧盟排放交易体系(European Union Emissions Trading System, EU ETS)、加州总量控制和交易体系(California's Cap-and-Trade Program)以及美国区域温室气体减排行动(The Regional Greenhouse Gas Initiative, RGGI)等碳交易市场(Khezzr & MacKenzie, 2018; Perino, 2018; 齐绍洲、王薇, 2020; Friesen et al., 2022), MacKenzie(2022)对这些实践中的拍卖机制从理论和实证两个方面研究和总结了其发展和成功的经验, 发现拍卖机制的任何一点细微的变化也将带来结果的巨大差异。

碳市场价格信号的形成, 与碳排放权初始分配方式之间存在着高度关联, 目前针对碳排放权分配的研究主要集中在两个方面, 一方面是讨论碳减排责任在国际层面的分配(国务院发展研究中心课题组, 2011; 彭水军等, 2016), 另一方面是讨论碳排放权在国内区域层面的分配(汤维祺等, 2016a; 钱浩祺等, 2019), 这些宏观层面的研究往往不考虑信息不对称因素, 着重于讨论不同的减排责任分担机制和初始排放权分配所造成的经济社会效率和公平性影响。考虑到我国于2021年正式启动全国碳交易市场, 并且未来基于拍卖的排放权分配方式将逐步取代免费分配方式(张希良等, 2021), 因此需要深入研究排放权分配机制对我国碳市场效率的影响。现有研究一方面从排放权拍卖机制的资源配置效率影响作为切入点开展研究, 例如汤维祺等(2016b)研究了拍卖分配排放权等不同方式对产业转移的影响, 王明喜等(2019)以及王梅和周鹏(2020)均研究了有偿拍卖和免费分配两种分配方式对碳市场的效率影响。另一方面, 现有研究则主要从克服碳市场信息不对称的角度切入来研究排放权分配机制。例如, 王明喜等(2015)通过对五种不同碳排放权分配机制下的企业减排投资行为差异进行考察, 建议通过第三方检测或者立法的形式来防止企业瞒报碳排放信息。杨晶玉和李冬冬(2018)等针对排污权二级交易市场存在减排成本信息不对称的情况, 研究了不同排污权拍卖形式的效率差异。李冬冬等(2020)从设计合理的价格政策工具角度切入, 研究如何通过确定最优的谎报惩罚成本来促使企业“讲真话”。从现有的研究可以看到, 探讨排放权拍卖机制如何克服我国碳市场建设中的信息不对称现象以及对排放权分配效果和价格形成机制会产生怎样的影响, 还处于起步阶段。

本文所提出的碳排放权定价与分配机制, 是一个基于价格政策和数量政策相结合的混合分配机制, 该机制能够促使企业上报其真实的减排信息, 因而具有能够同时进行总量控制和形成合理碳价信号的特征。区别于现有研究所提出的机制, 本文所提出的碳排放权分配机制中, 企业的最优决策是相对独立的, 因而“讲真话”是其占优策略, 且该机制不需要进行后续动态

调整(包括支付补贴、征收惩罚或发放配额等),其政策成本较小,具有较强的现实可操作性。

三、理论模型

(一)理论框架

本文的理论模型基于 Kwerel(1977)的框架展开。假定企业 i 的排放成本函数为 $C_i(\eta_i, X_i)$, 其中 X_i 为企业的总排放量, 当企业不受政策约束时, 企业 i 的排放量为 \bar{X}_i , 则 $C_i(\eta_i, \bar{X}_i) = 0$, $\partial C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i < 0$ 且 $\partial^2 C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i^2 > 0$, 企业的边际减排成本定义为 $MAC_i(\eta_i, X_i) = -\partial C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i$, η_i 为企业异质性成本参数, 其约束范围为 $\eta_i \in [\underline{\eta}_i, \bar{\eta}_i]$, $\partial C_i(\eta_i, X_i) / \partial \eta_i > 0$ 且 $\partial^2 C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i \partial \eta_i < 0$, 边际减排成本及其随参数的变化由图 1 所示。

定义社会总排放成本函数为 $C(X) = \min \sum_i C_i(\eta_i, X_i)$, 受约束于 $\sum_i X_i = X$, 则根据一阶条件可得 $\partial C(X) / \partial X = \partial C_i(\eta_i, X_i^*) / \partial X_i = \partial C_j(\eta_j, X_j^*) / \partial X_j$, 其中 $i \neq j$, 即全社会边际减排成本和企业边际减排成本相同。

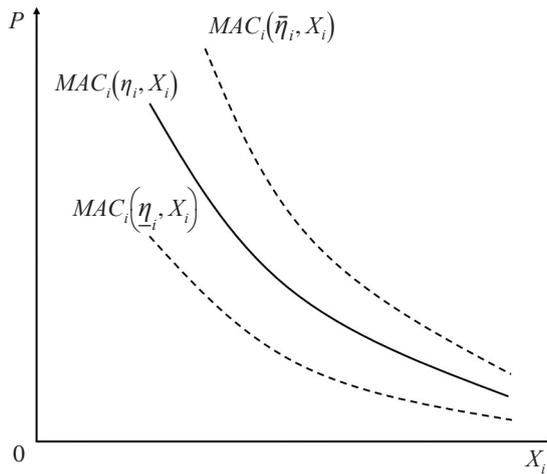


图 1 企业异质性边际减排成本曲线

对于决策者而言, 社会总排放损失函数为 $D(X)$, $\partial D / \partial X > 0$ 且 $\partial^2 D / \partial X^2 > 0$ 。决策者的目标为最小化社会总成本 $D(X) + C(X)$, 则其一阶条件为:

$$D'(X^*) + C'(X^*) = 0 \tag{1}$$

其中 X^* 为社会最优碳排放总量, 上标一撇表示导数。令 P^* 为社会最优碳排放价格, 则有社会最优均衡条件:

$$P^* = -C'(X^*) = D'(X^*) \tag{2}$$

定义决策者的碳定价政策机制为 $\mathbf{M}:\{C(X), D(X)\} \rightarrow A$, 即决策者根据社会总排放成本函数和社会总排放损失函数来确定政策目标集合 A 。 $A = \{P\}$ 表示单一价格政策, P 为碳税税率, $A = \{Q\}$ 表示单一数量政策, Q 为排放控制总量。但是由于决策者与企业之间存在信息不对称, 企业拥有对其自身排放成本的私有信息, 而决策者没有企业的排放成本信息, 因此政策实施涉及两轮交流共四个步骤:

步骤一: 决策者宣布政策机制 \mathbf{M} ;

步骤二: 企业向决策者上报各自的排放成本函数 $\hat{C}_i(\hat{\eta}_i, X_i)$;

步骤三: 决策者根据所有的 $\hat{C}_i(\hat{\eta}_i, X_i)$ 确定社会总排放成本函数 $\hat{C}(X)$ 以及政策工具 $\{P, X\}$;

