

# 异质发电商竞争下电力市场减排锦标博弈<sup>①</sup>

## ——结构与行为

黄守军<sup>1</sup>, 杨俊<sup>2</sup>

(1. 中山大学岭南(大学)学院, 广州 510275; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

**摘要:** 利用行为经济学理论研究了电力市场中异质发电商竞争下的减排锦标博弈问题, 先后讨论了不同市场与奖金结构下均衡的边际获胜概率及其最优减排努力程度. 从实验经济学角度对理论模型进行了实验检验, 在此基础上将模型拓展到考虑影响发电商减排决策的非金钱因素, 如社会比较的减排锦标模型, 并给出了模型的最优参数估计与均衡预测值. 通过比较分析发现, 在3、4人减排锦标赛中, 针对不同发电主体构成, 增加胜利者奖励数量既不能驱动强者提高也不会迫使弱者降低各自的最优减排量; 无论初始调度禀赋如何, 只要检验实验信息完全公开, 所有发电商均存在过度减排投资行为, 且在双强者单弱者参与情形下, 强势发电商的减排努力水平与获胜者数量正相关关系与标准理论预测相悖; 对参数的约束条件显著降低行为经济学模型拟合度, 其中广义模型均衡预测最契合检验实验的基本特征, 而特定嵌套模型验证理论预测的可行性.

**关键词:** 电力市场; 奖金结构; 异质发电商; 减排锦标; 实验检验; 行为经济学模型

**中图分类号:** TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2017)12-0052-20

## 0 引言

作为世界上排放量最大的国家之一, 中国已向国际社会做出承诺, 到2020年单位国内生产总值碳排放强度比2005年降低40%~45%, 同时将非化石能源在一次能源中的比重提高到15%<sup>[1]</sup>. 为了实现上述战略目标, CO<sub>2</sub>减排已作为硬性约束指标纳入我国“十三五”规划. 从排放结构上看, 电力行业排放大, 增速快, 所占比例逐年上升. 分行业看, 电力行业排放量已接近全国排放总量的50%, 主要由燃煤发电产生. 低碳理念的引入对于电力行业的影响是广泛而深刻的. 在面临巨大减排任务的同时, 又具备显著的减排空间. 因此, 低碳将继安全、经济之后成为电力系统调度

运行中的重要目标之一<sup>[2]</sup>. CO<sub>2</sub>是典型的全球性公共产品, 无法通过自发的市场机制实现配置, 而需引入适度的宏观调控, 由政府制定相应的制度予以规范与引导. 从世界各国的实践看, 主要的制度包括排放交易等市场机制, 低碳电量配额、最低能耗标准、排放指标等约束机制, 碳税、污染税等财税机制, 以及绿色电价等激励机制等<sup>[3]</sup>. 如何通过合理的制度设计, 在深入挖掘电力行业各环节碳排放特性与低碳潜力的基础上, 寻找CO<sub>2</sub>减排成本与效益的均衡, 实现低碳电力与低碳经济的协调发展, 促进我国电力行业的可持续发展, 也将是未来的重要研究方向之一.

政府干预包括有关法规的制定和经济制度的安排. 经济制度具有不可替代的效率作用, 且应针

① 收稿日期: 2015-10-31; 修订日期: 2017-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71373297); 国家社会科学基金重点资助项目(15AZD014); 重庆市研究生科研创新资助项目(CYB14004).

作者简介: 黄守军(1985—), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 特聘副研究员. Email: hsjqy@163.com

对不同情况安排与市场机制相沟通的不同制度形式。在限制 CO<sub>2</sub> 排放中安排有效的经济制度,即要按“排放者付费”、“资源有偿使用”原则,建立与市场经济相适应的利益机制,将减排问题由政府行为转变为由政府调控与经济利益机制驱动相结合的市场行为和企业行为<sup>[4]</sup>。事实上,考虑到中国现有的电源结构和发电技术,引入低碳电力调度(low-carbon generation dispatching, LCGD)几乎是当前电力行业在短期内有效控制碳排放、实施低碳化发展的现实的、必然的和唯一的选择<sup>[5]</sup>。从长远看,即使方兴未艾的低碳技术尚未完全成熟,存在着风险大、成本高以及效果不确定的特点,引入低碳技术也是实现电力行业低碳化发展的关键所在<sup>[6]</sup>。电力行业从物理上主要可以分为发电、输配电和用电等环节。从目前低碳电力技术的研究情况来看,发电侧是低碳化效益比较集中的环节,也是易于入手进行研究的环节。发电侧的研究工作主要包括可再生资源的开发与运行<sup>[7]</sup>、清洁发电技术的利用<sup>[8]</sup>以及碳捕捉与储存技术(carbon capture and storage, CCS)的发展<sup>[9]</sup>等。

在低碳背景下,引进减排技术的独立发电商由于增加了发电成本和风险,使得在机组出力确定中并不具备调度优势,发电机会在一定程度上减少,希望通过政策扶持配合电网公司进行 LCGD, 优先排序发电, 锁定发电量; 与此同时, 低碳出力存在电价相对过高、供应稳定性差的特点, 以致在与边界市场竞争中处于劣势。这样, 电网公司有必要在保证自身售电收益的基础上, 考虑优先调度这些独立发电商的电量。因此, 在不提供任何 CO<sub>2</sub> 减排协调契约下, 即当交易双方之间仅仅发生价格转移时, 二者都具有参与合作利用 LCGD 的动机。已有文献研究了供应链上下游企业合作减排对其运营产生的影响, 如 Caro 等<sup>[10]</sup>通过模型研究发现, 在供应链中存在执法者时, 可以通过强制设定减排上限来实现供应链中成员的最大减排努力; 如果供应链中不存在执法者时, 以减排效率最高的作为支付者可以更加有效地实现供应链的减排目标; Jaber 等<sup>[11]</sup>针对两阶段供应链中制造商和零售商合作减排问题, 通过最优

化制造商的产品生产率及制造商和零售商之间的协调因子, 实现双方库存成本和减排成本的最小化; 李友东等<sup>[12]</sup>分别构建了在三种不同的博弈关系下, 政府对制造商和零售商合作减排投入进行补贴的博弈模型, 分析了企业的最优减排成本投入和政府的最优补贴率, 并进一步讨论了政府补贴行为和企业选择减排合作行为之间的互动博弈; 徐春秋等<sup>[13]</sup>从动态角度结合低碳经济时代供应链的新特征, 研究上下游之间联合减排与低碳宣传问题, 建立上下游之间的微分博弈模型, 并分析了成本分担契约在协调供应链绩效上的条件和效果。由此可见, 目前关于纵向合作减排的研究比较多, 但是对电力市场这方面的研究并不多见, 尤其是将调度低碳化与实验检验相结合来研究的文献则更少<sup>[14-15]</sup>。另一方面, 有研究表明大多数渠道合作模式是不稳定的, 这是因为处于不完全契约的框架下, 双方不可能完全预测到未来的或然事件并将其写入契约安排中。而参与者对双方行为的收益又有着完全理性的预期, 这就使得渠道的任意一方都存在机会主义行为倾向。在探索如何解决下游企业的机会主义行为时, 发现实践中上游企业通常采用让下游企业们互相竞争的管理方式来控制他们的机会主义行为, 其实质就是锦标赛机制。

自 20 世纪 80 年代至今, 锦标赛机制作为基于相对绩效评价的激励策略引起了广泛的研究兴趣。该理论最早是由 Lazear 和 Rosen<sup>[16]</sup>提出, 其基本观点为锦标赛制度提供的激励取决于“成功者”和“失败者”之间的报酬差距, 且最高的报酬水平超过了代理人的生产力。虽然绩效排序并不是团队成员绩效信息的充分统计量, 但是如果各成员产出中的不确定因素是相关的, 锦标赛制度就是有效的<sup>[17]</sup>。同基于边际产出的激励合同相比, 锦标赛具有 3 个潜在的好处, 首先, 薪酬是基于代理人边际产出的相对排序, 而不需要计算出具体的边际产出。边际产出的排序要比准确度量来得简单, 因此可以降低衡量成本; 其次, 薪酬差距可以鼓励基层员工参与排序竞争, 从而提高激励效果, 降低监控的必要性。参赛的员工更关心能否击败对手, 而不仅仅是关注于自身的绝对业绩;

第三,锦标赛机制可以消除共同风险 (common risk) 的影响,有助于对员工的努力水平进行更为准确的评价。目前,锦标赛机制在企业员工薪酬与晋升管理<sup>[18]</sup>、专利与研发竞赛<sup>[19]</sup>以及公共部门与地方官员竞争<sup>[20]</sup>等诸多领域有着广泛应用。此外,经过三十多年的发展,经典锦标赛理论在不同方向上得到了扩展,其中之一就是将代理人异质性(即能力高低不同或者未被一视同仁)纳入研究框架。在代理人同质和异质两种不同的环境框架下,代理人的行为选择有着很大的不同<sup>[21]</sup>。而在现实世界中,大多数竞赛都是在能力不同的竞争者之间进行的,因此非对称锦标赛模型作为锦标赛理论的拓展形式,却更接近于组织管理实际。

现有文献大都集中在能力同质和能力异质情形下代理人努力水平的对比,以及能力分布特征对不同机制优劣的影响上,如文献[22, 23]。鲜有文献对在考虑代理人强弱分布不均匀的情况下,分析锦标赛机制的激励效应,以及给出严格的实证分析或实验检验进行系统研究。而在现实中这些问题就显得至关重要。发电商作为电力市场重要的微观经济主体,同时也是国家推进 CO<sub>2</sub> 减排目标实现的重要落实对象,对其进行政策响应分析很有必要。为此,本文尝试基于政府规制和发电商经济行为原则,分析低碳电力调度和减排锦标赛联合制度下的寡头电力市场系统动态反应和 CO<sub>2</sub> 减排有效性。在前人研究的基础上,将参与者初始市场地位差异作为核心变量,且允许彼此知道与谁竞争以及谁是强者,利用行为经济学理论构建了异质发电商竞争下的减排锦标博弈模型,并推导出不同市场与奖金结构下均衡的边际获胜概率及其最优减排策略;从实验经济学角度对理论模型进行了实验检验,以分析对控制变量与现实数据之间关系描述的有效性;将模型拓展到考虑强者失败心理损失与弱者胜利心理收益的减排锦标模型,并给出了广义模型的最优参数估计与均衡预测值。

与以往研究相比较,本文的创新主要表现在:

