



基于量子反应均衡的排污企业的有限理性研究

郑君君 蔡明 王璐 王向民
(武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072)

摘要: 本文设计了 2×2 行为实验研究排污企业的有限理性, 定量刻画了不同排污权有偿分配政策下排污企业的有限理性程度, 并进行了对比分析, 得到结论: 排污权的定价策略影响企业的有限理性程度, 在高价策略下企业决策更加理性; 排污权的分配方式是否影响企业的有限理性程度与排污权价格相关, 在低价策略下依据产量分配方式下的企业决策更加理性, 高价策略下两种分配方式下的企业有限理性程度相差不大; 排污技术水平不同的企业, 其有限理性程度不同。在低价策略下, 排污技术水平高的企业决策更加理性, 在高价策略下, 排污技术水平低的企业决策更加理性; 排污企业的有限理性参数波动范围大概在 52-97 之间。本文的研究为排污企业进行合理有效的决策分析以及政府政策的进一步完善提供了理论支持。

关键词: 量子反应均衡; 排污权有偿分配; 有限理性; 实验

引言

改革开放以来, 我国国民经济蓬勃发展, 国家物质生产体系不断完善、社会发展水平和人民生活水平大幅提升。然而, 经济持续快速增长的背后是资源与环境的迅速消耗和恶化。环境污染问题日渐成为桎梏经济发展的瓶颈。面对严峻的环境形势, 我国提出了排污权交易这一市场化的手段来治理环境问题。

排污权交易的提出受到了各利益方的关注, 学术界也对其展开热烈的讨论。许多学者从政策制定者的视角出发, 对一级市场上的排污权初始分配机制^[1]和二级市场上的排污权交易机制^[2]设计等问题进行了详尽、深入的探讨。从另一利益方——排污企业的视角出发, 学者们分别对企业在排污权交易机制下的生产^[3]、库存^[4]、选址^[5]、减排^[6]等问题进行了研究。从排污企业视角出发的研究大多基于完全理性的假设, 根据纳什均衡得出结论, 然而, 许多学者的行为实验研究^[7]表明博弈主体的决策往往偏离纳什均衡, 表现出有限理性。因此, 基于完全理性假设的研究虽然具有一定的理论价值, 但是其与排污企业的实际决策存在较大偏差, 对排污企业生产决策的参考借鉴作用较有限。

有限理性的定量刻画为学者利用有限理性模型代替纳什均衡对排污企业的决策进行研究提供了可能。量子反应均衡(QRE)是一种定量刻画决策者有限理性的模型, 它在许多博弈问题中有很好的预测力。学者们利用 QRE 对一些经典博弈模型中决策者的有限理性进行了刻画^[8-11]。梳理相关文献发现, 决策者处于不同博弈环境中, 其有限理性程度不同。经典博弈问题中的有限理性模型不能直接用于排污企业的决策分析, 对排污企业的有限理性的定量刻画问题仍然没有解决。

定量刻画排污企业的有限理性对排污企业利用有限理性模型进行合理有效的决策分析非常重要。另一方面, 我国排污权交易政策还在试点阶段, 定量刻画排污企业面对不同排污权分配政策的有限理性程度有助于政策制定者针对排污企业在不同排污权分配政策下的反应进一步制定和完善相关政策。本文在排污权交易背景下, 从排污企业的视角出发, 基于量子反应均衡定量刻画排污企业在不同的排污权有偿分配政策下的有限理性, 并进一步分析了不同排污权有偿分配政策对企业有限理性程度的影响, 以期对排污企业合理有效地进行决策分析以及政策制定者进一步完善排污权有偿分配政策提供理论指导和政策建议。

理论综述

决策者处于纷繁复杂的外部世界, 由于对决策情境的认知及自身计算能力的局限, 其决策往往与纳什均

收稿日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(71771181); 湖北省教育厅哲学社会科学重大项目(16zd002)。

作者简介: 郑君君, 武汉大学经济与管理学院教授, 博士生导师, 博士; 蔡明, 武汉大学经济与管理学院博士研究生; 王璐, 武汉大学经济与管理学院博士研究生; 王向民, 武汉大学经济与管理学院博士研究生。



衡不一致。Simon^[12]于1995年首次用“有限理性”(bounded rationality)这一术语描述决策者决策知识的不完备及计算能力的局限。随后经济学家们建立了各种各样的模型、框架来捕捉决策者行为的有限理性,其中前景理论(累积前景理论)、演化博弈(网络演化博弈)是发展较为完备、应用较为广泛的理论。曹麒麟和王文轲^[13]等将前景理论应用于风险投资决策的研究,建立了基于有限理性的实物期权风险投资动态决策模型。陈志松^[14]分别在前景理论与期望效用理论视角下研究了有限理性的战略顾客行为对供应链协调的影响。包甜甜等^[15]将前景理论应用于不确定混合多属性决策问题的求解,提出了基于前景理论与证据推理的直觉模糊决策方法。宋彪等^[16]利用演化博弈论建立了“一带一路”战略下,地方政府和企业的合作与监管模型,分析了地方政府和企业的机会主义行为对企业合作稳定性的影响。肖振红等^[17]从网络演化博弈视角下研究了跨国公司逆向知识转移的运行机制和动态过程。

此外,行为科学家和心理学家们也提出了框架效应、心理距离、“齐当别”等描述性概念与模型来描述决策者的有限理性。郑君君等^[18]利用实验方法研究了框架效应与心理距离对博弈合作行为的影响,其结论表明给予型框架比索取型框架更有利于合作行为的产生,个体的心理距离越近,合作意愿更高。熊冠星等^[19]利用“齐当别”模型研究员工的离职决策如何受到“薪酬感知域差”的影响。