步骤四: 企业根据政策工具决定各自的最优行动 X_i^* 。

其中 $\hat{C}_i(\hat{\eta}_i, X_i)$ 为企业自主上报的排放成本函数, 步骤三的社会总排放成本函数定义不变, 即 $\hat{C}(X) = \sum_i \hat{C}_i(\hat{\eta}_i, X_i)$ 。实际应用中, $\hat{C}_i(\hat{\eta}_i, X_i)$ 与企业自身真实排放成本函数 $C_i(\eta_i, X_i)$ 存在偏差的可能性, 即企业在上报排放成本函数时具有说谎的动机。Kwerel(1977)的研究表明, 在这个框架下, 不论单一碳排放权交易政策制度 (\mathbf{M}_Q) 还是单一碳税制度 (\mathbf{M}_P), 企业都能够通过谎报其排放成本函数来实现总成本的下降, 信息不对称将导致这两种政策制度的失效, 无法达到社会最优。

(二) 固定价格分配机制

固定价格分配机制结合了价格政策和数量政策两者特征, 是一种混合政策机制 \mathbf{M}_M :

$$\mathbf{M}_M:\{C(X), D(X)\} \rightarrow \{e, X\} \quad (3)$$

在公式所定义的混合政策机制 \mathbf{M}_M 中, 决策者同时公布两个政策目标: 碳排放权分配价格 e 以及碳排放权总量控制目标 X , 对企业而言, 将以固定的初始价格从决策者购买其申报的碳排放权, 实际碳排放量和碳排放权之间的富余或缺口将通过碳排放权交易市场出清, 形成一个碳排放权的市场交易均衡价格 p 。

当企业观察到自身的排放成本函数 $C_i(\eta_i, X_i)$ 后, 决定上报函数 $C_i^l(\eta_i^l, X_i)$ 。决策者根据所有企业上报的成本函数得到社会总排放成本函数 $C^l(X)$, 上标 l 表示偏离最优分配的结果。图 2 表示企业在夸大排放成本和隐瞒排放成本两种情形下的价格形成机制。当企业谎报信息时, 决策者所确定的政策目标将会偏离 $\{\bar{X}, \bar{e}\}$, 我们记为 $\{\bar{X}^l, \bar{e}^l\}$, 其中 $\bar{e} = MAC(\bar{X})$ 且 $\bar{e}^l = MAC^l(\bar{X}^l)$ 。此时, 企业的成本最小化目标为:

$$\min_{\{X\}} C_i(\eta_i, X_i) + \bar{e}^l L_i^l - p(L_i^l - X_i) \quad (4)$$

其中, $\bar{e}'L_i'$ 为购买碳排放权配额的成本, $p(L_i' - X_i)$ 为在碳排放权交易市场上出售多余排放权(或购买排放权)的收益(或成本)。碳排放权的均衡交易价格由真实排放成本曲线所决定, 因此 $p = -MAC(\bar{X})$ 。当企业夸大其排放成本时, 即 $C'(X) > C(X)$, 我们得到 $\bar{e}' > \bar{e}$ 且 $\bar{X}' > \bar{X}$, 均衡价格 p 满足 $\bar{e}' > \bar{e} > p$; 反之, 若企业隐瞒其排放成本, 即 $C'(X) < C(X)$, 同理可得 $\bar{e}' < \bar{e}$ 且 $\bar{X}' < \bar{X}$, 均衡价格 p 满足 $p > \bar{e} > \bar{e}'$ 。

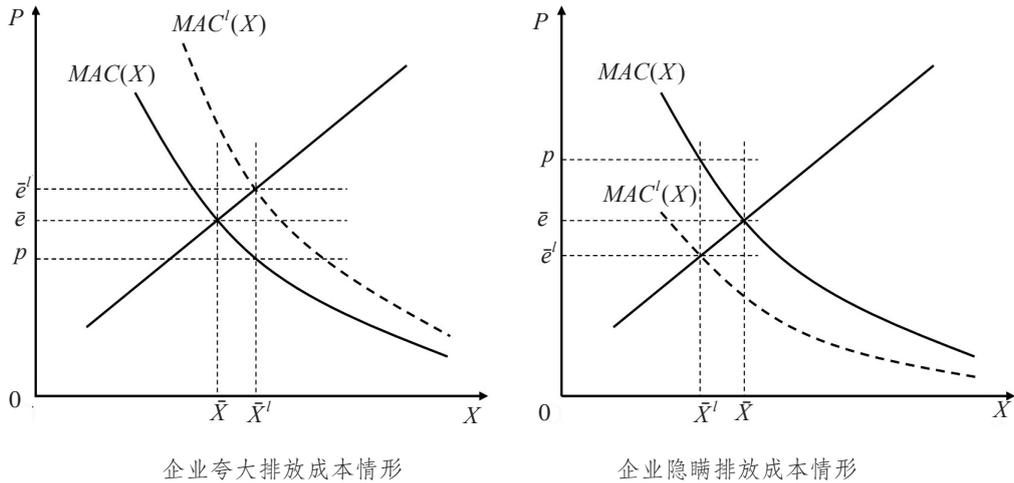


图 2 固定价格分配机制制度下的价格形成机制

对于企业而言, 其最终获得的碳排放权数量 L_i 由拍卖价格与其上报排放成本函数所决定, 因此在夸大排放成本情况下, 将获得更多碳排放权, 即 $L_i' > L_i$, 而在隐瞒排放成本情况下, 将获得更少碳排放权, 即 $L_i' < L_i$ 。由公式(4)可知企业总成本与排放量变化之间的关系为:

$$dC_i(\eta_i, X_i) = \left(\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} + p \right) dX_i \quad (5)$$

当企业夸大其成本函数时, 有 $p < -\partial C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i$, 因此由公式可知 $dC_i(\eta_i, X_i) / dX_i < 0$, 即增加排放量能够降低总成本, 因此企业的最优排放量 $X_i^* = L_i'$; 而当企业隐瞒其成本函数时, 有 $p > -\partial C_i(\eta_i, X_i) / \partial X_i$, 同理可知 $dC_i(\eta_i, X_i) / dX_i > 0$, 即降低排放量能够降低总成本, 因此企业的最优排放量 $X_i^* = L_i'$ 。结合公式, 可知此时企业在均衡状态下的总成本函数为:

$$C_i(\eta_i', L_i') = C_i(\eta_i, L_i') + \bar{e}' L_i' \quad (6)$$

因此, 企业在决定是否谎报其排放成本函数时, 将通过对比排放成本变化与购买碳排放权成本变化进行权衡, 接着分情况进一步讨论两种情况下的企业具体决策。

(三) 企业夸大排放成本函数情形

当企业夸大其排放成本时, 由上述分析可知企业最优化行为将会把多余的所有排放权用

来进行排放,而不通过碳排放权交易市场进行出售获利,此时企业的排放成本变化为:

$$\Delta C_i(\eta_i, X_i) = \int_{\bar{X}_i}^{L'_i} -\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} dX_i \quad (7)$$