1) 在存在两种不同初始调度禀赋的多人减排锦标赛中,验证了奖金结构的改变对参与发电商减排水平影响。如 3、4 人标准减排锦标条件下,作为

大奖金边际增量的理性反应,强者将减少或维持最优减排水平,而弱者将提高或维持均衡减排努力程度,即增加胜者数量既不激励强势发电商提高也不迫使弱势发电商降低各自的减排量; 2) 使用经济实验检验了上述 3 人减排锦标赛的理论预测值。在此实验中,大奖金与强者数量是可变的。与传统做法不同的是,本文允许发电商知道他们是在与谁竞争,并及时公布每轮实验各个决策回合的输赢结果。现有模型减排预测值均低于相应实验对象的实际水平,且当有两个强势发电商参与时,强者的最优减排投入会随着获胜机会的增加而增加,而这与理论预测相反; 3) 为了解释异质发电商出现的过度减排以及强者均衡行为的背离特征,引入考虑参与者社会比较影响效用函数的行为经济学模型。将强势发电商输给弱者和弱势发电商击败强者时的额外效用损失与收益纳入建模,并利用检验实验数据估计出模型的心理参数。对行为无约束条件的广义模型均衡预测最契合实际减排努力程度的变化,而特定嵌套模型则与理论预测相一致。

## 1 理论模型

在寡头电力市场中,为开发发电侧潜在减排空间、实现 CO<sub>2</sub> 减排目标,在联营电力交易中考虑电网公司支持发电商的减排竞争,进行现货市场减排锦标,目的是对发电商给予直接的激励,使其按照电网公司的意图作 CO<sub>2</sub> 减排支出,实现企业利润最大化。在减排锦标中,假设发电商获得的效用是基于相对发电量的函数,即发电商的效用只取决于其在所有参与者中的电量排名,而与发电量的绝对水平或者发电商之间的电量差距大小无关。电网公司依据  $t$  交易时段全部  $n(n \geq 3)$  个独立发电商的调度电量从高至低进行排序,考虑到电能生产函数的凹性,在本文建立的模型中,设发电商  $i$  所属机组的出力为

$$q_i(t) = f(e_i(t)) + \kappa_i(t) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

其中,电能生产函数  $f(\cdot)$  是凹函数;  $e_i(t)$  为非负减排量(即努力程度),且  $e_i(t) \in [0, \bar{e}]$ ,  $\bar{e}$  为发电

商  $i$  的  $\text{CO}_2$  减排水平上限;  $\kappa_i(t)$  为发电商的初始调度禀赋, 受到  $\text{CO}_2$  减排空间、目标市场选择及其需求侧响应与跨期信息反馈等的影响;  $\varepsilon_i(t)$  对每一个发电商而言是独立的随机变量, 且服从定义于共同的有界支持闭集的同连续密度函数, 反映发电商  $i$  无法控制的环境因素对其发电出力的冲击效应。

其他发电商也有类似的生产函数, 在考察时区的任何时段内将面临完全相同的决策问题。采用附加参数  $\kappa_i(t)$ , 而非减排努力的边际收益来刻画发电商的异质性, 因此该变量为发电商  $i$  相比竞争对手  $-i$  的先天减排优势, 并不是发电商  $\text{CO}_2$  减排能力的真实体现。与此相应, 假设在上述减排锦标中仅涉及两类发电商, 一类是占据有利地位的, 而另一类是处于不利地位的, 且分别定义为“强者”和“弱者”。对于前者而言, 即存在  $0 < \kappa_i(t) < 2\alpha$ , 其中  $\alpha$  为环境效应的幅度  $\alpha > 0$ ; 相反, 后者则意味着  $\kappa_i(t) = 0$ 。设参与发电商均是理性的风险中性决策个体, 各自拥有相同形式的效用函数, 且与其减排竞争胜利或失败的结果以及成本投入独立可分, 具体形式如下

$$U(\varpi_i(t), \rho_i(t)) = z(\varpi_i(t)) - c(e_i(t)) \quad (2)$$

其中  $\varpi_i(t)$  为电网公司对发电商  $i$  的非负减排支付;  $z(\cdot)$  为效用, 是关于支付的凹函数,  $c(\cdot)$  为  $\text{CO}_2$  减排成本是关于减排量的凸函数, 且二者在定义域上均为严格单调递增。假设市场规约要求电网公司设置两类共  $n$  个奖金, 也就是说奖金数目与减排锦标赛参与人数相同, 任一发电商都将会获得其中的 1 个。锦标赛的规则如下, 电网公司收到各发电商对每个交易时段的报价数据后, 以此为基础并根据每个时段的负荷需求预测结果确定各发电商的出力。排名在前  $m$  位的发电商均可收获一个大奖金, 称为胜利者奖励 (winning prize)  $\xi(t)$ ; 而剩余发电量相对较小, 即排名后  $n - m$  位的发电商各自只可得到一个小奖金, 定义为失败者补偿 (loser's award)  $\delta(t) \in [0, \xi(t))$ , 且两类奖金额度都包含弥补发电商  $\text{CO}_2$  减排成本以外的生产成本部分。

在这样的锦标赛中, 考虑强势发电商寻求利

用自身享有的相对有利地位赢得  $\xi(t)$ , 且参与者中强者数量  $N_F \geq 1$ 。由此可见, 参数  $\kappa_i(t)$  的存在违反了减排锦标机制的制定者应对所有发电商一视同仁的实施机会公平规则, 折射出电网公司在确定规则的时候, 有意或无意中会 (或被认为很可能会) 对一部分发电商产生政策倾向或偏袒。如文献 [24] 把该种锦标赛定义为含有歧视因子  $\kappa_i(t)$  的不公平锦标赛, 其中参与者如同即时得到各自多时段决策行为的分时段表现反馈一样。然而, 文献 [16] 的研究结论表明在初始差异信息预先完全公布下, 这种异质性的界定可促使竞争制约机制的形成, 进而使得所有个体在 1 个博弈空间里有效地竞争。

一旦给定市场与奖金结构, 发电商  $i$  便基于胜负支付与  $\text{CO}_2$  减排成本权衡分析最优的减排努力程度, 以实现期望效用最大化目标。参与者从一个实数闭合有界集合中选择一个减排量, 这个减排水平除自己外, 任何人都观察不到 (或者观察成本非常大)。发电商选择的减排水平以向量  $e(t) = (e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t))$  表示, 在所有竞争对手  $-i$  的  $\text{CO}_2$  减排量保持不变时, 发电商  $i$  赢得大奖金  $\xi(t)$  的概率记为  $Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))$ , 其中  $e_{-i}(t)$  表示发电商  $i$  的  $n - 1$  个竞争者的减排水平构成的向量, 则其期望效用函数为

$$\begin{aligned} EU_i(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t)) = & Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t)) z_i(\xi(t)) + \\ & [1 - Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))] z_i(\delta(t)) - \\ & c(e_i(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

上述锦标赛模型定义了一个博弈, 策略集合是发电商减排努力选择的可行集, 在此设策略集合是实数上的一个闭合区间。通过合适的限定随机波动的分布和发电商的效用函数, 对涉及的所有  $\text{CO}_2$  减排锦标实验, 将会存在唯一确定的纯策略对称 Nash 均衡。为了实现这一点, 需要确定具体的效用函数、发电出力、波动的随机分布以及奖金结构。本文的研究重点在于考察决策结构对异质发电商减排行为的影响, 暂不考虑减排能力上的差异, 在下文分析中使用的具体模型如下

$$\begin{cases} U(\varpi_i(t), e_i(t)) = \varpi_i(t) - \frac{e_i^2(t)}{2\sigma} \Delta t & (4) \\ \text{s. t. } q_i(t) = e_i(t) + \kappa_i(t) + \varepsilon_i(t) \end{cases}$$

其中,交易时段长度  $\Delta t$  为 1 h;  $\sigma$  为发电商的减排成本,且值为正的影响参数,代表一个电能生产规模尺度因素,用来确保合理的收益.假设其他情况不变,发电商  $i$  和  $j$  的减排成本函数相同,即可认为他们的  $\text{CO}_2$  减排能力也相等;  $\varepsilon_i(t)$  相互独立且都服从区间  $[-\alpha, \alpha]$  上的均匀分布<sup>②</sup>.当  $\kappa_i(t) = \kappa_j(t)$  时,减排锦标规则对参与发电商都是公平的,称之为公平锦标赛;而当  $\kappa_i(t) > \kappa_j(t)$  时,减排锦标规则对发电商  $i$  有利,对发电商  $j$  不利,该锦标赛为不公平锦标赛.至此,  $\text{CO}_2$  减排锦标赛中发电商的期望效用是

$$\begin{aligned} EU_i(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t)) &= \delta(t) + \\ Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t)) &[\xi(t) - \delta(t)] - \\ \frac{e_i^2(t)}{2\sigma} & \end{aligned} \quad (5)$$

以上就是本研究的理论模型描述,所有参数构成一个参数集合,即  $\Gamma = \{\xi(t), \delta(t), \kappa_i(t), \mu(\varepsilon_i(t)), \alpha, \sigma, i = 1, 2, \dots, n\}$ ,其中  $\xi(t), \delta(t), \kappa_i(t), \alpha$  以及  $\sigma$  可由前述各式确定,而  $\mu(\varepsilon_i(t))$  是一个均匀密度分布,决定每一个独立的实现值  $\varepsilon_i(t)$ .本文的分析不考虑发电商之间的同谋,认为发电商各自决策、追求个体期望效用最大化,因此采用  $n$  人非合作博弈模型.设模型中的参数设定满足强、弱发电商减排锦标的参与约束,在式(5)存在的唯一局部纯策略 Nash 均衡处,发电商  $i$  期望效用的一阶条件满足

$$\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)} [\xi(t) - \delta(t)] = \frac{e_i(t)}{\sigma} \quad (6)$$

其中偏导数  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)}$  为发电商  $i$  减排竞争的边际获胜概率,也就是单位减排量增加所引致的获得大奖金  $\xi(t)$  的可能性变化.

对此一阶条件作一个简单解释:式(6)左边是锦标参与者  $\text{CO}_2$  减排的边际效用,等于获胜的边际概率乘以获胜的奖励差距(净支付)  $\xi(t) - \delta(t)$ ;而右边是发电商  $i$  的  $\text{CO}_2$  减排边际成本.虽然在获胜者数量不确定的多人减排锦标中,强、弱勢发电商边际获胜概率  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)}$

的解析解通式不存在,但是对于一个已知参数  $n, N_F$  以及  $m$  的  $\text{CO}_2$  减排锦标赛,可采用数学方法(特别是博弈论方法)推导出  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)}$  的表达式,进而得到该减排竞争的均衡解析解.