除了以上经典的刻画有限理性的理论与方法之外,学者们也根据特定的研究问题,提出不同的定义有限理性的方式。Ubøe等^[20]利用概率成本效率定义有限理性,通过报童模型实验将决策者行为的有限理性通过统计方法进行严格检验。Liu等^[21]利用Perles-Maschler解^[22]定义讨价还价博弈中参与者的有限理性,对劳资纠纷问题进行了研究。Karaliopoulos等^[23]利用快速节俭启发式决策方式中的字典启发式决策方法研究了停车决策中有限理性。Ye和Yang^[24]通过引入有限理性用户均衡拓展了理性行为调整过程(RBAP)的框架。赵爱武等^[25]利用计算实验手段模拟消费者绿色购买行为,探索有限理性消费者的绿色购买行为的演化规律。

上述文献大多通过建立描述性模型对有限理性进行阐述,定量刻画决策者有限理性的文献较少。McKelvey和Palfrey^[26]基于量子选择(quantal choice)概念提出的量子反应均衡(quantal response equilibrium)提供了一个定量刻画决策者有限理性的工具。与纳什均衡的完美最优化相比,QRE是一种噪声优化,它放松了纳什均衡的严格假设。QRE在许多博弈问题中有很好的预测力。Ho和Zhang^[27]利用QRE解释了制造商——零售商价格合约实验中的固定费率构成与纳什均衡的预测不同的问题。Song和Zhao^[28]利用QRE刻画战略顾客的有限理性,确定了战略顾客报童问题的最优出售价格及预定量。此外,QRE也被用于协调博弈^[29]、拍卖^[30]、志愿者困境^[31]、禀赋效应^[32]等问题的研究。

这些研究针对特定的情境,从不同的角度对博弈对象的有限理性进行了建模分析,为研究排污企业的有限理性提供了有益的理论基础,但是上述研究大多通过建立描述性模型对经典博弈问题进行探讨,没有对现实排污企业的有限理性进行分析。排污企业的有限理性不仅由企业的内部因素引发,还会受到外部决策环境(环境政策)的影响。刻画不同排污权初始分配机制下的排污企业的有限理性对于厘清排污企业在不同环境政策下表现出怎样的有限理性以及哪种环境政策更能激发企业进行理性决策等问题来说非常重要。

实验设计及分析

1、实验设计

本文设计行为实验研究不同排污权初始分配机制下排污企业表现出怎样的有限理性。排污权初始分配机制主要由排污权价格及排污权分配方式两个要素决定。根据目前我国排污权有偿使用和交易政策,各试点普遍采用政府定价的方式进行排污权有偿分配。政府综合考虑污染治理平均成本、环境资源稀缺程度以及经济发展水平等因素,按照法定程序确定排污权价格,并且在一定时期内固定不变。随着社会经济的发展,污染治理平均成本及环境资源稀缺程度的变化,政府会适时调整价格。排污权的分配方式主要有依据产量分配及依据排污量分配。因此,本文的实验分别设计了高价和低价两种排污权的定价方式以及依据产量分配和依据排污量分配两种分配方式。

在排污权分配过程中,流域排污权总量为 k 单位。环境监管部门通过政府定价的有偿分配方式将排污权



分配给流域附近的排污企业。当排污权依据产量分配时,企业分别向政府提交其产量;当排污权依据历史排污量分配时,企业分别向政府提交其排污量。考虑流域附近只有两家企业的情况:企业 1 的产量为 q_1 ,企业 2 的产量为 q_2 。两家企业单位产品排污量分别为 δ_1 和 δ_2 。那么,两家企业的排污需求分别为 $\delta_1 q_1$ 和 $\delta_2 q_2$ 。当 $\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2 \leq k$ 时,排污权总量大于两家企业的排污需求之和,每家企业都能够获得生产所需全部排污权;当 $\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2 > k$ 时,在排污权依据产量分配规则下,企业 1 的排污权分配量为 $q_1 k / (q_1 + q_2)$,企业 2 的排污权分配量为 $q_2 k / (q_1 + q_2)$;在排污权依据排污量分配规则下,企业 1 的排污权为 $\delta_1 q_1 k / (\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2)$,企业 2 的排污权为 $\delta_2 q_2 k / (\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2)$ 。当两家企业的排污需求之和小于排污权总量时,每家企业都能获得满足其需求的排污权,排污权分配不存在困难。本文假设两家企业的排污需求之和大于排污权总量。

产品的市场价格为 p ,生产成本为 c 。政府有偿分配下排污权价格为 t ,市场交易中排污权价格为 t' , ($t' \geq t$)。企业 1 的排污权分配量为 r_1 ,企业 2 的排污权分配量为 r_2 。企业的利润由出售产品的收益与出售(购买)排污权的收益(成本)两部分构成。利润表达式为: $\pi_1 = (p - c - t\delta_1)q_1 + (r_1 - \delta_1 q_1)(t' - t)$, $\pi_2 = (p - c - t\delta_2)q_2 + (r_2 - \delta_2 q_2)(t' - t)$ 。因此,当排污权依据产量分配时,两家企业的利润表达式分别为:

$$\begin{cases} \pi_1 = (p - c - t\delta_1)q_1 + \left(\frac{q_1}{q_1 + q_2} - \delta_1 q_1\right)(t' - t) \\ \pi_2 = (p - c - t\delta_2)q_2 + \left(\frac{q_2}{q_1 + q_2} - \delta_2 q_2\right)(t' - t) \end{cases} \quad (1)$$

当排污权依据排污量分配时,两家企业的利润表达式分别为:

$$\begin{cases} \pi_1 = (p - c - t\delta_1)q_1 + \left(\frac{\delta_1 q_1}{\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2} - \delta_1 q_1\right)(t' - t) \\ \pi_2 = (p - c - t\delta_2)q_2 + \left(\frac{\delta_2 q_2}{\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2} - \delta_2 q_2\right)(t' - t) \end{cases} \quad (2)$$