其中 \bar{X}_i 为信息对称情况下的企业排放量水平。而企业拍卖碳排放权的成本变化为:

$$\Delta(\bar{e}X_i) = \bar{e}'L'_i - \bar{e}\bar{X}_i = \bar{e}'(L'_i - \bar{X}_i) + (\bar{e}' - \bar{e})\bar{X}_i \quad (8)$$

由于 $\bar{e}' > -\partial C_i(\eta_i, X_i)/\partial X_i$, 因此得到:

$$\int_{\bar{X}_i}^{L'_i} -\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} dX_i \leq \int_{\bar{X}_i}^{L'_i} \bar{e}' dX_i = \bar{e}'(L'_i - \bar{X}_i) \quad (9)$$

结合公式(6)、公式(8)和公式(9),可知:

$$C_i(\eta'_i, L'_i) > C_i(\eta_i, \bar{X}_i) \quad (10)$$

公式(10)表明企业若夸大其排放成本函数将使得其总成本上升,因此上报真实成本函数才是其最佳策略,且无论其他企业是否讲真话,该企业的最优策略依然是讲真话。图3展示了该策略的几何意义,企业排放成本减小额为面积 S_{ABEG} , 而购买碳排放权成本增加额为面积 S_{ABEDFC} , 由于 $S_{ABEDFC} > S_{ABEG}$, 因此企业总成本上升。

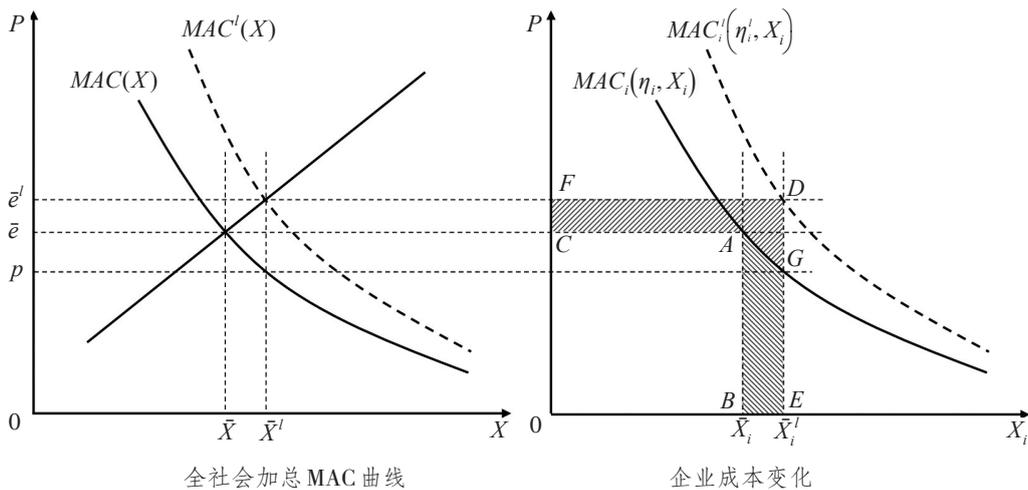


图3 企业夸大排放成本情况下总成本变化

(四)企业隐瞒排放成本函数

当企业隐瞒其排放成本时,企业的最优化行为将促使企业进行更多的减排,使其将排放量限制在购买的碳排放权控制数量以内,而不通过碳排放权交易市场购买碳排放权来达到其原本的排放量水平,此时企业的排放成本变化为:

$$\Delta C_i(\eta_i, X_i) = \int_{L'_i}^{\bar{X}_i} -\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} dX_i \quad (11)$$

同样地, \bar{X}_i 表示信息对称情况下的企业排放量水平。此时企业拍卖碳排放权的成本变化为:

$$\Delta(\bar{e}X_i) = \bar{e}\bar{X}_i - \bar{e}'L_i^l = \bar{e}(\bar{X}_i - L_i^l) + (\bar{e} - \bar{e}')L_i^l \quad (12)$$

由于 $\bar{e} < -\partial C_i(\eta_i, X_i)/\partial X_i$, 因此得到:

$$\int_{L_i^l}^{\bar{X}_i} -\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} dX_i > \int_{L_i^l}^{\bar{X}_i} \bar{e} dX_i = \bar{e}(\bar{X}_i - L_i^l) \quad (13)$$

因此, 企业总成本函数变化量为:

$$\Delta C_i(\eta_i, X_i) = \int_{L_i^l}^{\bar{X}_i} \left(-\frac{\partial C_i(\eta_i, X_i)}{\partial X_i} - \bar{e} \right) dX_i - (\bar{e} - \bar{e}')L_i^l \quad (14)$$

公式的正负号将由三个因素决定, 即企业边际减排成本函数的斜率大小、全社会边际减排损失函数的斜率大小以及企业最优排放量变化大小决定。这里假定在信息对称下最优行为点 (\bar{e}, \bar{X}_i) 的领域内, 边际减排成本函数的斜率为常数 $-c_i$ 且全社会边际减排损失函数的斜率为常数 b , 则公式将简化为:

$$\Delta C_i(\eta_i, X_i) = (\bar{X}_i - L_i^l)L_i^l \left[\frac{\bar{X}_i - L_i^l}{2L_i^l} c_i - b \right] \quad (15)$$

由于 $\bar{X}_i > L_i^l$, 因此公式的正负号将由 c_i 、 $(\bar{X}_i - L_i^l)/2L_i^l$ 和 b 的大小决定, 当 $c_i(\bar{X}_i - L_i^l)/2L_i^l > b$ 时, 企业隐瞒成本将导致总成本上升, 上报真实排放成本函数将是企业最优决策, 且无论其他企业是否讲真话, 该企业的最优策略依然是讲真话。图 4 展示了该策略的几何意义, 企业排放成本增加额为面积 S_{BEDG} , 企业购买碳排放权成本减少额为面积 S_{ABEDFC} , 两者面积大小差异等于 $S_{HDG} - S_{AHFC}$, 其正负由公式决定。

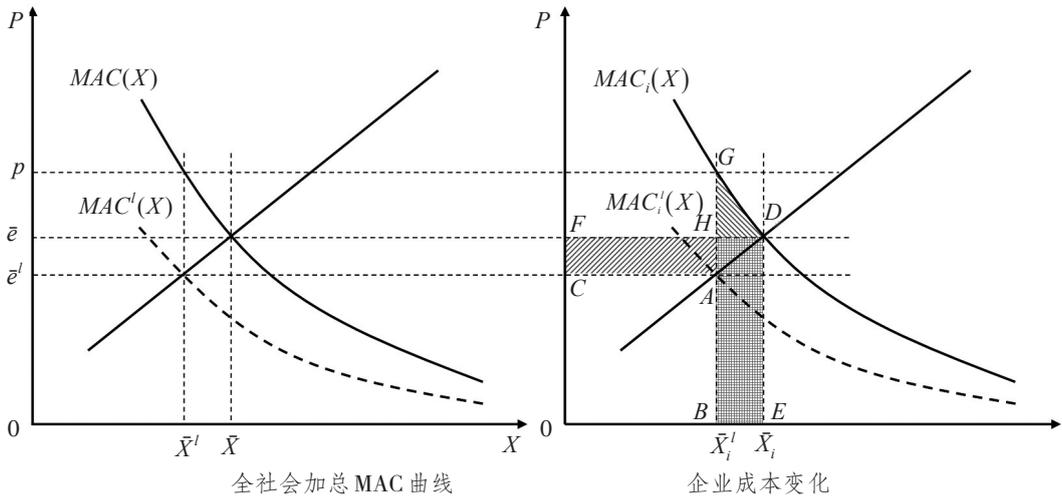


图 4 企业隐瞒排放成本情况下成本变化

值得注意的是,在气候变化问题中,边际减排损失函数的斜率 b 通常远小于边际减排成本函数 c (通常情况下 $b=0$),使得公式(15)大于零。此外,当企业隐瞒其排放成本的程度增加时,也会使得公式(15)结果上升,导致企业总成本上升,因此若企业的边际减排成本函数斜率较低,企业谎报其减排成本的程度也是十分有限的,不会超过一个成本类型下限 η_i 。