## 2 非合作 Nash 均衡策略

在数学上,给定  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)}$

解析式,即可求解出发电商  $i$  均衡的  $\text{CO}_2$  减排量,但其是否为解析解要视情况而定.具体表现为<sup>③</sup>,当  $n = 3$  时,由推导得到参与者的最优减排策略均为一封闭形式(closed-form)的函数;而当  $n \geq 4$  时,解析解的存在性不能一概而论,究其原因在于某些情形下的  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}(e_i(t), e_{-i}(t), \kappa_i(t))}{\partial e_i(t)}$  中高阶多项式增加了模型分析的数学难度,此时则需要借助数值模拟来实现均衡求解.如表 2 所示的 4 人减排锦标赛,其中一强三弱双胜者时的强势发电商的最优减排努力水平就不可解析表出.

作为初步的研究工作,本文仅考虑研究  $n = 3$  和  $n = 4$  两种情形.针对无法完全推导出后者均衡减排量的解析解,也将进行算例分析并以此验证理论预测.表 1 和 2 列出了在所有可能  $N_F$  和  $m$  组合下,强、弱发电商对应的边际获胜概率.全文旨在考察不同发电主体与奖金构成下参与者  $\text{CO}_2$  减排努力程度的变化,期望所得到的相关结

② 随机扰动项实际上代表了生产中的运气成分,大多数锦标赛实验研究均将其设定为服从均匀分布,因为这可以简化均衡值的求解计算过程.据笔者文献检索,目前只有在 Steven 和 Brian<sup>[25]</sup> 及其后续研究中,将随机扰动项设定为服从正态分布,但这样做并不会对研究的核心问题造成实质影响,唯一的不同之处在于此时的均衡值需通过数值模拟的方式才可求得.

③ 由于双寡头发电商减排竞争涵盖在 3 人减排锦标之内,篇幅限制在此不再赘述.

论能为电网公司和发电商在减排锦标预算支出、双方激励规则安排以及选择何种博弈结构等方面的科学决策提供理论依据<sup>④</sup>。

**命题 1** 在 3 或 4 人减排锦标中, 不论发电主体构成如何, 作为增加获胜者数量的政策响应, 既不能激励强势发电商提高也不会迫使弱势发电商降低各自均衡的减排投入。

其证明过程基于 Orrison 等<sup>[26]</sup>的研究方法, 具体逻辑如下, 首先描述在任一既定强者比例和胜利者奖励数量下, 不同发电商 CO<sub>2</sub> 减排边际获胜概率的特征; 然后求解出强、弱势发电商选择的最优减排量。需要说明的是, 在此本文只限于研究上述减排锦标赛参与者每个子组合的纯策略对称 Nash 均衡。

### 2.1 情形 I 3 个发电商参与竞争

**证明 步骤 1** 推导发电商最优的减排边际获胜概率。考虑到当且仅当  $q_i > q_j$  时, 发电商  $i$  的出力排名在竞争对手  $j$  之前。不失一般性, 假设  $e_1 + \kappa_1 \geq e_2 + \kappa_2 \geq e_3 + \kappa_3$ 。给定发电商  $i$  的环境冲击随机实现值为  $\varepsilon_i$ , 则其排序优于  $j$  的充要条件为  $\varepsilon_j < e_i + \kappa_i - e_j - \kappa_j + \varepsilon_i$ 。与此相应, 发电商  $i$  的发电出力大于其竞争对手  $j$  的条件概率由  $\varepsilon_j$  满足上述约束条件的概率决定, 即

$$\begin{aligned} Pr(q_i > q_j | \varepsilon_i) &= \int_{-\alpha}^{e_i + \kappa_i - e_j - \kappa_j + \varepsilon_i} \frac{1}{2\alpha} d\varepsilon_j \\ &= \frac{e_i + \kappa_i - e_j - \kappa_j + \varepsilon_i + \alpha}{2\alpha} \quad (7) \end{aligned}$$

为便于表述, 后文记  $\beta_{ij} = e_i + \kappa_i - e_j - \kappa_j + \alpha$ , 则可以证明实现  $\varepsilon_1 > \beta_{21}$  是发电商 1 排序优于 2 的充分条件, 即后者发生概率为 1。由此, 定义随机实现值区间  $\varepsilon_1 \in [\beta_{21}, \alpha]$  为发电商 1 相对 2 而言的 CO<sub>2</sub> 减排锦标稳赢区间 (sure win interval SWI) 其他任何两个发电商之间以此类推。以下针对不同的胜利者奖励与强者数量, 分别求解对应决策情形下发电商  $i$  减排竞争获胜及其边际获胜概率。

#### 2.1.1 唯一胜者锦标

为在唯一胜者的减排锦标中赢得  $\xi$ , 发电商  $i$  必须力求出力排在其他两个竞争对手之前。通过计算所有可能的  $\varepsilon_i$  对其密度函数  $\frac{1}{2\alpha}$  求积分得到

各个参与者获胜的无条件概率, 则发电商 1 的获胜概率为

$$\begin{aligned} Pr_1^{\text{win}} &= \int_{\beta_{21}}^{\alpha} \frac{1}{2\alpha} d\varepsilon_1 + \int_{\beta_{31}}^{\beta_{21}} \frac{\beta_{12} + \varepsilon_1}{4\alpha^2} d\varepsilon_1 + \\ &\int_{-\alpha}^{\beta_{31}} \frac{(\beta_{12} + \varepsilon_1)(\beta_{13} + \varepsilon_1)}{8\alpha^3} d\varepsilon_1 \quad (8) \end{aligned}$$

其中式 (8) 右边第一项为当  $\varepsilon_1$  位于相对发电商 2 减排稳赢区间  $[\beta_{21}, \alpha]$  内的发电商 1 获胜概率, 在这种情况下, 发电商 1 的出力排序亦优于发电商 3; 式 (8) 右边第二项为当  $\varepsilon_1$  位于相对发电商 3 (但不含发电商 2) 减排稳赢区间  $[\beta_{31}, \beta_{21}]$  内的发电商 1 获胜概率, 此时发电商 1 出力排名在发电商 3 之前, 但不一定优于发电商 2; 最后一项为当  $\varepsilon_1$  太小以至未能位于相对发电商 3 减排稳赢区间内, 即  $\varepsilon_1 \in [-\alpha, \beta_{31}]$  时的发电商 1 获胜概率, 该情况下发电商 1 的出力排序不确定优于任一个竞争对手。发电商 2 的获胜概率可表示为

$$\begin{aligned} Pr_2^{\text{win}} &= \int_{\beta_{32}}^{\alpha} \frac{\beta_{21} + \varepsilon_2}{4\alpha^2} d\varepsilon_2 + \\ &\int_{-\beta_{21}}^{\beta_{32}} \frac{(\beta_{21} + \varepsilon_2)(\beta_{23} + \varepsilon_2)}{8\alpha^3} d\varepsilon_2 \quad (9) \end{aligned}$$

其中式 (8) 右边第一项为当  $\varepsilon_2$  位于相对发电商 3 的减排稳赢区间  $[\beta_{32}, \alpha]$  内的发电商 2 获胜概率, 此时只需击败发电商 1 即可; 第二项为当  $\varepsilon_2$  位于相对发电商 3 的减排稳赢区间外, 即  $\varepsilon_2 \in [-\beta_{21}, \beta_{32}]$  时的发电商 2 获胜概率, 该情况下发电商 2 需要同时击败两个竞争对手。需要注意的是, 只要  $\varepsilon_2$  过小 (换言之  $\varepsilon_2 < -\beta_{21}$ ), 发电商 2 的发电出力就一定排在发电商 1 之后, 即其减排锦标获胜的概率为 0。发电商 3 的获胜概率为

$$Pr_3^{\text{win}} = \int_{-\beta_{31}}^{\alpha} \frac{(\beta_{31} + \varepsilon_3)(\beta_{32} + \varepsilon_3)}{8\alpha^3} d\varepsilon_3 \quad (10)$$

上式反映出除非实现值  $\varepsilon_3$  足够小 (如  $\varepsilon_3 < -\beta_{31}$ ), 否则发电商 3 仍然有机会在发电量排序上优于发电商 1 和 2, 即使其潜在调度出力最小。对式 (8) 一式 (10) 求偏导可得每一个发电商 CO<sub>2</sub> 减排锦标的边际获胜概率。分析可知

1) 当强势发电商数量为 1 时 (将此种情形定义为 1S1W 型比赛, 下同), 设  $\kappa_1 = \kappa > 0, \kappa_2 =$

<sup>④</sup> 为书写方便, 后文部分将省略时间  $t$ 。

$\kappa_3 = 0$  ,即发电商 1 为强者 ,而发电商 2 和发电商 3 均是弱者. 当  $e_2 = e_3 = e_v$  时 ,发电商 2 和发电商 3 在  $\text{CO}_2$  减排竞争中的边际获胜概率相同. 若令  $e_1 = e_s$  ,可得

$$\begin{cases} \frac{\partial Pr_1^{\text{win}}}{\partial e_1} = \frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^3} \\ \frac{\partial Pr_2^{\text{win}}}{\partial e_2} = \frac{\partial Pr_3^{\text{win}}}{\partial e_3} = \frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2} \end{cases} \quad (11)$$

2) 在有两个强势发电商参与的 2S1W 型比赛中 ,假设  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa > 0$  , $\kappa_3 = 0$  ,即发电商 1 和发电商 2 均为强者 ,而发电商 3 是弱者. 同理当  $e_1 = e_2 = e_s$  时 ,发电商 1 和发电商 2 在  $\text{CO}_2$  减排竞争中的边际获胜概率相同. 若记  $e_3 = e_v$  ,则

$$\begin{cases} \frac{\partial Pr_1^{\text{win}}}{\partial e_1} = \frac{\partial Pr_2^{\text{win}}}{\partial e_2} = \frac{1}{2\alpha} \\ \frac{\partial Pr_3^{\text{win}}}{\partial e_3} = \frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.1.2 双胜者锦标

在该种  $\text{CO}_2$  减排锦标赛中 ,对于任意发电商而言 ,只要其调度出力不排在参赛 3 人的最末位 ,即可赢得胜利者奖励. 由此可得 ,发电商 1 获胜的概率为

$$Pr_1^{\text{win}} = 1 - \int_{-\alpha}^{\beta_{31}} \frac{(\beta_{21} - \varepsilon_1)(\beta_{31} - \varepsilon_1)}{8\alpha^3} d\varepsilon_1 \quad (13)$$

上式表明只要实现值  $\varepsilon_1$  不够小 ,如当  $\varepsilon_1 < \beta_{31}$  时 ,发电商 1 的发电出力排名才劣于发电商 2 和发电商 3 ,否则发电商 1 将会赢得一个大奖金  $\xi$  . 发电商 2 获胜的概率可表示为

$$Pr_2^{\text{win}} = \int_{\beta_{32}}^{\alpha} \frac{1}{2\alpha} d\varepsilon_2 + \int_{-\beta_{21}}^{\beta_{32}} \frac{\beta_{21} + \beta_{23} + 2\varepsilon_2 - \frac{(\beta_{21} + \varepsilon_2)(\beta_{23} + \varepsilon_2)}{2\alpha}}{4\alpha^2} d\varepsilon_2 + \int_{-\alpha}^{-\beta_{21}} \frac{\beta_{23} + \varepsilon_2}{4\alpha^2} d\varepsilon_2 \quad (14)$$