在纳什均衡状态下,每家企业采取行动使自身利润最大。上述博弈没有纯策略纳什均衡。每个参与者的最佳策略是提交比对手更高的产量(排污量)。但是在生产实际中,由于原材料、生产设备以及技术水平等因素的制约,每家企业的生产量(排污量)存在上限,我们将每家企业的生产上限分别记为 U_1 和 U_2 。那么,在依据产量分配规则下,唯一的纳什均衡是 (U_1, U_2) ;在依据排污量分配规则下,唯一的纳什均衡是 $(\delta_1 U_1, \delta_2 U_2)$ 。也就是说,在纳什均衡下,每家企业都提交自己的最大生产量(排污量)。在依据产量分配规则下,企业 1 和企业 2 获得的排污权分别为 $U_1 k / (U_1 + U_2)$ 和 $U_2 k / (U_1 + U_2)$;在依据排污量分配规则下,企业 1 和企业 2 获得的排污权分别为 $\delta_1 U_1 k / (\delta_1 U_1 + \delta_2 U_2)$ 和 $\delta_2 U_2 k / (\delta_1 U_1 + \delta_2 U_2)$ 。纳什均衡的预测结果与模型的参数无关。无论排污权的定价策略和分配方式如何,每家企业都提交自己的最大生产量。下面进行排污权有偿分配下的企业生产决策实验。

实验分为四组,分别是依据产量分配+低价策略、依据排污量分配+低价策略、依据产量分配+高价策略、依据排污量分配+高价策略,四组实验互为对照。参数设置如下: $k = 150$, $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 2$, $U_1 = U_2 = 100$, $p - c = 5$ 。在第一、二组实验中,排污权定价为低价, $t = 0.1$, $t' = 0.2$;在第三、四组实验中,排污权定价为高价, $t = 1$, $t' = 1.5$ 。

随机选取来自某企业不同项目部、不同部门的在职员工进行实验。实验被试总人数为 152 人,其中男士 82 人,女士 70 人。被试的平均年龄为 29.4 岁。所有被试拥有大学及以上学历及相关工作经验,能够较好地理解并配合实验进程。实验分四场进行,第一、二场实验每场 36 人,第三、四场实验每场 40 人。每场实验中将随机分配到两组,分别作为企业 1 和企业 2 进行决策。每场实验进行 10 轮,每轮中企业 1 和企业 2 进行随机配对,同时提交各自的产量(排污量),产量为 0 到 100 的整数。然后由实验人员利用电脑程序计算出企业 1 和企业 2 的利润,分别反馈给两家企业,一轮结束。下一轮开始时,企业 1 和企业 2 再次进行随机配对(不再与上一轮对手相遇),共同进行产量(排污权)决策。重复上述过程,直至 10 轮结束,开始下一场实验。每场实验持续 1.5 小时。实验结束后,工作人员根据被试在实验中的表现发放实验报酬。实验报酬与被试作为企业获得的利润正相关。报酬计算规则为:总利润 $\times 0.1 + 10$ 。报酬波动范围是 29.1-51.5 元,各组实验平均报酬不同,但与四组的平均报酬 39.6 元相差不大。



2、实验结果分析

在第一组和第二组实验中分别收集到 180 个企业 1 和企业 2 的产量和排污量数据,在第三组和第四组实验中分别收集到 200 个企业 1 和企业 2 的产量和排污量数据。剔除无效数据后,各组有效数据的个数分别为 174、179、191、200。

对实验结果进行统计分析,并绘制如图 1 和图 2 的频率分布直方图。从两幅图中可以看到,各组中企业 1 选择纳什均衡产量的样本数分别为 32、44、100、86,在总样本中所占比例分别为 18.39%、24.58%、52.36%、43.00%;企业 2 选择纳什均衡产量的样本数分别为 46、48、88、67,在总样本中所占比例分别为 26.44%、26.82%、46.07%、33.50%。综合两家企业的样本,各组中纳什均衡样本的比例分别是:22.41%、25.70%、49.21%、38.25%。结果表明:①实验数据与纳什均衡的预测相差较大,纳什均衡的预测潜力不足;②低价组(第一组和第二组)中纳什均衡占比小于高价组(第三组和第四组),因此推测企业在排污权高价策略下更加理性。

下面我们分析四组实验的系统性差异。各组中企业 1 的平均产量分别为:84.75、82.51、85.27、86.31;各组中企业 2 的平均产量分别为:82.25、80.85、83.21、79.69。从平均产量来看四组实验的平均值相差不大。下面考虑各组中产量多于 95 和少于 40 的比例。从表 1 可以看到,各组中企业 1 的产量多于 95 的比例分别是:35.63%、30.17%、53.93%、48.50%;少于 40 的比例分别是:1.15%、1.68%、2.09%、1.50%。各组中企业 2 的产量多于 95 的比例分别是:37.36%、33.52%、47.12%、34.00%;少于 40 的比例分别是:5.17%、2.23%、4.71%、3.00%。从多于 95 的样本数的比例来看,低价组(第一组和第二组)的比例低于高价组(第三组和第四组)的比例,因此我们推测企业在排污权高价下的策略更加理性。从少于 40 的样本数的比例来看,各组比例相差不大。综合来说,在四组实验中样本均值相差不大;高价组多于 95 的样本比例高于低价组;各组少于 40 的样本比例差异不大。

表 1 各组中多于 95 和少于 40 的样本比例

组别	多于 95 的比例		少于 40 的比例	
	企业 1	企业 2	企业 1	企业 2
第一组	35.63%	37.36%	1.15%	5.17%
第二组	30.17%	33.52%	1.68%	2.23%
第三组	53.93%	47.12%	2.09%	4.71%
第四组	48.50%	34.00%	1.50%	3.00%