四、数值模拟

(一)异质性边际减排成本曲线

本文假设企业采用嵌套常替代弹性(Constant Elasticity of Substitution, CES)生产技术:

$$Y = \gamma \left[\alpha V^{-\rho} + (1-\alpha)E^{-\rho} \right]^{-\frac{1}{\rho}} \quad (16)$$

$$V = \left[\beta K^{-\rho_V} + (1-\beta)L^{-\rho_V} \right]^{-\frac{1}{\rho_V}}$$

其中 Y 表示产出, γ 为希克斯中性技术参数, V 为增加值投入、 K 为资本要素、 L 为劳动要素、 E 为能源投入, α 和 β 分别为要素投入份额, ρ 和 ρ_V 分别为替代参数。根据生产者理论,企业的利润最大化目标为:

$$\begin{aligned} \max_{\{V, E\}} \quad & \pi = P_Y Y - P_L L - P_K K - P_E E \\ \text{s.t.} \quad & E \cdot ef \leq \bar{E} \end{aligned} \quad (17)$$

其中 P_Y 、 P_L 、 P_K 和 P_E 分别为产出、劳动力投入、资本投入和能源投入的价格, ef 为能源的碳排放因子, \bar{E} 为企业面临的碳排放上限约束。定义边际减排成本为 $MAC(\bar{E}) = -\partial\pi^*/\partial\bar{E}$, π^* 为利润极值函数,则根据一阶条件,可得:

$$MAC(\bar{E}) = -\frac{1}{ef} \left(\gamma(1-\alpha) \left[\alpha \left(\frac{V^*}{E^*} \right)^{-\rho} \left(\frac{E}{E^*} \right)^{-1/\rho} + (1-\alpha) \right]^{-1/\rho} - P_E \right) \quad (18)$$

$$\frac{V^*}{E^*} = \left[\beta \left(\frac{K^*}{E^*} \right)^{-\rho_V} + (1-\beta) \left(\frac{L^*}{E^*} \right)^{-\rho_V} \right]^{-1/\rho_V}$$

上式中,上标星号表示企业没有进行减排时的要素投入量。由公式可以看到,企业的边际减排成本主要由七个因素决定:增加值投入份额 α 、资本投入占比份额 β 、资本能源投入比 K^*/E^* 、劳动能源投入比 L^*/E^* 、增加值-能源替代参数 ρ 、资本-劳动替代参数 ρ_V 以及碳排放减排比例 E/E^* 。以上参数均能够通过现实数据获得或者估计得出,于是能够得到不同企业或者行业的边际减排成本函数。

(二)企业减排成本类型聚类分析

由前文的分析,不同企业的减排类型由七个因素决定,其中替代参数 ρ 和 ρ_V 在相同行业

间假设不存在差异,减排比例 E/E^* 则是MAC的自变量,因此企业的减排成本类型可由特征向量 $F_i = (\alpha_i, \beta_i, KR_i, LR_i)$ 来表示。

目前有多种方法可以对样本数据进行分类,本文所涉及的边际减排成本的函数表达式复杂,具有高度的非线性特征,且不存在事先预设的因变量,故无法使用计量回归方法进行分类。因此,本文采用机器学习理论中的K-Means无监督分类算法实现对企业减排成本类型的分类,以各企业的特征向量 $F_i = (\alpha_i, \beta_i, KR_i, LR_i)$ 为聚类特征,将不同企业聚类到不同的减排成本类型。由于类别的数量是未知的,因此需要采用轮廓系数(Silhouette Coefficient)作为类别数量选择的判定准则,确定最优的分类数量,轮廓系数的定义为 $S = (b - a) / \max(a, b)$, a 表示样本中每一个数据与同一个分类中数据距离的平均值,而 b 表示样本中每一个数据与最相邻分类中数据距离的平均值,因此轮廓系数的取值范围为-1到1,其值越接近于1,说明分类的效果越好。在文本研究中,每个行业最少分类数为三类:低排放成本类、中等排放成本类以及高排放成本类,同时针对三至八类分别进行聚类分析并计算相应的轮廓系数,取轮廓系数最高的分类数作为最终聚类结果。

(三)分行业异质性MAC曲线估计

分行业异质性MAC曲线由可计算一般均衡(Computable General Equilibrium, CGE)模型模拟得到,该CGE模型是一个静态CGE模型,由于篇幅所限,模型的核心设定可以参考Qian等(2017、2018)和Wu等(2022)中的相关模型描述信息。由于本文关注的重点在于减排成本类型的异质性,因此重点针对行业拆分进行了处理,其他模型设定包括生产模块、消费者模块、政府模块、宏观闭合条件以及参数设定等,均采用GTAP-E模型的设定(Antimiani et al., 2012)。假定第 i 个行业中共有 N 个企业,这些企业被聚类成 k 个不同的减排类型,则在投入产出表中,第 i 个行业将被拆分成 k 个细分行业,每个行业的中间投入和增加值则按照不同类型企业的中间投入和增加值作为权重进行拆分。这些细分行业具有相同的产出品,但是由于其生产技术的差异,其MAC曲线之间也存在差异。

通过给每一个细分行业设定不同的排放总量约束,可以得到不同总量约束下的细分行业的边际减排成本组合:

$$\{EM_{i,j,1}, PEM_{i,j,1}\}, \dots, \{EM_{i,j,n}, PEM_{i,j,n}\} \quad (19)$$

其中 $EM_{i,j,n}$ 表示第 i 个行业中第 j 个细分类别的第 n 次模拟对应的碳排放总量, $PEM_{i,j,n}$ 则表示第 i 个行业中第 j 个细分类别的第 n 次模拟对应的碳排放权均衡价格,用常见的二项式对式中的序列进行回归拟合^①,建立回归模型:

$$PEM_{i,j} = \alpha_{i,j,0} + \alpha_{i,j,1}EM_{i,j} + \alpha_{i,j,2}EM_{i,j}^2 + \varepsilon_{i,j} \quad (20)$$