其中右边第一项表示当  $\varepsilon_2$  位于相对发电商 3 的减排稳赢区间  $[\beta_{32}, \alpha]$  内的发电商 2 获胜概率 ,且这时获胜的条件概率为 1; 第二项表示当  $\varepsilon_2$  位于相对发电商 3 的减排稳赢区间之外 ,且大于  $-\beta_{21}$

$\beta_{21}$  时的发电商 2 获胜概率. 在这种情况下 ,发电商 2 出力排序优于某一或全部竞争对手; 最后一项表示当  $\varepsilon_2$  较小 ,如小于  $-\beta_{21}$  时的发电商 2 获胜概率 ,此时发电商 2 的出力肯定低于发电商 1 ,但是仍然有机会超过发电商 3. 发电商 3 的获胜概率为

$$Pr_3^{\text{win}} = \int_{-\beta_{31}}^{\alpha} \frac{\beta_{31} + \beta_{32} + 2\varepsilon_3 - \frac{(\beta_{31} + \varepsilon_3)(\beta_{32} + \varepsilon_3)}{2\alpha}}{4\alpha^2} d\varepsilon_3 + \int_{-\beta_{32}}^{-\beta_{31}} \frac{\beta_{32} + \varepsilon_3}{4\alpha^2} d\varepsilon_3 \quad (15)$$

其中右边第一项表示发电商 3 的出力排名位于某一个或全部竞争对手之前的概率 ,因为当  $\varepsilon_3 > -\beta_{31}$  时 ,发电商 3 的出力不一定低于发电商 1; 第二项表示在  $\varepsilon_3$  小于  $-\beta_{31}$  且大于  $-\beta_{32}$  时的发电商 3 获胜概率 ,此时发电商 3 的出力肯定低于发电商 1 ,但是不一定低于发电商 2 ,即其仍然可以击败发电商 2 获得一个大奖金. 而在  $\varepsilon_3 < -\beta_{32}$  的情形下 ,发电商 3 获胜的概率为 0. 类似地 ,由式 (13) ~ 式 (15) 可求解参与发电商  $\text{CO}_2$  减排锦标的边际获胜概率. 分析可知

1) 当强势发电商的数量为 1 时 ,设  $\kappa_1 = \kappa > 0$  , $\kappa_2 = \kappa_3 = 0$  ,即发电商 1 为强者 ,而发电商 2 和发电商 3 均是弱者. 当  $e_2 = e_3 = e_v$  时 ,发电商 2 和发电商 3 在  $\text{CO}_2$  减排竞争中的边际获胜概率相同. 若记  $e_1 = e_s$  ,可得

$$\begin{cases} \frac{\partial Pr_1^{\text{win}}}{\partial e_1} = \frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3} \\ \frac{\partial Pr_2^{\text{win}}}{\partial e_2} = \frac{\partial Pr_3^{\text{win}}}{\partial e_3} = \frac{1}{2\alpha} \end{cases} \quad (16)$$

2) 在有 2 个强势发电商参与的 2S2W 型比赛中 ,假设  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa > 0$  , $\kappa_3 = 0$  ,即发电商 1 和发电商 2 均为强者 ,而发电商 3 是弱者. 同理当  $e_1 = e_2 = e_s$  时 ,发电商 1 和 2 在  $\text{CO}_2$  减排竞争中的边际胜利概率相同. 若令  $e_3 = e_v$  ,则

$$\begin{cases} \frac{\partial Pr_1^{\text{win}}}{\partial e_1} = \frac{\partial Pr_2^{\text{win}}}{\partial e_2} = \frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2} \\ \frac{\partial Pr_3^{\text{win}}}{\partial e_3} = \frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^3} \end{cases} \quad (17)$$

至此, 步骤 1 已经推导出了 3 人减排锦标中所有可能的强、弱势发电商与竞争获胜者数量组合下每个参与者的边际获胜概率, 且解析表达见表 1 所示.

表 1 3 人减排锦标边际获胜概率

Table 1 Marginal probabilities of winning with three participants

			竞争获胜者数量	
			1	2
强势发电商数量	1	强者	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^3}$	$\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3}$
		弱者	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2}$	$\frac{1}{2\alpha}$
	2	强者	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2}$
		弱者	$\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^3}$

步骤 2 推导发电商均衡的减排努力程度. 在给定上述边际获胜概率后, 由不同博弈情形下发电商  $i$  期望效用的一阶条件求解出各自最优的  $\text{CO}_2$  减排量. 在此过程中, 为了保证努力内解的存在, 需对相关参数范围进行限定, 即

$$\begin{cases} 0 < e_{sxy} + \kappa - e_{vxy} < 2\alpha \\ 2\alpha^2 - \sigma\eta > 0 \\ 0 < \kappa < 2\alpha - \frac{\sigma\eta}{2\alpha} \end{cases} \quad (18)$$

其中  $\eta = \xi - \delta \rho_{sxy}$  和  $e_{vxy}$  表示强、弱势发电商的减排水平, 且  $x, y = 1, 2$  分别对应强者和胜利者奖励的数量.

在 1S1W 型锦标中, 求解弱者对  $e_{v11}$  的一阶偏导数并令其等于零, 解之可得

$$e_{v11} = \frac{\sigma\eta(e_{s11} + \kappa - 2\alpha)}{\sigma\eta - 4\alpha^2} \quad (19)$$

而这时强势发电商期望效用的最大化条件为

$$\eta \left[ \frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_{s11} + \kappa - e_{v11})^2}{8\alpha^3} \right] - \frac{e_{s11}}{\sigma} = 0 \quad (20)$$

将式 (19) 代入式 (20), 再结合不等式  $0 < e_{sxy} + \kappa - e_{vxy} < 2\alpha$ , 得到

$$e_{s11}^* = \frac{\left[ (4\alpha^2 - \sigma\eta) \sqrt{16\alpha^4 - 8\sigma\alpha\eta(\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} - 16\alpha^4 + 4\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2 \right]}{4\sigma\alpha\eta} \quad (21)$$

对于 1S2W 型比赛而言, 弱势发电商的一阶

条件为  $\frac{\eta}{2\alpha} - \frac{e_{v12}}{\sigma} = 0$ , 解得  $e_{v12}^* = \frac{\sigma\eta}{2\alpha}$ . 将其代入强者的一阶条件中, 化简整理后得

$$e_{s12}^* = \frac{\left[ -4\alpha^2\sqrt{4\alpha^4 + 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} + 8\alpha^4 + 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2 \right]}{2\sigma\alpha\eta} \quad (22)$$

接下来对此两种决策结构下的均衡结果进行比较分析, 以得到胜利者奖励数量对不同类型发电商  $\text{CO}_2$  减排努力的边际效应. 首先, 对强势发电商来说, 若令  $\Delta e_1 = e_{s11}^* - e_{s12}^*$ , 则由式 (21) 和式 (22) 可知

$$\Delta e_1 = \frac{\left[ (4\alpha^2 - \sigma\eta) \sqrt{16\alpha^4 - 8\sigma\alpha\eta(\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} + 8\alpha^2\sqrt{4\alpha^4 + 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} - 32\alpha^4 - \sigma^2\eta^2 \right]}{4\sigma\alpha\eta} \quad (23)$$

在  $2\alpha^2 - \sigma\eta > 0$  下, 求解关于  $\kappa$  的方程  $\Delta e_1 = 0$  易知存在一个零解. 这与现有研究文献, 如文献 [26] 的研究结果相一致, 表明当所有  $\text{CO}_2$  减排参与者都是同质发电商, 即  $\kappa_l = 0$  时, 无论竞争获胜者数量如何, 强、弱发电商的减排投入都将相同. 另外一个非零解为

$$\kappa_{II} = \frac{4 \left[ 256\alpha^7(2\alpha^2 - \sigma\eta) + 8\sigma^2\alpha^3\eta^2(6\alpha^2 - \sigma\eta) + \sigma^4\alpha\eta^4 \right]}{(32\alpha^4 - 8\sigma\alpha^2\eta + \sigma^2\eta^2)^2} \quad (24)$$

不难看出, 此解在  $2\alpha^2 - \sigma\eta > 0$  下恒为正, 且大于  $\kappa$  的取值上限  $2\alpha - \frac{\sigma\eta}{2\alpha}$ . 进一步地, 由  $\Delta e_1$  对  $\kappa$  的

二阶偏导数恒为负,可以证明其在区间  $(0, \kappa_{III})$  上是关于初始调度禀赋  $\kappa$  的严格凹函数,且函数值恒为正. 这意味着强者在 1S1W 型锦标中的 CO<sub>2</sub> 减排投入要大于在 1S2W 型锦标中的减排投入,即  $e_{s11}^* > e_{s12}^*$ . 相反,弱者在 1S1W 型比赛中的边际获胜概率一定小于在 1S2W 型比赛中的边际获胜概率,与此相应  $e_{v11}^* < e_{v12}^*$ .