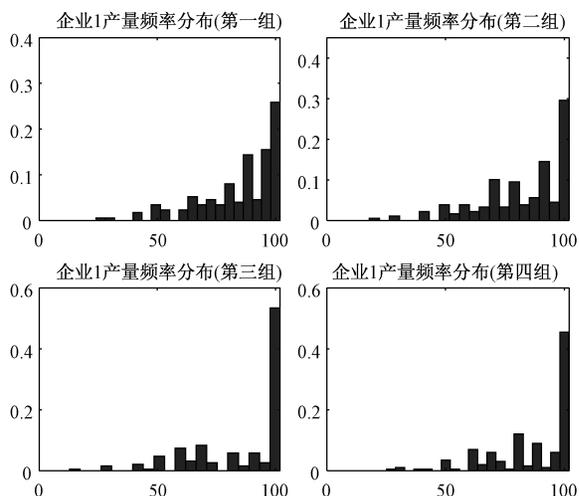


图 1 各组中企业 1 的产量分布直方图

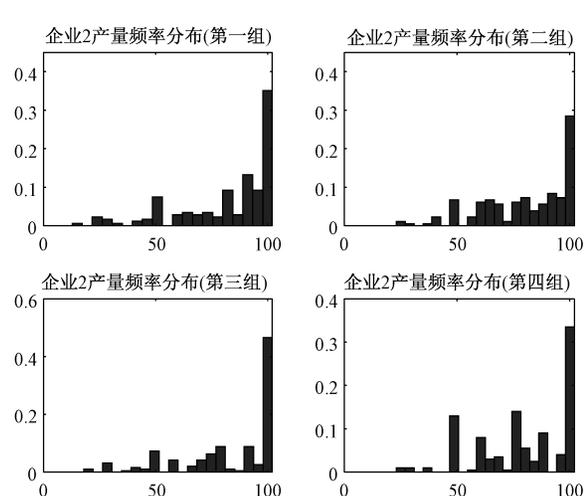


图 2 各组中企业 2 的产量分布直方图

下面我们分析在多轮博弈中,企业的产量是否存在明显的时间趋势。分别计算各轮次中企业 1 和企业 2 的平均产量,绘制图 3 和图 4。从图 3 中可以看到,企业 1 在不同轮次中平均产量的变化没有明显的时间趋势。同样,从图 4 中可以看到,企业 2 在不同轮次中平均产量的变化也没有明显的时间趋势。因此,在博弈过程中决策者的学习效应不显著。

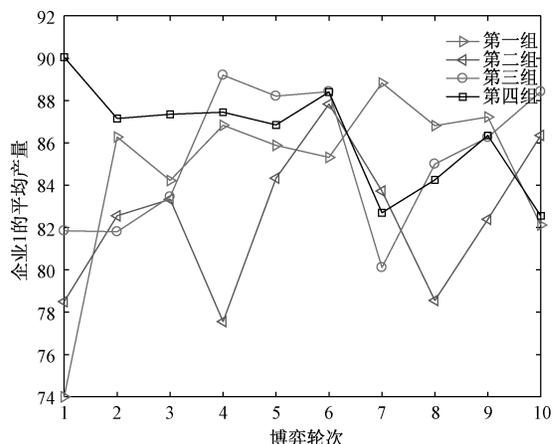


图 3 各轮次中企业 1 的平均产量

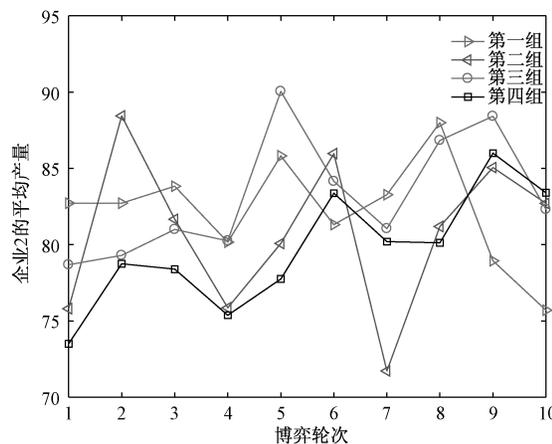


图 4 各轮次中企业 2 的平均产量

基于 QRE 的有限理性模型

1、模型的提出

McKelvey 和 Palfrey^[33]首先利用实验方法研究了博弈主体行为的理性,他们发现博弈主体通常不能按照唯一的纳什均衡做出选择。他们认为博弈主体的选择与纳什均衡之间的差异可能来源于有限理性。量子反应均衡(QRE)概念的提出将有限理性引入了博弈论的研究范畴。QRE 是指在均衡状态下所有备选方案都可能被主体选择,但是使主体效用更高的方案被选择的概率更大。与纳什均衡的完美最优化相比,QRE 是带噪声的优化。这种噪声优化蕴含:参与者不总是采取收益最大化的行动;参与者无法完全确定对手的策略。QRE 的这两个性质放松了纳什均衡的严格假设。

两人博弈的量子反应均衡定义如下: $\pi_i(q_i, q_{-i})$ 为参与者 i 选择策略 q_i ,对手选择策略 q_{-i} 时,参与者 i 的收益。参与者 i 的策略 Q_i 是定义在集合 S_i 上的随机变量,对手的策略 Q_{-i} 是定义在集合 S_{-i} 上的随机变量。那么 QRE 是一个混合策略,参与者 i 采取策略 $q_i \in S_i$ 的概率是:

$$P_i(q_i) = \frac{\exp(\mathbb{E}\pi_i(q_i, Q_{-i})/\beta_i)}{\sum_{q_i \in S_i} \exp(\mathbb{E}\pi_i(q'_i, Q_{-i})/\beta_i)} \quad (3)$$

这个概率是通过假设每个参与者选择带噪声的优化策略而得到的。参数 β_i 为有限理性参数,刻画参与者 i 的有限理性程度。当 $\beta_i \rightarrow \infty$ 时,参与者缺乏理性决策的能力,以等概率在所有备选方案中随机选择;当 $\beta_i \rightarrow 0$ 时,参与者完全理性,以概率 1 选择收益最大化的行动。Chen 等^[7]利用 QRE 研究容量分配博弈中的有限理性时,假设所有参与者具有一致的有限理性参数。与之不同,本文放松参与者同质的假设,假设参与具有不同的有限理性参数。