^① 使用二项式来表示MAC曲线的处理方法可参见Weitzman(1974)与Newell和Pizer(2008)等的研究。

其中 $\varepsilon_{i,j} \sim N(0, \sigma_{i,j}^2)$, $\alpha_{i,j,0}$ 、 $\alpha_{i,j,1}$ 和 $\alpha_{i,j,2}$ 为回归系数。则第 i 个行业第 j 个细分类别的 MAC 曲线为:

$$MAC_{i,j}(X) = \hat{\alpha}_{i,j,0} + \hat{\alpha}_{i,j,1}X + \hat{\alpha}_{i,j,2}X^2 \quad (21)$$

其中 $\hat{\alpha}_{i,j,0}$ 、 $\hat{\alpha}_{i,j,1}$ 和 $\hat{\alpha}_{i,j,2}$ 为系数估计值, X 为碳排放量。

(四)模拟情景设计

根据理论模型的结论,本文将模拟三种情景下的碳排放差异:完全信息情景、夸大排放成本情景和隐瞒排放成本情景,整个数值模拟过程由图 5 展示。在完全信息情景之下,决策者掌握不同类型排放成本信息,同时根据公式(1)和公式(2)进行最优决策。而在另外两个情景之下,决策者分别采用单一价格政策机制 M_p (碳税政策)和单一数量政策机制 M_Q (碳排放权交易政策)。在三种情景中,社会总排放损失函数均采用线性形式,即 $D(X) = b_0 + b_1X$,因而社会边际排放损失函数 $D'(X) = b_1$ 为常数。其中,参数 b_1 取从 10 元/吨到 100 元/吨来验证结果的稳健性。

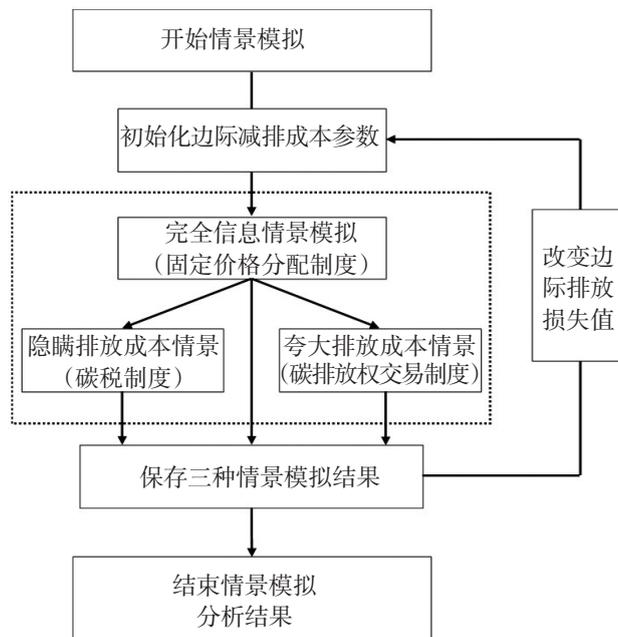


图5 完全信息情景与信息不对称数值模拟流程

(五)数据来源

本文 CGE 模型所使用的数据来自于中国 2012 年投入产出表,微观企业数据来自 2012 年中国工业企业数据库^①,共包含 311314 家工业企业,覆盖了 42 部门中国投入产出表中对应的 25 个制造业部门。企业减排类型聚类所使用的指标由表 1 所示。

① 有关使用该数据库的优势与劣势的具体介绍,可以参考聂辉华等(2012)的研究。

表 1 聚类计算过程涉及中国工业企业数据库指标

原始指标	计算目标
固定资产合计	资本要素投入
本年折旧	资本要素收入
主营业务成本	中间投入成本与能源投入成本
营业税金及附加	增加增值税收入
利润总额	营业盈余
应交所得税	增加增值税收入
应付职工薪酬	劳动要素收入
应交增值税	增加增值税收入
工业总产值	总产出

在对数据进行清洗的过程中,首先剔除指标为0的异常值及样本,其次将计算聚类特征指标(均为相对变量)时的异常值及其样本剔除。清洗后的分行业数据统计由表2所示。最

表 2 数据清洗结果统计

行业代码	行业名称	企业总数 (个)	有效数 (个)	百分比 (%)
02	煤炭采选产品	6385	5247	82.2
03	石油和天然气开采产品	260	221	85.0
04	金属矿采选产品	4732	4036	85.3
05	非金属矿和其他矿采选产品	2903	2444	84.2
06	食品和烟草	31249	26809	85.8
07	纺织品	22055	20024	90.8
08	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	17001	15056	88.6
09	木材加工品和家具	11696	10308	88.1
10	造纸印刷和文教体育用品	13116	11819	90.1
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	1891	1644	86.9
12	化学产品	31873	28209	88.5
13	非金属矿物制品	12732	11399	89.5
14	金属冶炼和压延加工品	32009	27538	86.0
15	金属制品	6125	5389	88.0
16	通用设备	15718	13956	88.8
17	专用设备	24776	22164	89.5
18	交通运输设备	28814	25846	89.7
20	通信设备、计算机和其他电子设备	19558	17698	90.5
21	仪器仪表	11258	10435	92.7
22	其他制造产品	3825	3558	93.0
23	废品废料	5129	4565	89.0
24	金属制品、机械和设备修理服务	1054	912	86.5
25	电力、热力的生产和供应	5080	4315	84.9
26	燃气生产和供应	927	816	88.0
27	水的生产和供应	1148	993	86.5

后,鉴于本文所使用的企业层级微观数据仅来自于中国工业企业数据库,因此仅假定这部分数据所覆盖的25个行业存在信息不对称,其余包括第一产业、建筑业以及第三产业均假定为具有完全信息的行业。对数据可获得的25个行业进行模拟研究已经可以充分反映出政策机制设计在信息激励中的巨大差异。

(六)模拟结果分析

本文聚类分析利用了Python软件的Scikit-Learn机器学习工具包中的K-Means模块和Metrics模块进行,对25个部门的工业企业分别进行聚类,轮廓系数统计结果见表3。由表3可知,共有16个行业对应的最优分类数量为第3类,有8个行业对应的最优分类数量为第4类,只有1个行业的最优分类数量为第5类。