在 2S1W 型锦标中,强势发电商的一阶条件为  $\frac{\eta}{2\alpha} - \frac{e_{s21}}{\sigma} = 0$ ,解之可得  $e_{s21} = \frac{\sigma\eta}{2\alpha}$ . 将其代入弱势发电商的一阶条件中,得

$$e_{v21}^* = \frac{\left[ -4\alpha^2\sqrt{4\alpha^4 - 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} + 8\alpha^4 - 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2 \right]}{2\sigma\alpha\eta} \quad (25)$$

对于 2S2W 型减排锦标而言,求解强者对  $e_{s22}$  的一阶偏导数并令其等于零,解之可得

$$e_{s22} = \frac{\sigma\eta(e_{v22} - \kappa + 2\alpha)}{4\alpha^2 + \sigma\eta} \quad (26)$$

将上式代入弱者期望效用的一阶条件中,合并化简得到

$$e_{v22}^* = \frac{\left[ (4\alpha^2 + \sigma\eta)\sqrt{16\alpha^4 - 8\sigma\alpha\eta(\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} - 16\alpha^4 - 4\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2 \right]}{4\sigma\alpha\eta} \quad (27)$$

同样,对比分析此两种博弈情形下弱势发电商均衡的 CO<sub>2</sub> 减排努力水平,若令  $\Delta e_2 = e_{v21}^* - e_{v22}^*$  表示二者之间的差异,则有

$$\Delta e_2 = \frac{\left[ (4\alpha^2 + \sigma\eta)\sqrt{16\alpha^4 - 8\sigma\alpha\eta(\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} + 8\alpha^2\sqrt{4\alpha^4 + 2\sigma\alpha\eta(2\alpha - \kappa) + \sigma^2\eta^2} - 32\alpha^4 - \sigma^2\eta^2 \right]}{4\sigma\alpha\eta} \quad (28)$$

类似地,求解关于  $\kappa$  的方程  $\Delta e_2 = 0$ ,除存在一个零解  $\kappa_{III} = 0$  外,另外一个非零解为

$$\kappa_{IV} = \frac{4\left[ 256\alpha^7(2\alpha^2 + \sigma\eta) + 8\sigma^2\alpha^3\eta^2(6\alpha^2 + \sigma\eta) + \sigma^4\alpha\eta^4 \right]}{(32\alpha^4 + 8\sigma\alpha^2\eta + \sigma^2\eta^2)^2} \quad (29)$$

由此可见,此解亦大于  $\kappa$  的取值上限  $2\alpha - \frac{\sigma\eta}{2\alpha}$ . 另外,计算  $\Delta e_2$  对  $\kappa$  的二阶偏导数恒为正,表明其在区间  $(0, \kappa_{IV})$  上是关于初始调度禀赋  $\kappa$  的严格凸函数,且函数值恒为负. 也就是说弱势发电商在 2S1W 型锦标中的 CO<sub>2</sub> 最优减排量要小于在 2S2W 型锦标中的均衡减排量,即  $e_{v21}^* < e_{v22}^*$ . 另一方面,对强者来说,在 2S1W 型锦标中的边际获胜概率一定大于在 2S2W 型锦标中的边际获胜概率,则相应地  $e_{s21}^* > e_{s22}^*$ .

以上研究揭示了在 3 人减排锦标中,不论市场结构如何,作为电网公司增加胜利者奖励数量的理性响应,弱势发电商会增加 CO<sub>2</sub> 减排投入,而强势发电商则将削减相应投入.

### 2.2 情形 II 4 个发电商参与竞争

证明 步骤 1 推导均衡的边际获胜概率. 其证明过程与 2.1.1 和 2.1.2 部分类似,限于篇幅省略其证明. 为此,仅在表 2 中列出了边际获胜概率的解析表达式.

步骤 2 推导最优的减排努力程度. 正如前文所述,在该种情形下 CO<sub>2</sub> 减排水平并非一直都可以解析求解,笔者进行了大量的数值模拟以验证命题 1 的研究结论并将其推广至  $n \geq 5$  情形. 图 2 仅给出了其中一个典型算例仿真结果.

可以看出,在单强者减排锦标中,边际获胜概率  $\frac{\partial P_i^{\text{win}}}{\partial e_i}$  解析式所含高阶多项式增加了模型分析与求解的数学难度,使得强势发电商的均衡减排努力不存在封闭形式解. 为进一步分析,将其诉诸于广泛的数值模拟,发现竞争获胜者数量从 1 增加到 2,然后再至 3,强者的最优 CO<sub>2</sub> 减排量依次降低,即  $e_{s11}^x > e_{s12}^x > e_{s13}^x$ ; 而对于弱者而言,直接比较分析出其不会因此而减小均衡的减排投入. 因为在确保减排决策内解存在的假设下,弱者在 1S1W 型比赛中的边际获胜概率要小于在 1S2W 型比赛中的边际获胜概率. 与此相应,弱势发电商 CO<sub>2</sub> 减排努力程度的大小比较为  $e_{v11}^x < e_{v12}^x$ . 而当竞争获胜者数量为 2 或者 3 时,弱者的边际获胜概率均为  $\frac{1}{2\alpha}$ ,以致于其在此两种博弈结构下选择的均衡减排量相同,即  $e_{v12}^x = e_{v13}^x$ .

表 2 4 人减排锦标边际获胜概率  
Table 2 Marginal probabilities of winning with four participants

			竞争获胜者数量		
			1	2	3
强势发电商数量	1	强者	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^3}{16\alpha^4}$	$\frac{1}{2\alpha} + \frac{(e_s + \kappa - e_v - 3\alpha)(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^4}$	$-\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^3}{16\alpha^4}$
		弱者	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2}$	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{2\alpha}$
	2	强者	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{\kappa^2}{8\alpha^3}$	$\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3}$
		弱者	$\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^2}{8\alpha^3}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{\kappa^2}{8\alpha^3}$	$\frac{1}{2\alpha}$
	3	强者	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{e_s + \kappa - e_v}{4\alpha^2}$
		弱者	$-\frac{(e_s + \kappa - e_v - 2\alpha)^3}{16\alpha^4}$	$\frac{1}{2\alpha} + \frac{(e_s + \kappa - e_v - 3\alpha)(e_s + \kappa - e_v)^2}{8\alpha^4}$	$\frac{1}{2\alpha} - \frac{(e_s + \kappa - e_v)^3}{16\alpha^4}$

而在双强势发电商参与情形下,当获胜者数量从 1 增加到 2 时,由强者的减排竞争边际获胜概率减小可得 CO<sub>2</sub> 减排努力水平降低,也就是说  $e_{s21}^x > e_{s22}^x$ . 通过对 2S2W 和 2S3W 型比赛中强势发电商均衡减排量作差,分析获胜者数量从 2 增加到 3 时强者的减排努力程度变化,且可计算该差值对初始禀赋  $\kappa$  的二阶偏导数恒为负. 除此以外,对比上述 2S3W 与  $n = 3$  时的 1S2W 型比赛,发现强、弱势发电商的 CO<sub>2</sub> 减排边际获胜概率均相等,这意味着 4 人 2S3W 和 3 人 1S2W 型比赛中同类型参与者的减排努力水平分别相当. 考虑到  $n = 3$  这一情形,强者在 1S1W 型比赛中的最优减排投入要大于在 1S2W 型比赛中的相应值,因此只需要再证明  $n = 4$  的 2S2W 型比赛中强势发电商均衡的 CO<sub>2</sub> 减排量大于  $n = 3$  的 1S1W 型比赛中最优取值,即可验证命题 1 中的结论. 对比 3 人 1S1W 型比赛中强、弱者减排竞争的边际获胜概率  $\frac{\partial P_i^{\text{win}}}{\partial e_i}$ ,可以得到在约束条件式(20)下,强势发电商的减排努力程度高于弱势发电商,即  $e_{s11}^* > e_{v11}^*$ . 在此基础上,比较分析  $n = 4$  的 2S2W 和  $n = 3$  的 1S1W 型比赛中强者的 CO<sub>2</sub> 减排边际获胜概率,从而证明 4 人 2S2W 型比赛中强势发电商的最优减排投入大于 3 人 1S1W 和 4 人 2S3W 此两种类型比赛下的强者均衡减排投入.

接下来考察获胜者数量对弱者减排努力水平的边际效应. 由表 2 中 2S1W 型比赛中的边际获胜概率可知,强势发电商在该博弈情形下的减排努力程度高于弱者,即  $e_{s21}^x > e_{v21}^x$ . 另外,由此可以证明弱势发电商在  $n = 4$  的 2S2W 型比赛下的均

衡减排投入大于 2S1W 型比赛中的最优策略值,即  $e_{s22}^x > e_{v21}^x$ . 而当胜利者奖励数量从 2 增加到 3 时,易知弱者的减排边际获胜概率增大. 与此相应,弱势发电商均衡的减排努力程度将随之提高.

在 3 个强者的减排锦标中,当比赛获胜者数量从 1 增加到 2 时,由于强势发电商 CO<sub>2</sub> 减排竞争的边际获胜概率均为  $\frac{1}{2\alpha}$ ,则其最优减排投入维持不变,也就是说  $e_{s31}^x = e_{s32}^x$ ; 而当竞争获胜者数量从 2 增加到 3 时,强者的边际获胜概率反而减小,这使得其在 3S2W 型比赛中的均衡 CO<sub>2</sub> 减排量要大于 3S3W 型比赛下的减排量,即  $e_{s32}^x > e_{s33}^x$ . 但是,此时无法解析表出弱势发电商减排努力水平,更不能分析竞争获胜者数量对其的影响. 为此笔者同样进行了大量的数值模拟,以求解此种情形下弱者最优的 CO<sub>2</sub> 减排努力程度. 研究结果表明,此时弱势发电商的减排投入与获胜者数量正相关,即可以采用调整锦标奖金结构,达到激励弱者均衡减排支出目的.

### 3 均衡分析

命题 1 表明虽然减排锦标赛胜者数量增加可以提高所有发电商的获胜概率,但是此因素对强、弱者的减排行为的影响效果是存在差异的,因为边际获胜概率才是最终决定参与者均衡减排量的关键参数. 本部分试图对上述结果背后的变量逻辑关系进行解释,算例仿真表明了本文给出的减排锦标理论模型的基本特征.

首先描述强者的最优减排行为,当强势发电

商数量  $N_F$  小于或等于获胜者数量  $m$  ,即锦标规则设置了足够的胜利名额有待强者去竞争. 在这种情况下, 增加大奖金数量会削弱强者提高  $CO_2$  减排投入对其边际获胜概率的影响, 即  $\frac{\partial Pr_i^{win}}{\partial e_i}$  减小, 且强者本已具有初始禀赋  $\kappa_i$  的竞争优势, 从而会降低均衡减排努力水平; 另一方面, 当强势发电商数量大于胜者数量时, 表明至少要有有一个强者会在锦标机制中失败. 在这种情况下, 强势发电商如同仅与其他强者竞争一样, 所以各自均衡的  $CO_2$  减排努力程度与强者组成的同质发电商锦标最优值相同. 当胜利者奖励数量增加到  $m + 1$  时, 如果强势发电商数量与之相等, 则同样有足够的大奖金名额让强者去争取, 因此相应地选择降低减排努力水平. 但是在  $n = 4$  下当  $N_F > m + 1$  时, 强势发电商的减排努力并没有下降, 因为他们仍然要与其他强者进行公平锦标博弈(表2中三个强势发电商参与的  $CO_2$  减排锦标情形, 当获胜者数量从1增加到2时, 强势发电商减排的边际获胜概率保持  $\frac{1}{2\alpha}$  不变). 综上所述, 强者将减少或维持各自减排水平, 即锦标赛大奖金数量的增加不会提高其减排投入.