利用 QRE 研究排污权有偿分配下的企业有限理性生产决策。在排污权依据产量分配下,利润表达式为: $\pi_i = (p - c - t\delta_i)q_i + (q_i / (q_1 + q_2) - \delta_i q_i)(t' - t), i = 1, 2$ 。在依据排污量分配下,利润表达式为: $\pi_i = (p - c - t\delta_i)q_i + (\delta_i q_i / (\delta_1 q_1 + \delta_2 q_2) - \delta_i q_i)(t' - t), i = 1, 2$ 。因此,在第 t 轮次企业 1 和企业 2 选择产量 q_{1t} 和 q_{2t} 的概率分别为:

$$P_{1t}(q_{1t}) = \frac{\exp(\frac{1}{U_{2q_{2t}=1}} \sum_{q_{2t}=1}^{U_2} \pi_1(q_{1t}, q_{2t})/\beta_1)}{\sum_{q_{1t}=1}^{U_1} \exp(\frac{1}{U_{2q_{2t}=1}} \sum_{q_{2t}=1}^{U_2} \pi_1(q_{1t}, q_{2t})/\beta_1)} \quad (4)$$

$$P_{2t}(q_{2t}) = \frac{\exp(\frac{1}{U_{1q_{1t}=1}} \sum_{q_{1t}=1}^{U_1} \pi_2(q_{1t}, q_{2t})/\beta_2)}{\sum_{q_{2t}=1}^{U_2} \exp(\frac{1}{U_{1q_{1t}=1}} \sum_{q_{1t}=1}^{U_1} \pi_2(q_{1t}, q_{2t})/\beta_2)} \quad (5)$$

其中 β_i 是企业 i 的有限理性参数,下标 t 表示第 t 轮次。



2、模型参数的极大似然估计

构造上述基于 QRE 的排污权有偿分配政策下的企业有限理性模型的似然函数:

$$L(\beta_i, \varepsilon | Q) = \prod_{i=1}^2 \prod_{t=1}^T \{(1 - \varepsilon)P_{it}(q_{it}) + \varepsilon/|S|\} \quad (6)$$

似然函数中的 $(1 - \varepsilon)P_{it}(q_{it})$ 项表示参与者以 $1 - \varepsilon$ 的概率根据 QRE 模型的概率分布 $\{P_{it}(\cdot)\}$ 选择产量, $\varepsilon/|S|$ 项表示参与者以 ε 的概率在策略集合 $S = \{1, 2, \dots, 100\}$ 内随机选择。这里遵循文献中通常做法, 采用一致的误差项 ε 。通常情况下, 在模型拟合的结果中 ε 是一个小的正数。当 $\varepsilon = 0$ 时实验数据与 QRE 模型完全拟合。连乘形式的似然函数增加了计算的复杂度, 考虑对 (6) 式取对数, 构造如下的对数似然函数:

$$\ln L(\beta_i, \varepsilon | Q) = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T \ln((1 - \varepsilon)P_{it}(q_{it}) + \varepsilon/|S|) \quad (7)$$

对数似然函数中的参数包括两个企业的有限理性参数 β_i 和误差项 ε 。下面通过极大化对数似然函数来估计模型中的参数。

考虑以下几种情况:

(1) 当 $\beta_i = 0, i = 1, 2$ 时, 有限理性模型退化为纳什均衡。这时参数只有 ε , 利用似然估计方法, 能够检验上述参数是否为零。若检验结果支持参数不为零, 那么就提供了企业决策存在有限理性的证据。

(2) 当 $\beta_i = \beta_j = \beta, i, j = 1, 2, i \neq j$ 时, 所有企业有相同的有限理性参数。这时所有参与者是同质的, 我们称之为同质模型, 模型中需要估计的参数为 β 和 ε 。

(3) 当 $\beta_i \neq \beta_j, i, j = 1, 2$ 时, 所有企业的有限理性参数不同。这时参与者是异质的, 我们称之为异质模型, 此时模型中的参数有 3 个。

首先利用极大似然估计方法, 将第一组数据与模型进行拟合。所有数值计算在 Matlab 平台上进行。表 2 展示了利用第一组数据进行模型参数估计的结果。

表 2 第一组数据的参数估计结果

理论模型	纳什均衡	同质模型	异质模型
β_1	—	72.4056	72.6427
β_2	—	—	77.1053
ε	0.9817	0.0773	0.0620
参数个数	1	2	3
对数似然值	-1657.9	-1341.4	-1341.3
与异质模型的似然比检验	P=0.0088	P=0.0499	

分析表 2 中的估计结果, 我们发现:

(1) 利用实验数据分别与纳什均衡、同质模型和异质模型进行拟合, 得到参数 ε 的估计值分别为 0.9817、0.0773 和 0.0620。纳什均衡的误差项比同质模型和异质模型大很多, 纳什均衡与数据的拟合程度较差, 有限理性模型与数据的拟合程度较好。

(2) 纳什均衡与异质模型的似然比检验 P 值为 0.0088, 说明异质模型中参数 β_i 显著非零。这一结果给出了有限理性存在的证据。

(3) 同质模型的对数似然值为 -1341.4, 异质模型的对数似然值为 -1341.3, 二者进行似然比检验 P 值为 0.0499。在 0.05 的显著性水平下, 同质模型与异质模型的差异显著。这一结果为异质模型的合理性提供了证据。

下面分别利用第二、三、四组实验数据进行模型参数估计, 拟合结果如表 3-表 5 所示。

表 3 第二组数据的参数估计结果

理论模型	纳什均衡	同质模型	异质模型
β_1	—	94.4727	92.1597
β_2	—	—	96.8908
ε	1.0000	0.0001	0.0001
参数个数	1	2	3
对数似然值	-1657.9	-1414.4	-1414.3
与异质模型的似然比检验	P=0.0099	P=0.0499	



从表3中可以发现:

(1) 纳什均衡、同质模型与异质模型的误差项估计值分别为:1.0000、0.0001、0.0001,结果表明有限理性模型比纳什均衡的拟合程度更好。

(2) 纳什均衡与异质模型的似然比检验 P 值为 0.0099,异质模型中参数 β_i 显著非零。

(3) 同质模型与异质模型的似然比检验在 0.05 的显著性水平上显著。在依据排污量分配+低价情形下,异质模型的解释力度比同质模型更强。

表4 第三组数据的参数估计结果

理论模型	纳什均衡	同质模型	异质模型
β_1	—	55.0860	66.2179
β_2	—	—	52.8919
ε	1.0000	0.0733	0.0266
参数个数	1	2	3
对数似然值	-1657.9	-1527.7	-1526.3
与异质模型的似然比检验	P=0.0119	P=0.0498	