表3 聚类轮廓系数结果

行业代码	行业名称	分类数量					
		3	4	5	6	7	8
02	煤炭采选产品	0.43*	0.37	0.37	0.38	0.35	0.36
03	石油和天然气开采产品	0.41*	0.36	0.38	0.37	0.38	0.37
04	金属矿采选产品	0.48*	0.43	0.43	0.39	0.40	0.41
05	非金属矿和其他矿采选产品	0.51*	0.46	0.41	0.40	0.41	0.41
06	食品和烟草	0.44	0.46*	0.42	0.40	0.40	0.39
07	纺织品	0.42*	0.41	0.38	0.38	0.38	0.36
08	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	0.49*	0.39	0.40	0.38	0.38	0.36
09	木材加工品和家具	0.44	0.45*	0.40	0.40	0.38	0.39
10	造纸印刷和文教体育用品	0.45*	0.41	0.39	0.37	0.38	0.37
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.46	0.47	0.48*	0.45	0.41	0.42
12	化学产品	0.40	0.43*	0.38	0.38	0.39	0.39
13	非金属矿物制品	0.41*	0.41	0.38	0.37	0.37	0.37
14	金属冶炼和压延加工品	0.42	0.43*	0.40	0.39	0.38	0.36
15	金属制品	0.44	0.46*	0.40	0.40	0.37	0.38
16	通用设备	0.41	0.42*	0.38	0.37	0.37	0.38
17	专用设备	0.38	0.41*	0.37	0.36	0.37	0.36
18	交通运输设备	0.44*	0.40	0.37	0.36	0.36	0.36
20	通信设备、计算机和其他电子设备	0.41*	0.41	0.36	0.37	0.36	0.35
21	仪器仪表	0.44*	0.37	0.36	0.36	0.36	0.34
22	其他制造产品	0.47*	0.36	0.37	0.34	0.35	0.35
23	废品废料	0.47*	0.43	0.42	0.41	0.38	0.39
24	金属制品、机械和设备修理服务	0.56*	0.51	0.46	0.46	0.45	0.40
25	电力、热力的生产和供应	0.44	0.44*	0.39	0.37	0.36	0.32
26	燃气生产和供应	0.45*	0.38	0.38	0.36	0.36	0.35
27	水的生产和供应	0.36*	0.34	0.31	0.32	0.33	0.32

注:*表示对应行业最大的分类轮廓系数。

由公式对CGE模拟结果进行回归,得到各行业排放成本函数参数估计值,图6以食品和烟草行业为例,展示了该行业中4种不同的减排成本类型,类型1和类型2依次代表了两种高减排成本类型,而类型3和类型4则依次代表了两类低减排成本类型。

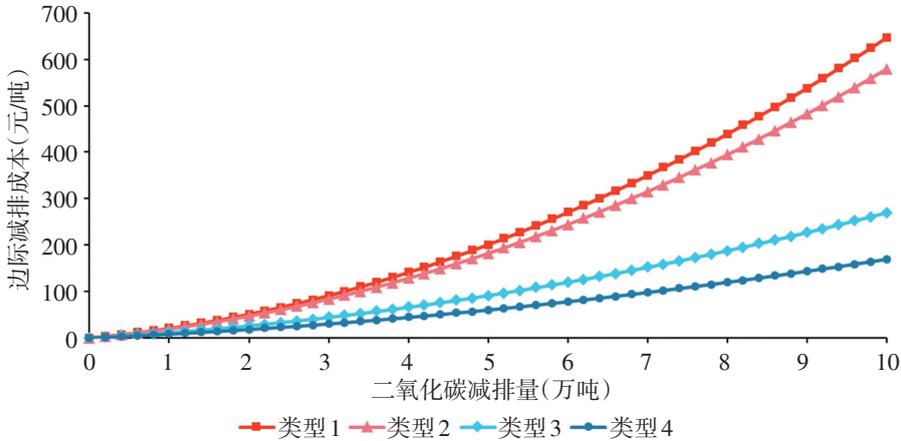


图6 食品和烟草行业异质性边际减排成本曲线

不同碳定价机制的情景模拟结果由图7所示,随着社会边际排放损失的不不断上升,决策者会制定越来越严格的碳排放总量控制目标,从减排效果来看,采用固定价格分配机制的总减排量最接近完全信息情景下的总减排量,采用单一碳税机制的减排效果次之,而采用单一碳排放权分配机制的减排效果最不理想。当社会边际排放损失为10元/吨时,固定价格分配机制仅比完全信息下少减排2.24%,单一碳税机制则将少减排10.71%,而单一碳排放权分配机制的减排量仅约完全信息下的一半,少减排55.49%。当社会边际排放损失上升到100元/吨时,固定价格分配机制相比完全信息下的减排量的差异将减少至1.33%,单一碳税机制的差异减少至5.84%,而单一碳排放权分配机制的差异将上升至58.26%。

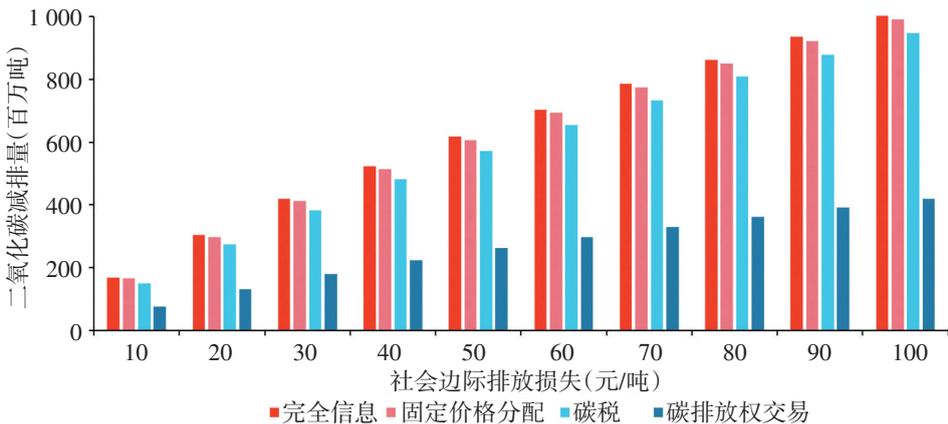
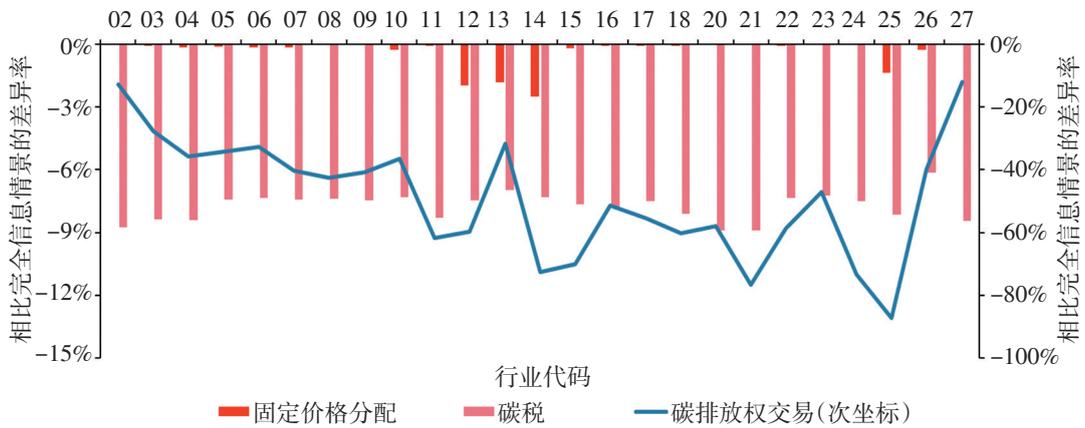