接着对不同决策结构下弱势发电商的均衡减排行为进行比较分析, 当胜者数量  $m$  小于或等于强者数量  $N_F$  时, 所有弱势发电商都有可能在锦标博弈中失败, 除非他们在  $CO_2$  减排竞争中做得比强者更好. 在这种情况下, 引入更多的大奖金指标会提高弱势发电商通过投入减排成本而取得胜利的概率(即  $\frac{\partial Pr_i^{win}}{\partial e_i}$  增大), 进而导致弱者相应地增加其均衡的  $CO_2$  减排量; 与之相反, 当获胜者数量大于强势发电商数量时, 说明至少有一个弱者将会在减排锦标中胜出. 此时, 增加胜利者奖励数量必然带来更多的弱势发电商击败对手, 但  $CO_2$  减排努力水平不会进一步提高<sup>⑤</sup>. 在4人锦标模型中, 当仅有唯一强者参与且胜者数量从2增加到3时即属于后一种情形. 如表2的1S2W和1S3W型比赛中弱者减排的边际获胜概率均为  $\frac{1}{2\alpha}$ , 所以此种情况下弱势发电商将选择维持  $CO_2$

减排投入不变. 类似地, 当所设置的大奖金数量足以让弱者去竞争, 即  $N_F > n - m$  时, 弱势发电商如同仅在与其他弱者进行竞争一样, 所以最优的减排量与弱者组成的同质发电商锦标均衡相同. 总之, 弱势发电商将提高或维持各自减排努力程度, 也就是说增加胜利者奖励数量不会降低其减排水平.

在给定参数值  $\xi = 2.5, \delta = 1.3, \alpha = 90, \kappa = 40$  以及  $\sigma = 5000$  下, 图1和图2分别列出了3人、4人  $CO_2$  减排锦标中不同发电商均衡减排水平的理论预测值. 值得注意的是, 当满足  $N_F \leq m + 1$  约束时, 作为对获胜者数量增加的反应, 强势发电商总是会降低其最优减排努力程度. 否则, 强者会选择维持减排量, 这可从图2中强势发电商数量为3时的最左边两个策略点看出; 与此同时, 随着锦标赛大奖金名额的增加, 弱势发电商会提高其均衡减排水平, 除非至少其中之一是肯定会获胜的, 如图2中强势发电商数量为1时的最右边两个策略点所示. 另外, 针对  $n = 5$  和  $n = 6$  的数值模拟表明命题1可拓展至超过4个发电商参与的锦标赛情形, 限于篇幅, 从略.

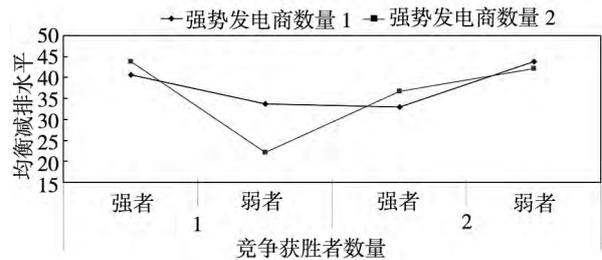


图1 3人锦标理论最优减排策略  
Fig. 1 Optimal mitigation strategies in theory with three participants

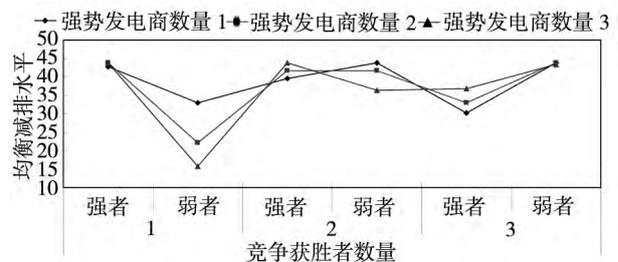


图2 4人锦标理论最优减排策略  
Fig. 2 Optimal mitigation strategies in theory with four participants  
至此, 理论建模与均衡分析揭示对管理者电

⑤ Orriison 等<sup>[26]</sup> 从理论上证明了在多人同质锦标赛中, 增加获胜者数量不会改变参与者的最优努力水平. 当本文所研究的强、弱势发电商只是在各自同类竞争对手中进行减排竞争时, 可得与前者相一致的研究结论.

网公司而言, 异质型发电商竞争下多人减排锦标赛的最优奖金结构如何设置, 是决定减排激励成功与否的关键性问题, 因为改变胜者数量务必要考虑到该行为可能会导致强势发电商均衡减排水平下降以及弱势发电商减排努力程度上升的结果, 且涉及二者的权衡问题. 在下一节中本文将进行实验经济学研究, 以检验在获胜者数量增加的情形下, 参与发电商减排决策如何变化的理论预测与实验结果是否一致.

## 4 检验实验设计

本节旨在对在所研究异质发电商竞争下的 3 人减排锦标中, 大奖金数量的变化如何影响参与者减排策略进行实验检验. 与此相应, 将形成一个  $2 \times 2$  的实验设计, 即强势发电商和减排获胜者数量分别为 1 或 2, 其中强、弱者  $\text{CO}_2$  减排的控制变量及其它参数定义如前. 由命题 1 可知, 在该种决策情形下, 胜者数量从 1 增加至 2 理论上预期将会降低强势发电商的减排水平, 同时提高弱者的减排努力程度. 基于以上分析, 提出如下假设.

假设 1 在有 1 个强势和 2 个弱势发电商参与的减排锦标中, 增加大奖金数量将会降低强者的最优减排量, 即  $e_{s11}^* > e_{s12}^*$ .

假设 2 在有 2 个强势和 1 个弱势发电商参与的减排锦标中, 增加大奖金数量也会降低强者的均衡减排量, 即  $e_{s21}^* > e_{s22}^*$ .

假设 3 在 1S2W 型减排锦标中, 增加胜利者奖励数量将会提高弱势发电商的最优减排水平, 即  $e_{r11}^* < e_{r12}^*$ .

假设 4 在 2S1W 型减排锦标中, 增加胜利者奖励数量将会提高弱势发电商的均衡减排水平, 即  $e_{r21}^* < e_{r22}^*$ .

在所设计的检验实验每一决策回合中, 均沿用上节强、弱势发电商  $\text{CO}_2$  减排理论预测算例分析中的参数值. 针对上述四个假设, 分别进行 3 或 4 轮实验, 总共有 40 名实验对象参加了实验, 全部为重庆大学经济与工商管理学院工商管理专业 (按一级学科招生) 2014 级硕士生, 每轮实验需从中选 8 名、10 名或 12 名作为备选对象. 在实验中用大学本科或研究生作为主要参与者遭到了实验经济学批评者的疑义, 已经有一些实验从真实市场中

招募参与实验的行为决策者. 如文献 [27, 28] 中的实验等. 得出的结论是这些参与人的决策与学生做出的决策相比并不存在显著差异, 而后者作为实验对象的费用要远远低于前者. 另外, Fehr 和 Fischbacher<sup>[29]</sup> 更是认为, 高年级本科生或低年级硕士生是最合适的经济管理类实验参与主体, 因为一方面他们了解相关理论背景, 能够很好的理解实验逻辑; 另一方面他们又不像社会实践者那样具有很强的思维定势, 容易实现与实验主题的行动一致性. 因此, 目前国际上绝大部分经济管理类实验都是用高年级本科或低年级研究生作为参与主体. 实验过程设计在很大程度上是基于现有的锦标实验研究, 如文献 [30, 31] 等. 不同之处在于, 本文期望构建一个更接近现实中多数锦标赛的社会环境.

根据实验设计需要, 参与发电商均会被告知将和另外两家进行减排竞争. 其中 1 个发电商或 2 个发电商被随机选为强者, 强弱之间唯一区别就是强势发电商在调度电量上表现出比弱势对手高 40 个单位. 一旦强者地位确定, 将在该轮所有 5 个回合中保持不变. 在检验实验中, 仍然设胜利者奖励  $\xi = 2.5$  元, 失败者补偿  $\delta = 1.3$  元. 发电商  $i$  的  $\text{CO}_2$  减排成本函数为  $c(e_i) = \frac{e_i^2}{10\,000} \Delta t$ , 其中减排努力水平上限为  $\bar{e} = 90$ . 各自的目标都是基于赛事规则进行减排量决策, 即选择  $e_i$  值. 发电商按要求将减排策略输入计算机程序, 在此步骤后, 系统将自动生成一个随机实现值  $\varepsilon_i$ . 假设服从区间  $[-80, 80]$  上的均匀分布, 即在此范围内的每个随机数值均有同等机会被抽中. 最后, 计算机将  $e_i$  和  $\varepsilon_i$  导入  $q_i$  生成发电商  $i$  的出力, 并据此给出全部高低排序.

整个实验实施过程借用 z-Tree 软件完成, 这里不介绍软件细节, 可直接参阅文献 [32]. 首先, 组织者从备选实验对象中随机选取 3 人参赛组和分配初始禀赋值, 并公开所有分组结果与强势发电商身份, 使得彼此明白与谁竞争以及谁是强者; 接着, 所有小组按次序进行锦标决策, 其中同组成员及其所使用的计算机彼此严格隔离. 此外, 要求现场保持安静, 不发出任何影响决策的信号; 在各自减排策略制定并提交后, 输出屏上将显示出每一回合各个发电商的随机实现值、 $\text{CO}_2$  减排量、

出力排名以及胜负关系;最后,组织者进行数据核实并对在场的发电商宣布该回合谁输谁赢.正式实验开始前,先进行一回合练习赛,以熟悉锦标规则.实验结束时,组织者按博弈结果支付发电商并引导离场.

**命题 2** 与理论模型预测相比,在完全信息检验实验中,异质发电商的平均减排努力程度均得到显著提高,且当有两个强者参与竞争时,强势发电商的减排投入会随着大奖金数量的增加而增加.

**证明** 实验共计产生 168 条数据记录,但经过初步分析,发现有些数据明显不合常理,且前后矛盾.这可能是由于极少数发电商没有完全理解实验原理或在实验过程中不负责任的随意决策造成的,故对这一部分数据予以剔除.最终有效实验数据记录为 143 条,其中标记为 1S1W 型 27 条,1S2W 型 49 条,2S1W 型 35 条,以及 2S2W 型 32 条.由表 5 可知,在前两种类型比赛中,强者的实际平均减排量分别为 62.38 和 44.02;而在强势发电商数量为 2 的情形下,强者的平均 CO<sub>2</sub> 减

排量随着获胜者数量的增加由 50.41 增加至 61.93.与此相应,弱者在 1S1W 和 1S2W 型比赛中的实际平均减排努力程度分别为 44.11 和 57.52,而在后两种博弈结构下,增加大奖金数量使得弱势发电商的平均减排水平由 41.59 增加到 63.37.在进行假设统计检验之前,通过对比分析强、弱发电商在实验前三回合和后两回合的 CO<sub>2</sub> 减排量,以检验其潜在的决策学习程度,发现并不存在显著学习趋势.这一结论对任一回合中不同轮次的数据处理同样成立.考虑到实验中发电商要多回合减排决策,故对数据统计检验的标准误差进行聚类分析,并基于此解释其潜在的内相关性.为此,首先检验发电商的平均减排水平与理论模型均衡预测值之间的差异,相关结果亦见表 3. *t* 检验输出结果表明发电商 CO<sub>2</sub> 减排量的实验均值与理论模型均衡预测之间的差异有统计学意义.结合本例,无论初始调度禀赋如何强、弱者均会选择过度减排投资行为,以致各自的实际平均减排努力程度显著高于理论预测值.