表5 第四组数据的参数估计结果

理论模型	纳什均衡	同质模型	异质模型
β_1	—	64.6029	65.8287
β_2	—	—	62.7811
ε	1.0000	0.0001	0.0001
参数个数	1	2	3
对数似然值	-1657.9	-1607.1	-1607.0
与异质模型的似然比检验	P=0.0134	P=0.0499	

从表4中可以发现:

(1) 纳什均衡、同质模型与异质模型的误差项估计值分别为:1.0000、0.0733、0.0266,结果表明有限理性模型比纳什均衡的拟合程度更好。

(2) 纳什均衡与异质模型的似然比检验 P 值为 0.0119,异质模型中参数 β_i 显著非零。

(3) 同质模型与异质模型的似然比检验在 0.05 的显著性水平上显著。依据产量分配+高价情形下,异质模型的解释力度比同质模型更强。

从表5中可以发现:

(1) 纳什均衡、同质模型与异质模型的误差项估计值分别为:1.0000、0.0001、0.0001,结果表明有限理性模型比纳什均衡的拟合程度更好。

(2) 纳什均衡与异质模型的似然比检验 P 值为 0.0134,异质模型中参数 β_i 显著非零。

(3) 同质模型与异质模型的似然比检验在 0.05 的显著性水平上显著。依据排污量分配+高价情形下,异质模型的解释力度比同质模型更强。

表6 四组实验的有限理性参数及误差项对比

	低价策略			高价策略		
	企业1	企业2	误差	企业1	企业2	误差
依据产量分配	72.6427	77.1053	0.0620	66.2179	52.8919	0.0266
依据排污量分配	92.1597	96.8908	0.0001	65.8287	62.7811	0.0001

表6展示了四组实验数据拟合后的有限理性参数,纵观四组数据的参数拟合情况发现:

(1) 在不同排污权定价策略下,企业的有限理性参数不同。在低价策略下,企业的有限理性参数较大。在高价策略下,企业的有限理性参数较小。以上结果表明在高价策略下企业决策更加理性。这个结论验证了上文中的推测。

(2) 在低价策略下,依据产量分配比依据排污量分配的有限理性参数小。在高价策略下,两种分配方式的有限理性参数相差不大。排污权的分配方式是否影响企业的有限理性程度与排污权价格相关,在低价策略下依据产量分配时企业决策更加理性,高价策略下不同分配方式对企业的有限理性程度影响不大。

(3) 企业1和企业2的有限理性参数在0.05的显著性水平上显著。在排污权有偿分配政策下,不同排污



技术水平的企业的有限理性程度差异显著。在低价策略下,企业 1 的决策更加理性,在高价策略下,企业 2 的决策更加理性。

(4)在排污权交易中,企业的有限理性参数波动范围大概在 52-97 之间。

以上分析表明,不同的排污权有偿分配模式下,企业有限理性参数不同。排污权的价格对企业的有限理性程度具有影响,在低价策略下企业决策更加理性。排污权的分配方式是否影响企业的有限理性程度由排污权价格决定,在低价策略下依据产量分配时企业决策更加理性,高价策略下两种分配方式对企业的有限理性程度的影响不大。排污技术水平不同的企业其有限理性程度不同。在低价策略下,排污技术水平高的企业决策更加理性。在低价策略下,排污技术水平低的企业决策更加理性。

3、模型的拟合优度检验

为了进一步验证排污权有偿分配下的有限理性模型与实验数据的拟合优度,我们分别利用四组实验数据与模型进行 K-S 拟合优度检验。表 7 展示了 K-S 检验的 P 值,四组数据与模型的拟合优度检验结果在 1% 的显著性水平上没有显著差异。从模型的拟合优度结果来看,四组实验与模型的拟合优度都较好。

我们将同质模型与实验数据的拟合效果更直观地展示在图 5 和图 6 中。异质模型与实验数据的拟合效果图展示在图 7 和图 8 中。从图中可以看到,基于 QRE 的有限理性模型能够较好地拟合实验数据。

表 7 模型的 K-S 拟合优度检验

	同质模型		异质模型	
	企业 1	企业 2	企业 1	企业 2
第一组	0.4973	0.7710	0.4973	0.7710
第二组	0.7710	0.7710	0.7710	0.7710
第三组	0.2753	0.2753	0.2753	0.7710
第四组	0.9655	0.2753	0.9655	0.2753

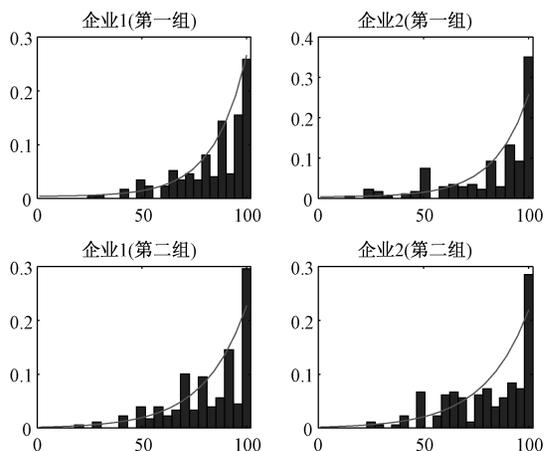


图 5 同质模型的拟合效果图(第一组、第二组)

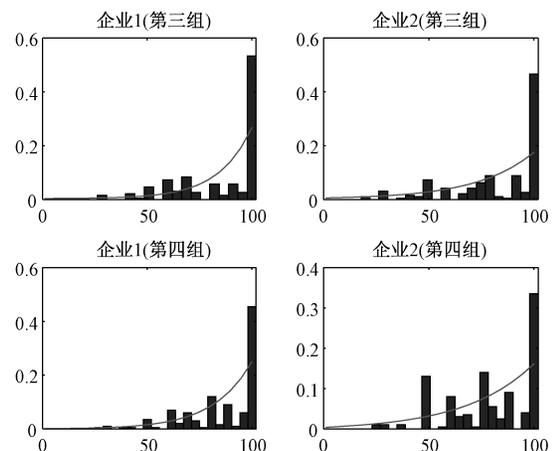


图 6 同质模型的拟合效果图(第三组、第四组)