图7 不同情境下CO₂减排量对比

由本文的理论分析可知,随着社会边际排放损失的上升,企业存在一定的谎报减排成本信息的空间,从模拟结果来看,这种撒谎的空间非常有限,即使在社会边际排放损失达到100元/吨时,采用固定价格分配机制的减排效果依然优于采用单一碳税机制的减排效果,这表明本文所提出的固定价格分配机制具有很强的稳健性,能够达到政策目标。

从行业层面看,模拟结果也反映出不同行业在信息不对称下的差异性,图8展示了在社会边际排放损失为50元/吨时,不同行业在不同碳定价机制下与完全信息情景相比的减排效果差异。从图8可以看到,在单一碳税机制或单一碳排放权交易机制下,所有的行业都将会由于信息不对称而发生较严重的企业谎报信息的情况,从而导致所有行业的碳减排量与完全信息情况相比有较大的差异。而在固定价格分配机制下,仅有四个行业会发生较明显的企业撒谎现象,这四个行业分别为化学产品行业、非金属矿物制品行业、金属冶炼和压延加工品行业以及电力、热力的生产和供应行业,这一结果表明,这四个行业存在较为严重的信息不对称现象,在具体实施政策时,应该对这四个行业予以重点关注。



注:社会边际排放损失为50元/吨。

图8 不同碳定价机制下各行业的减排效果差异

五、结论及政策建议

本研究提出了一个信息不对称情况下的碳排放权定价与分配机制,该机制结合了单一价格机制和单一数量机制的优点,能够有效克服这两类政策各自的信息激励缺陷,且该机制不需要进行后续动态调整(包括支付补贴、征收惩罚或发放配额等),政策成本较小,具有较强的现实可操作性。在固定价格分配机制下,从碳排放权供给的角度看,企业即使通过夸大碳排放成本改变了总供给,但同时也会增加其初始购买成本,进而增加其总成本;从碳税角度看,企业即使通过隐瞒碳排放成本降低了初始购买价格,也同时增加其从碳排放权交易市场购买碳排放权的成本,进而增加其总成本。虽然在企业隐瞒碳排放成本的情形下,我们发现企业

依然存在很微小的撒谎动机,但是理论分析得到了企业撒谎的边界条件,该边界条件与Weitzman(1974)所提出的条件相类似。由于在应对全球气候变化问题上,全社会边际排放损失曲线十分平坦,因而很容易满足本文所提出的边界条件,从而极大地提升了固定价格分配机制的信息激励效果。

本文结合中国投入产出数据以及微观企业数据,利用无监督聚类分析与CGE模型模拟并回归得到了不同细分行业的异质性MAC曲线。然后使用数值模拟分析,考察了固定价格分配机制、单一碳税机制以及单一碳排放权交易机制与完全信息情境下的环境效率差异。模拟结果表明,两个单一碳定价机制在信息不对称的情况下都将导致碳排放量偏离最优目标水平,但是偏离程度存在着差异。固定价格分配机制的减排效果最接近于完全信息,其总减排量在不同的社会边际排放损失下,相对完全信息情景的减排量差异约为1%~2%。单一碳税机制的减排效果次之,其相对完全信息情景的减排量差异约为5%~10%。单一碳排放权交易政策的减排效果最不理想,其实现的总减排量不到完全信息情景下的一半。此外,从行业角度看,固定价格分配机制也较好地解决了信息不对称问题,相比于两种单一碳定价机制,采用固定价格分配机制时,仅有化学产品、非金属矿物制品、金属冶炼和压延加工品以及电力、热力的生产和供应这四个行业依然存在轻微的企业撒谎现象,这是导致均衡结果偏离最优结果的主要原因。

本文的研究结果对于现实政策制定具有一定的指导意义,特别是在我国建设全国碳交易市场的过程中,可以提供一定的理论和实证支撑。第一,本文发现企业在面临单一碳排放权交易的政策时,会存在非常强的谎报信息动机,因此我国在未来建设和完善碳交易市场的过程中,需要考虑引入相关价格政策工具来约束潜在的策略行为,以克服单一碳交易市场在信息不对称下可能导致的偏离预期减排效果的问题。第二,需要重点关注包括化学产品、非金属矿物制品、金属冶炼和压延加工品以及电力、热力的生产和供应等存在较严重信息不对称可能性的行业,可以考虑利用物联网监测以及区块链等新兴技术来推进和完善相关数据的收集和管理工作(叶强等,2022),以避免企业谎报信息而导致减排效果大打折扣。第三,在未来的政策制定中,需要充分了解各类节能减排相关的低碳技术的发展趋势,并分析这些技术快速进步而可能对企业减排生产与成本带来的变化,以避免由于信息更新滞后而产生的信息不对称问题。

参考文献:

- [1] 段茂盛,庞韬. 全国统一碳排放权交易体系中的配额分配方式研究[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版),2014,67(5):5-12.
- [2] 国务院发展研究中心课题组. 国内温室气体减排:基本框架设计[J]. 管理世界,2011,(10):135-143.

- [3] 何建坤. 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1): 1-9.
- [4] 李冬冬, 吕宏军, 李品, 杨晶玉. 基于双重信息非对称的排污权交易机制与最优环境政策设计[J]. 中国管理科学, 2020, 28(11): 219-230.
- [5] 聂辉华, 江艇, 杨汝岱. 中国工业企业数据库的使用现状和潜在问题[J]. 世界经济, 2012, (5): 142-158.
- [6] 彭水军, 张文城, 卫瑞. 碳排放的国家责任核算方案[J]. 经济研究, 2016, (3): 137-150.
- [7] 齐绍洲, 王薇. 欧盟碳排放权交易体系第三阶段改革对碳价格的影响[J]. 环境经济研究, 2020, 5(1): 1-20.
- [8] 钱浩祺, 吴力波, 任飞州. 从“鞭打快牛”到效率驱动: 中国区域间碳排放权分配机制研究[J]. 经济研究, 2019, (3): 86-102.
- [9] 孙永平, 刘瑶. 第三方核查机构独立性的影响因素及保障措施[J]. 环境经济研究, 2017, (3): 132-138.
- [10] 汤维祺, 钱浩祺, 吴力波. 内生增长下排放权分配及增长效应[J]. 中国社会科学, 2016a, (1): 60-81+204-205.
- [11] 汤维祺, 吴力波, 钱浩祺. 从“污染天堂”到绿色增长——区域间高耗能产业转移的调控机制研究[J]. 经济研究, 2016b, (6): 58-70.
- [12] 王梅, 周鹏. 碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究[J]. 管理科学学报, 2020, 23(12): 1-11.
- [13] 王明喜, 鲍勤, 汤铃, 汪寿阳. 碳排放约束下的企业最优减排投资行为[J]. 管理科学学报, 2015, 18(6): 41-57.
- [14] 王明喜, 李明, 郭冬梅, 胡毅. 碳排放权的非对称拍卖模型及其配置效率[J]. 管理科学学报, 2019, 22(7): 34-51.
- [15] 杨晶玉, 李冬冬. 基于双边减排成本信息不对称的排污权二级市场拍卖机制研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(8): 146-153.
- [16] 叶强, 高超越, 姜广鑫. 大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 229-249.
- [17] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 80-95.
- [18] Antimiani, A., V. Costantini, C. Martini, A. Palma, and M. C. Tommasino. The GTAP-E: Model Description and Improvements[M]. Dordrecht: Springer, 2012.
- [19] Burtraw, D., K. Palmer, and D. Kahn. A Symmetric Safety Valve[J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4921-4932.
- [20] Costello, C. and L. Karp. Dynamic Taxes and Quotas with Learning[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2004, 28(8): 1661-1680.
- [21] Dasgupta, P., P. Hammond, and E. Maskin. On Imperfect Information and Optimal Pollution Control[J]. The Review of Economic Studies, 1980, 47(5): 857-860.
- [22] Duggan, J. and J. Roberts. Implementing the Efficient Allocation of Pollution[J]. American Economic Review, 2002, 92(4): 1070-1078.
- [23] Fell, H., D. Burtraw, R. D. Morgenstern, and K. L. Palmer. Soft and Hard Price Collars in a Cap-and-Trade System: A Comparative Analysis[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2012, 64(2): 183-198.
- [24] Fell, H. and R. D. Morgenstern. Alternative Approaches to Cost Containment in a Cap-and-Trade System[J]. Environmental and Resource Economics, 2010, 47(2): 275-297.
- [25] Friesen, L., L. Gangadharan, P. Khezr, and I. A. MacKenzie. Mind Your Ps and Qs! Variable Allowance Supply in the US Regional Greenhouse Gas Initiative[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2022, 112: 102620.
- [26] Holt, C. A. and W. M. Shobe. Reprint of: Price and Quantity Collars for Stabilizing Emission Allowance Prices: Laboratory Experiments on the EU ETS Market Stability Reserve[J]. Journal of Environmental Economics and