表 3 理论预测与实验数据 *t* 检验结果

Table 3 T-test results of theoretical predictions and experimental data

			竞争获胜者数量			
			1		2	
			强者	弱者	强者	弱者
强势发电商数量	1	理论预测	40.69	33.67	32.95	43.75
		检验实验平均减排量	62.38( 17.96)	44.11( 28.69)	44.02( 25.37)	57.52( 22.14)
		<i>t</i> 统计量观察值	8.33	2.24	2.70	5.01
		<i>p</i> 值	0	0.037	0.015	0
	2	理论预测	43.75	22.15	36.64	42.22
		检验实验平均减排量	50.41( 23.28)	41.59( 22.93)	61.93( 26.71)	63.37( 21.76)
		<i>t</i> 统计量观察值	2.19	5.82	6.20	4.71
		<i>p</i> 值	0.038	0	0	0.001

注: 括号中的数值为减排量的标准差; 显著水平为 0.05,下同.

接着正式执行对假设的检验工作,表 4 列出了上述 3 人锦标中发电商减排水平对胜者数量的普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS) 回归分析结果<sup>⑥</sup>.假设 1 和 2 都预计随着获胜者数量增加,强者的均衡减排量将会减小.系数估计表明,在单一强者参与情形下,相比而言 1S2W 型比

赛中强势发电商的减排努力程度确实较低,即意味接受原假设 1;而在双强者减排锦标赛中,大奖金边际增量的引入会致使强势发电商增加减排投资.这与理论预测相悖,据此则拒绝原假设 2.假设 3 和 4 均预测增加锦标赛胜者数量后,弱者的最优减排量将会提高,且得到检验实验数据支

⑥ 为了更直观地利用回归模型进行假设检验,在此以同一市场结构下的唯一胜者锦标为基准(即可视为常数项),而将对应的双胜者锦标为虚拟比较情形.

持: 弱势发电商在 1S2W 型比赛的减排水平显著高于在 1S1W 情形下的数值, 与此同时弱者在 2S2W 型比赛中的减排投资较大. 也就是说, 对

弱势发电商而言, 无论选择何种博弈结构, 其减排努力程度都将与大奖金数量正相关, 故接受原假设 3 和原假设 4.

表 4 发电商减排水平对胜者数量 OLS 回归结果

Table 4 OLS regression results of mitigation levels on number of winners

		竞争获胜者数量				
		1		2		
		强者	弱者	强者	弱者	
强势发电商数量	1	系数	62.38(2.801)	44.11(4.932)	-18.36(5.216)	13.41(5.733)
		t 统计量观察值	19.75	7.29	-3.72	2.47
		p 值	0	0	0.001	0.016
	2	系数	50.41(3.267)	41.59(3.598)	11.52(5.439)	21.78(6.036)
		t 统计量观察值	13.09	9.26	2.24	3.81
		p 值	0	0	0.030	0.001

注: 括号中的数值为系数估计的稳健标准误差.

基于以上分析, 可以得出虽然理论模型可以正确地预测减排锦标奖金结构变化下弱者 CO<sub>2</sub> 减排的指向性努力响应 (directional effort response), 但是对强者减排量的理性反应该模型并不能完全予以体现. 具体而言, 在双强势发电商参与竞争情形下, 理论模型无法预计到获胜者数量增加时强者会选择提高减排水平. 另外, 现有模型 CO<sub>2</sub> 减排预测值均低于相应实验对象的实际水平. 为此, 在下一节中将对理论模型进行拓展, 考虑减排锦标中由于参与者社会比较 (social comparison) 形成的强者失败心理损失与弱者胜利心理收益. 通过比较分析发现这种广义模型可以更有效地描述控制变量与实验数据之间的关系.

### 5 模型拓展

在相关研究中, 文献 [33, 34] 考虑了参与者最优决策时进行社会比较, 分析得到此时改变锦标赛所处社会环境将会引起实际博弈均衡偏离原始理论预测值. 基于此, 笔者提出构建社会性关系以使发电商之间的 CO<sub>2</sub> 减排竞争更加贴近于现实<sup>⑦</sup>. 作为理论模型的扩展, 这一节尝试考虑非金钱因素影响参与者效用下的减排锦标模型. 在模型中, 发电商为异质性独立主体, 且相互清楚与谁

竞争以及每轮实验中谁赢谁输. 假设除了考虑从 CO<sub>2</sub> 减排锦标中获得的不同奖金支付之外, 发电商还会在意彼此之间的社会比较, 即在主观意识上如何感知相对于其他竞争对手的减排胜利或失败<sup>⑧</sup>. 此外, 与异质发电商相应, 下文建模中允许存在强、弱者对博弈结果评定的差异性.

命题 3 在考虑发电商减排决策社会比较的拓展模型中, 对行为参数均为正的无约束条件广义模型均衡预测最契合检验实验数据的基本特征, 而特定嵌套模型验证理论预测的可行性.

证明 对于强势发电商而言, 本文设其认为自己理应与其他强者 (胜者数量限定内) 一起在 CO<sub>2</sub> 减排竞争中获胜. 因此, 获得大奖金不能给强势发电商带来任何额外的心理效用收益; 但是, 失败一定会使其遭受心理上的效用损失, 因为强者都期望可以最终获胜. 当得知是弱势发电商击败自己时, 强者所感受到的由失败引发的心理效用损失将进一步加剧. 具体而言, 强势发电商 CO<sub>2</sub> 减排竞争胜利、失败的广义效用函数分别为

$$u_{sxy}^{win} = \xi \mu_{sxy}^{lose} = \delta - (\rho + \lambda_s)(\xi - \delta) \quad (30)$$

其中  $\rho$  为大于零的常数, 表示强者在减排锦标中失败的心理负效用因子;  $\lambda_s$  为强势发电商输给弱者时的额外效用损失率, 而当并非确定是输给弱

⑦ 但是不可否认, 即使在上节标准实验条件下检验理论模型最优解也有助于分析发电商减排锦标行为.

⑧ 在此, 笔者排除风险规避的模型拓展路径, 是因为在前文理论模型中增加参与者的风险厌恶参数, 发电商的均衡减排量将系统性地低于风险中性预测值, 进而得到与命题 1 相同的研究结果. 究其原因, 是风险规避削弱了减排竞争输赢对每个参与者的效用差距, 从而降低发电商的最优减排努力程度.

势发电商时,该参数就不存在,即  $\lambda_s = 0$ . 例如在  $n = 3$  的 1S1W 型比赛中,如果强势发电商竞争失败,那么必然是输给了两个弱者中的一个,则  $\rho$  和  $\lambda_s$  均存在. 但是,在 3 人 2S1W 型比赛中,同样是强势发电商失败的话,其有可能且主观上也期望是输给另一个强者而不是弱者,则参数  $\lambda_s = 0$ , 只有  $\rho$  是存在的.

上式表明,强者失败时的心理效用损失还取决于其参与减排锦标输赢的奖励差距,这也是建立强势发电商效用拓展模型的一个合理假设. 表 5 列出了 3 人减排锦标赛的所有 4 种情形下强者的效用函数解析式. 另一方面,由于在  $\text{CO}_2$  减排竞争初始禀赋上的劣势,假设弱势发电商事前预期且能够坦然接受在锦标赛中失败的结局,所以即使这样也不会给其带来任何心理上的负效用. 但是,弱者一旦赢得大奖金将会获得额外的心理

效用收益,因为此博弈结果违背了竞争获胜的理论概率. 当弱者知道是通过击败强势发电商获得胜利时,该心理效用收益增大. 与此相应,弱势发电商  $\text{CO}_2$  减排锦标效用函数如下所示

$$u_{ixy}^{\text{win}} = \xi + (\varphi + \lambda_v)(\xi - \delta) \quad u_{ixy}^{\text{lose}} = \delta \quad (31)$$

其中参数  $\varphi > 0$  表示弱者减排竞争获胜的心理正效用因子;  $\lambda_v$  为弱势发电商击败强者时的额外效用收益率,而当其并非一定是通过击败强势发电商获胜时,参数  $\lambda_v$  就变得不存在. 同样考虑  $n = 3$  在 1S1W 情形下,一个弱势发电商必须通过击败强者才可以取得胜利,则  $\varphi$  和  $\lambda_v$  均存在; 但是在 3 人 1S2W 型比赛中,弱势发电商在心理上期望强者将会占据一个胜者名额,所以认为不必非要击败强者. 在此情形下,参数  $\lambda_v = 0$ , 故仅有  $\varphi$  存在. 3 人减排锦标赛的所有 4 种情形下弱势发电商的效用函数解析式,同样列于表 5 中.

表 5 考虑社会比较的 3 人减排锦标效用函数

Table 5 Utility functions considering social comparison with three participants

			竞争获胜者数量	
			1	2
强势发电商数量	1	强者	$u_{s11}^{\text{win}} = \xi$ $u_{s11}^{\text{lose}} = \delta - (\rho + \lambda_s)(\xi - \delta)$	$u_{s12}^{\text{win}} = \xi$ $u_{s12}^{\text{lose}} = \delta - (\rho + \lambda_s)(\xi - \delta)$
		弱者	$u_{v11}^{\text{win}} = \xi + (\varphi + \lambda_v)(\xi - \delta)$ $u_{v11}^{\text{lose}} = \delta$	$u_{v12}^{\text{win}} = \xi + \varphi(\xi - \delta)$ $u_{v12}^{\text{lose}} = \delta$
	2	强者	$u_{s21}^{\text{win}} = \xi$ $u_{s21}^{\text{lose}} = \delta - \rho(\xi - \delta)$	$u_{s22}^{\text{win}} = \xi$ $u_{s22}^{\text{lose}} = \delta - (\rho + \lambda_s)(\xi - \delta)$
		弱者	$u_{v21}^{\text{win}} = \xi + (\varphi + \lambda_v)(\xi - \delta)$ $u_{v21}^{\text{lose}} = \delta$	$u_{v22}^{\text{win}} = \xi + (\varphi + \lambda_v)(\xi - \delta)$ $u_{v22}^{\text{lose}} = \delta$

注: 发电商期望效用 = 胜利效用 × 获胜概率 + 失败效用 × (1 - 获胜概率) - 减排成本.