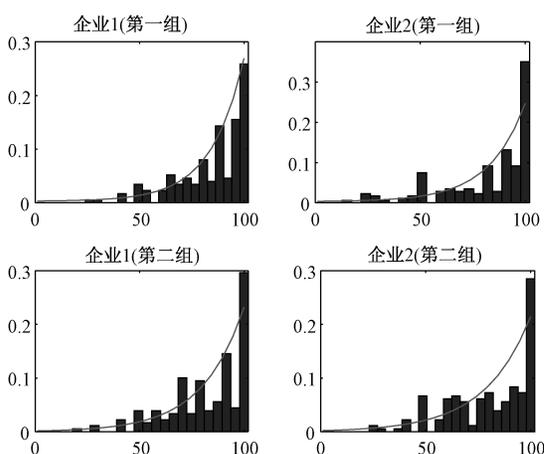


图 7 异质模型的拟合效果图(第一组、第二组)

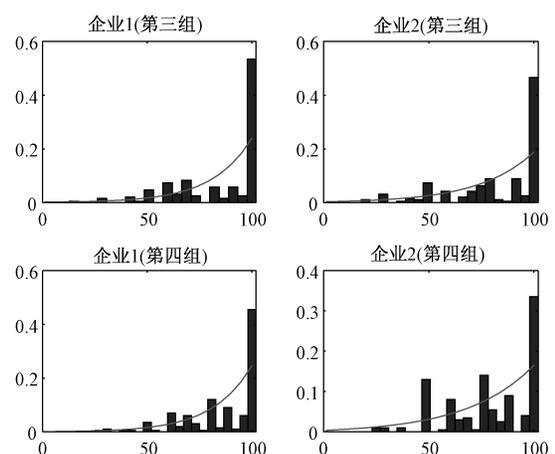


图 8 异质模型的拟合效果图(第三组、第四组)



研究结论与讨论

本文定量刻画了排污企业的有限理性程度,并对不同排污权有偿分配政策下的排污企业的有限理性程度进行了对比分析,得到结论:排污权的定价策略影响企业的有限理性程度,在高价策略下企业决策更加理性;排污权的分配方式是否影响企业的有限理性程度与排污权的价格相关,在低价策略下依据产量分配时企业决策更加理性,高价策略下两种分配方式对企业的有限理性程度影响不大;在排污权有偿分配政策下,不同排污技术水平的企业的有限理性程度不同,在低价策略下,排污技术水平高的企业决策更加理性,在高价策略下,排污技术水平低的企业决策更加理性;在排污权交易政策下,排污企业的有限理性参数波动范围大概在52-97之间。

文章的理论与现实意义在于:首先,我国排污权有偿分配政策还在试点阶段,发展还不成熟,排污权的定价和分配问题是否影响以及如何影响企业的生产决策的有限理性对排污企业的决策及政府政策的进一步完善非常重要。本文利用实验方法定量刻画了排污企业在排污权有偿分配政策下的生产决策的有限理性,并且分析了排污权的定价策略与分配方式对企业有限理性程度的影响。从定价策略方面分析,在高价策略下企业决策更加理性。从分配方式方面分析,依据产量分配方式下企业的决策更加理性。本文的研究结论解释了排污权有偿分配政策对企业决策的有限理性的影响机制,为排污企业理性进行生产决策和政府进一步完善排污权有偿分配政策提供了理论支持。

其次,本文对排污权有偿分配中的企业有限理性的定量研究表明,排污企业的有限理性参数波动范围大概在52-97之间。这一结论在一定条件下给出了排污企业决策的有限理性参数的取值范围。有限理性放松了纳什均衡完全理性和完全信息的假设,更加符合实际情况。因此,本文的研究为有限理性模型代替纳什均衡对排污企业进行决策分析提供了参数依据。

此外,本文的研究表明在排污权有偿分配政策中,排污权的高价策略及依据产量分配方式能够激励排污企业理性决策。因此,在一定条件下,排污权高价策略以及依据产量分配方式能够更好地发挥排污权有偿分配的资源配置作用,同时兼顾环境效益与经济效益。

本研究的局限性及未来的研究方向:(1)本研究采取的是情境模拟实验的研究方式,为了对现实情况进行抽象,便于实验被试理解实验情境,本文假设排污权的定价方式为高价和低价,所设定的情境与现实中的情境存在一定的差距。在条件允许的情况下,未来将考虑在更加贴近现实的情境设置下进行进一步的探讨。(2)目前运营管理领域的许多问题仍使用纳什均衡研究企业的行为决策,本文在一定条件下给出了企业决策的有限理性参数的取值范围,未来可以考虑利用有限理性模型来研究排污企业的行为决策。

参考文献:

- [1] 金帅,盛昭瀚,杜建国. 转型背景下排污权初始分配机制优化设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2013,23(12):48-56
- [2] 郑君君,王向民,朱德胜,等. 考虑学习速度的小世界网络上排污权拍卖策略演化[J]. 中国管理科学, 2017,25(3):102-110
- [3] Xu X., Zhang W., He P., et al. Production and Pricing Problems in Make-to-order Supply Chain with Cap-and-trade Regulation [J]. Omega, 2017,66(5-6):248-257
- [4] Li S., Gu M. The Effect of Emission Permit Trading with Banking on Firm's Production-inventory Strategies [J]. International Journal of Production Economics, 2012,137(2):304-308
- [5] Wu P., Jin Y., Shi Y., et al. The Impact of Carbon Emission Costs on Manufacturers' Production and Location Decision [J]. International Journal of Production Economics, 2017,193(11):193-206
- [6] Cao K., Xu X., Wu Q., et al. Optimal Production and Carbon Emission Reduction Level under Cap-and-trade and Low Carbon Subsidy Policies [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,167(11):505-513
- [7] Chen Y., Su X., Zhao X. Modeling Bounded Rationality in Capacity Allocation Games with The Quantal Response Equilibrium [J]. Management Science, 2012,58(10):1952-1962