Management, 2016, 80:69–86.

[27] Kheyr, P. and I. A. MacKenzie. Consignment Auctions[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2018, 87:42–51.

[28] Kheyr, P. and I. A. MacKenzie. An Allocatively Efficient Auction for Pollution Permits[J]. Environmental and Resource Economics, 2021a, 78(4):571–585.

[29] Kheyr, P. and I. A. MacKenzie. Revenue and Efficiency in Pollution Permit Allocation Mechanisms[J]. Energy Economics, 2021b, 93:105033.

[30] Kwerel, E. To Tell the Truth: Imperfect Information and Optimal Pollution Control[J]. The Review of Economic Studies, 1977, 44(3):595–601.

[31] MacKenzie, I. A. The Evolution of Pollution Auctions[J]. Review of Environmental Economics and Policy, 2022, 16(1):1–24.

[32] McKittrick, R. A Cournot Mechanism for Pollution Control under Asymmetric Information[J]. Environmental and Resource Economics, 1999, 14(3):353–363.

[33] Miyamoto, T. Taxes versus Quotas in Lobbying by a Polluting Industry with Private Information on Abatement Costs[J]. Resource and Energy Economics, 2014, 38:141–167.

[34] Montero, J. P. A Simple Auction Mechanism for the Optimal Allocation of the Commons[J]. American Economic Review, 2008, 98(1):496–518.

[35] Newell, R. G. and W. A. Pizer. Indexed Regulation[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2008, 56(3):221–233.

[36] Perino, G. New EU ETS Phase 4 Rules Temporarily Puncture Waterbed[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4):262–264.

[37] Pizer, W. A. Combining Price and Quantity Controls to Mitigate Global Climate Change[J]. Journal of Public Economics, 2002, 85(3):409–434.

[38] Qian, H., L. Wu, and W. Tang. Lock-in Effect of Emission Standard and Its Impact on the Choice of Market based Instruments[J]. Energy Economics, 2017, 63:41–50.

[39] Qian, H., Y. Zhou, and L. Wu. Evaluating Various Choices of Sector Coverage in China's National Emissions Trading System (ETS)[J]. Climate Policy, 2018, 18(S1):7–26.

[40] Roberts, M. J. and M. Spence. Effluent Charges and Licenses under Uncertainty[J]. Journal of Public Economics, 1976, 5(3–4):193–208.

[41] Shrestha, R. K. Menus of Price–Quantity Contracts for Inducing the Truth in Environmental Regulation[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 83:1–7.

[42] Spulber, D. F. Effluent Regulation and Long–Run Optimality[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1985, 12(2):103–116.

[43] Varian, H. R. A Solution to the Problem of Externalities When Agents Are Well–Informed[J]. The American Economic Review, 1994, 84(5):1278–1293.

[44] Wang, X., X. B. Zhang, and L. Zhu. Imperfect Market, Emissions Trading Scheme, and Technology Adoption: A Case Study of an Energy–Intensive Sector[J]. Energy Economics, 2019, 81:142–158.

[45] Weitzman, M. L. Prices vs. Quantities[J]. The Review of Economic Studies, 1974, 41(4):477–491.

[46] Weitzman, M. L. Optimal Rewards for Economic Regulation[J]. The American Economic Review, 1978, 68(4):683–691.

[47] Wilson, R. Auctions of Shares[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1979, 93(4):675–689.

[48] World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2021[R]. 2021.

[49] Wu, L., S. Zhang, and H. Qian. Distributional Effects of China's National Emissions Trading Scheme with an Emphasis on Sectoral Coverage and Revenue Recycling[J]. *Energy Economics*, 2022, 105: 105770.

Allocation and Pricing Mechanism of Carbon Emissions Permit of China's Industrial Firms Under Asymmetric Information

Qian Haoqi^{a,b,e}, Wu Libo^{c,d,e}

(a: Institute for Global Public Policy, Fudan University; b: LSE-Fudan Research Centre for Global Public Policy, Fudan University; c: School of Economics, Fudan University; d: Institute for Big Data, Fudan University; e: Shanghai Institute for Energy and Carbon Neutrality Strategy, Fudan University)

Abstract: Designing a well-established carbon emissions trading system (ETS) can contribute greatly to China's goals of peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality. For ETS, an appropriate carbon permit allocation and pricing mechanism can promote firms' energy conservation and emission reduction behaviors through forming effective price signals. This paper proposes a hybrid pricing and allocation mechanism of carbon permits under asymmetric information. This mechanism combines advantages of both pure price control mechanism and pure quantity control mechanism, which provides effective incentives for firms to report their true emissions information to the social planner to set optimal policy targets. The simulation analyses justify theoretical model's predictions by using computable general equilibrium (CGE) model based on China's input-output data and firm-level data. Results show that abatement effect of the hybrid mechanism is closer to the full information case than that of pure price control mechanism and pure quantity control mechanism.

Keywords: Asymmetric Information; Carbon Emissions Permit Allocation; Computable General Equilibrium Model; Marginal Abatement Cost Curve; Unsupervised Learning

JEL Classification: D44, D82, Q54, Q58

(责任编辑:卢玲)