- [8] Cason T. N., Reynolds S. S. Bounded Rationality in Laboratory Bargaining with Asymmetric Information[J]. *Economic Theory*, 2005,25(3):553-574
- [9] Lim N., Ho T. H. Designing Price Contracts for Boundedly Rational Customers: Does The Number of Blocks Matter? [J]. *Marketing Science*, 2007,26(3):312-326
- [10] Su X. Bounded Rationality in Newsvendor Models[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008,10(4):566-589
- [11] Basov S. Monopolistic Screening with Boundedly Rational Consumers[J]. *The Economic Record*, 2009,85(1):29-34
- [12] Simon H. A. A Behavioral Model of Rational Choice[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1955,69(1):99-118
- [13] 曹麒麟,王文轲. 基于有限理性和技术战略的风险投资决策研究[J]. *管理科学学报*, 2015,18(11):25-34
- [14] 陈志松. 前景理论视角下考虑战略顾客行为的供应链协调研究[J]. *管理工程学报*, 2017,31(4):93-100
- [15] 包甜甜,谢新连,孟鹏鹏. 基于前景理论和证据推理的混合直觉模糊决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2017,37(2):460-468
- [16] 宋彪,徐沙沙,丁庆洋. “一带一路”战略下企业合作及政府监管的机会主义行为演化博弈分析[J]. *管理评论*, 2018,30(1):118-125
- [17] 肖振红,刘昂,周文. 网络演化博弈视角下的跨国公司逆向知识转移动态过程研究[J]. *管理评论*, 2017,29(11):159-170
- [18] 郑君君,蔡明,李诚志,等. 决策框架,心理距离对个体间合作行为影响的实验研究[J]. *管理评论*, 2017,29(5):102-109
- [19] 熊冠星,李爱梅,王笑天,等. 员工“薪酬感知域差”与离职决策研究——基于“齐当别”决策模型视角[J]. *管理评论*, 2017,29(9):193-204
- [20] Ubøe J., Andersson J., Jörnsten K., et al. Statistical Testing of Bounded Rationality with Applications to The Newsvendor Model [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017,259(1):251-261
- [21] Liu D., Lv W., Li H., et al. Bargaining Model of Labor Disputes Considering Social Mediation and Bounded Rationality[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017,262(3):1064-1071
- [22] Perles M. A., Maschler M. The Super-additive Solution for The Nash Bargaining Problem[J]. *International Journal of Game Theory*, 1981,10(3-4):163-193
- [23] Karaliopoulos M., Katsikopoulos K., Lambrinos L. Bounded Rationality Can Make Parking Search More Efficient: The Power of Lexicographic Heuristics[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017,101(7):28-50
- [24] Ye H., Yang H. Rational Behavior Adjustment Process with Boundedly Rational User Equilibrium[J]. *Transportation Science*, 2017,51(3):968-980
- [25] 赵爱武,杜建国,关洪军. 基于计算实验的有限理性消费者绿色购买行为[J]. *系统工程理论与实践*, 2015,35(1):95-102
- [26] McKelvey R. D., Palfrey T. R. Quantal Response Equilibria for Normal form Games[J]. *Games and Economic Behavior*, 1995,10(1):6-38
- [27] Ho T. H., Zhang J. Designing Pricing Contracts for Boundedly Rational Customers: Does The Framing of The Fixed Fee Matter? [J]. *Management Science*, 2008,54(4):686-700
- [28] Song Y., Zhao X. A Newsvendor Problem with Boundedly Rational Strategic Customers[J]. *International Journal of Production Research*, 2017,55(1):228-243
- [29] Zhang B., Hofbauer J. Quantal Response Methods for Equilibrium Selection in 2×2 Coordination Games[J]. *Games and Economic Behavior*, 2016,97(3):19-31
- [30] Camerer C., Nunnari S., Palfrey T. R. Quantal Response and Nonequilibrium Beliefs Explain Overbidding in Maximum-value Auctions[J]. *Games and Economic Behavior*, 2016,98(7):243-263
- [31] Goeree J. K., Holt C. A., Smith A. M. An Experimental Examination of The Volunteer's Dilemma[J]. *Games and Economic Behavior*, 2017,102(3):303-315
- [32] Chowdhury S. M., Moffatt P. G. Overbidding and Heterogeneous Behavior in Contest Experiments: A Comment on The Endowment Effect[J]. *Journal of Economic Surveys*, 2017,31(2):572-576
- [33] McKelvey R. D., Palfrey T. R. An Experimental Study of The Centipede Game[J]. *Journal of the Econometric Society*, 1992,60(4):803-836



*Research on Bounded Rationality of Emission-dependent
Enterprises Based on Quantal Response Equilibrium*

Zheng Junjun, Cai Ming, Wang Lu and Wang Xiangmin

(School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: This paper designs the 2×2 experiment to study the bounded rationality of emission-dependent enterprises. By quantitatively characterizing the bounded rationality of emission-dependent enterprises under different paid allocation policies of emission permit and comparatively analyzing them, we draw the following conclusions. The pricing strategy of emission permit affects the bounded rationality of enterprises and decisions under high-price strategy are more rational. Whether the allocation method of emission permit affects the bounded rationality of enterprises relates to the pricing strategy. Under the low-price strategy, decisions under the production-dependent allocation policy are more rational than under the emission-dependent allocation policy, while there is not much difference under the high price strategy. Enterprises with different levels of pollution discharge technology have different degrees of bounded rationality. Enterprises with high levels of pollution discharge technology are more rational under the low-price strategy while enterprises with low levels of pollution discharge technology are more rational under the high-price strategy. The bounded rationality parameters of enterprises fluctuate in the range of 52-97. The research provides theoretical support for the rational and effective decision-making of the emission-dependent enterprises and the further improvement of government policies.

Key words: quantal response equilibrium, paid allocation of emission permit, bounded rationality, experiment