以上模型构建是基于 Kahneman 和 Tversky<sup>[35]</sup> 以及 Loewenstein 和 Bazerman<sup>[36]</sup> 分别提出的参照依赖与社会效用函数等概念,将文献 [33, 34] 中的社会比较模型推广到更为复杂的不对称锦标情形. 首先,设强、弱者的参照点依赖于各自子组合或者初始调度禀赋类型,这样二者的参照点分别为减排竞争胜利和失败. 相比而言,在原有研究中的参照点是锦标赛的模态奖金(modal prize); 其次,建模过程考虑了不同类型发电商之间社会比较的影响与效果,采用相应参数来定义发电商击败或输给其他类型发电商的额外效用收益与损失率. 这种允许发电商群际社会比较影响减排效用的处理方法拓展了 Amaldoss 和 Jain 在文献 [37, 38] 中构造

的理论模型; 最后,模型涵盖了标准的减排锦标赛模型,在上述拓展模型中令参数  $\rho, \varphi, \lambda_s$  以及  $\lambda_v$  均为 0 即可得到该种特殊博弈情形. 也就是说,基本模型嵌套在广义模型之内.

由于  $\text{CO}_2$  减排决策社会比较只会影响参与者减排竞争胜利与失败所获得的效用  $u_i$ , 而并不改变 3 人减排锦标中各个发电商减排竞争的边际获胜概率  $\frac{\partial Pr_i^{\text{win}}}{\partial e_i}$ , 这样在给定行为参数的情形下,基于上表中所列的效用解析式,可以求解出发电商  $i$  参与  $\text{CO}_2$  减排锦标赛的均衡减排水平. 为此,下文将首先对整个实验数据集采用标准误差对数极大似然(log maximum likelihood, LML) 估计所提

出的行为经济学模型参数值. 假设上述发电商  $i$  的  $\text{CO}_2$  减排量  $e_{iabc}$  服从均值为  $e_{ac}^*$ 、标准差为  $\sigma_{ac}$  的正态分布, 其中  $a$  代表发电商  $i$  的两种类型,  $b$  和  $c$  分别表示检验实验的 5 个决策回合及其相应的 4 种博弈结构. 将联合对数似然函数写成所有观测值的对数似然贡献和的形式, 即

$$LL(\rho, \varphi, \lambda_s, \lambda_v, \sigma_{ac}) = \sum_i \sum_a \sum_b \sum_c \ln \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ac}^2}} e^{-\frac{(e_{iabc}-e_{ac}^*)^2}{2\sigma_{ac}^2}} \right] \quad (32)$$

相关估计结果如表 6 所示, 可见所有行为参数  $\rho$ 、 $\varphi$ 、 $\lambda_s$  以及  $\lambda_v$  均为正常数, 且在 5% 水平上显著. 这表明采用拓展模型刻画发电商  $\text{CO}_2$  减排行为在理论上是可行的, 该模型综合考虑了强者失败时的心理负效用和弱者获胜的心理正效用, 以及强势发电商输给弱者时的额外效用损失与弱势发电商击败强者的额外效用收益. 强者行为参数估计  $\rho = 0.104$  和  $\lambda_s = 0.692$  表明其在减排竞争中通常不愿意失败, 且当他们输给弱者时还会感受到心理效用损失. 相比之下,  $\varphi = 0.361$  和  $\lambda_v = 0.33$  则说明弱势发电商从  $\text{CO}_2$  减排锦标获胜中获得显著的正效用同时, 可通过击败强者获取额外效用收益. 此外, 由  $\frac{\lambda_s}{\lambda_v} = 2.1$  可知, 强势发电商输给一个弱者所遭受的额外效用损失大约是

弱势发电商击败强者获得的额外效用收益的两倍还多. 这表明减排锦标赛中异质发电商之间同样存在相对于输赢双方的社会损失厌恶 (social loss aversion) [39].

上述参数估计结果还揭示了当有两个强势发电商参与时, 为何胜利者奖励数量的增加会提高强者的  $\text{CO}_2$  减排努力程度. 如在 2S1W 情形中, 虽然每个强势发电商都不希望失利, 但是其中之一肯定要输, 且期望是被强者击败. 因此, 二者失败的负效用仅由  $\rho$  引起, 这种心理损失是相对轻微的. 然而, 当有两个大奖金机会时, 如果强势发电商减排竞争失败, 其不仅要体会参数  $\rho$  的影响, 而且预见要承受更大的效用损失率  $\lambda_s$ . 因为此时博弈结果必定是一个强者输给弱者, 而另一个强势发电商将获得胜利者奖励. 强者内心厌恶输给一个弱者, 再加上对弱势发电商来讲, 获胜机会增大与击败强者的潜在额外收益会使其提高  $\text{CO}_2$  减排水平, 进而强势发电商势必要作出加大减排投入的策略响应. 相比之下, 当只有唯一强者参与减排锦标时, 不仅强者不存在强势竞争对手, 而且弱势发电商也期望强者占据两个大奖金之一, 以致其减排努力程度也不会特别激烈. 这样, 即使在双重心理因素  $\rho$  和  $\lambda_s$  作用下, 强势发电商仍然没有必要为了一个额外的胜利者奖励而增加减排量.

表 6 减排锦标行为经济学模型参数估计

Table 6 Parameters estimation of behavioral economics model

		对数极大似然估计					Wald 统计量 观察值
		$\rho$	$\varphi$	$\lambda_s$	$\lambda_v$	$LL$	
行为 经济学 模型	无约束条件	0.104(0.039)	0.361(0.048)	0.692(0.125)	0.330(0.034)	-3312.71	-
	$\lambda_s = \lambda_v$	0.189(0.040)	0.312(0.073)	-	0.456(0.069)	-3318.11	4.42
	$\lambda_s = \lambda_v = 0$	0.337(0.056)	0.496(0.029)	-	-	-3348.98	38.77
	$\rho = \lambda_s = 0$	-	0.408(0.055)	-	0.142(0.025)	-3371.39	43.50
	$\varphi = \lambda_v = 0$	0.141(0.062)	-	0.906(0.070)	-	-3398.75	172.32
	$\rho = \varphi = \lambda_s = \lambda_v = 0$	-	-	-	-	-3451.31	196.01

注: 本文中减排量实验观测值在主体层面的不独立使得似然比检验 (likelihood ratio test, LRT) 应用条件不满足, 故在此利用 Wald 统计量检验各种嵌套模型的约束条件是否显著降低拟合度; 括号中的数值为聚类标准误差.

表 6 同时还列出了包括标准减排锦标模式在内的五种嵌套模型 (nested model) 拟合. Wald 检验结果表明, 含有全部行为参数  $\rho$ 、 $\varphi$ 、 $\lambda_s$  以及  $\lambda_v$  的无约束条件广义模型与数据拟合度最佳. 由表 7 可知, 广义模型在样本内的最优预测值契合了上一节检验实验数据的基本特征, 尤其是参与发

电商实际中的过度减排行为以及在双强者减排锦标情形下的强势发电商  $\text{CO}_2$  减排水平与胜利者奖励数量正相关. 在此基础上, 笔者还给出仅含  $\rho$  和  $\varphi$  (即约束条件为  $\lambda_s = \lambda_v = 0$ ) 的特定嵌套模型均衡预测值. 其中, 当强势发电商数量为 2 时, 随着大奖金数量从 1 增加到 2, 强者的最优减排

量降低. 这与表 3 所列的检验实验数据变化相反, 该嵌套模型同样不能完全反映出强势发电商的减排水平理性调整趋势. 但与图 1 所示的理论预测结果相一致. 也就是说,

表 7 广义与特定嵌套模型均衡减排量预测

Table 7 Equilibrium mitigation prediction of generalized and specific nested models

			竞争获胜者数量			
			1		2	
			强者	弱者	强者	弱者
强势发电商数量	1	无约束条件	63.73	47.08	49.62	56.71
		$\lambda_s = \lambda_v = 0$	51.94	46.63	44.47	61.39
	2	无约束条件	47.44	36.64	59.41	65.98
		$\lambda_s = \lambda_v = 0$	55.72	24.67	48.07	59.95

### 6 结束语

本文利用行为经济学理论研究了电力市场中异质发电商竞争下的减排锦标博弈问题,先后考察并比较了不同市场与奖金结构下均衡的边际获胜概率及其最优减排投入.从实验经济学角度对理论模型进行了实验检验,在此基础上将模型拓展到考虑发电商社会比较的减排锦标模型,并给出了模型的最优参数估计与均衡预测值.本文的结论综合如下:1)在3人、4人减排锦标赛中,针对不同发电主体构成,增加胜利者奖励数量既不能驱动强者提高也不会迫使弱者降低各自的最优减排量;2)无论初始调度禀赋如何,只要实验信息完全公开,所有发电商均存在过度减排投资行为,且在双强者单弱者参与情形下,强势发电商的减排水平与获胜者数量正相关关系与标准理论预测相悖;3)对参数的约束条件显著降低行为经济学模型拟合度,其中广义模型均衡预测最契合检验实验的基本特征,而特定嵌套模型验证理论预测的可行性.

研究结果表明,在设计多人异质减排锦标奖金结构时,参与发电商的初始调度禀赋及其分配是电网公司需要考虑的重要因素.基于实施减排锦标的特定目的,例如最大化发电主体的总减排量、提高弱者减排努力程度等,电网公司可以预测如何增减大奖金数量以影响不同类型发电商的减排水平.一方面,当强势发电商为少数时,必须权衡增加获胜者奖励所带来的强者减排量减小和弱

者减排量增加;但是如果弱势发电商的数量足够大,则电网公司可能更偏向于设置比强者人数多的大奖金.另一方面,当强势发电商是多数时,反而没有必要限制获胜者奖励数量.因为此时增加大奖金数额不仅会提高弱者的减排努力水平,而且强者的潜在理性反应也会更好,因为他们并不希望自己在减排竞争中输给弱者.诚然,笔者承认在多人减排锦标赛中参与者的最优减排决策行为可能会发生异变.如在发电主体中强势发电商占比过大而胜利者奖励数量较小时,强者在其竞争失败时可能不会感到太大或者任何的负效用.此外,检验发现在标准理论模型中引入影响发电商减排行为的心理因素可以提高模型对实验数据的拟合度.考虑到上述心理参数可能是由构成减排锦标社会环境的制度与文化因素决定,实践中电网公司设法模拟估计出他们的存在及其作用规律,并在此基础上确定赛事规模与奖金结构对这些因素的影响.

另外,本文虽然只是分析了电网公司和发电商分别只有一个控制变量的动态对策模型,但它很容易从以下几个方面进行扩展:1)在本文模型的基础上讨论电网公司如何确定奖金数额;2)研究当发电商减排能力不相等时的不对称锦标赛情形;3)由于本文没有考虑价格对发电出力的影响,所以可以考虑价格影响调度下减排锦标问题.因此,本文的研究结果有助于对这些更复杂的模型进行深入的理论分析,为高层管理者的理性决策提供更有力的理论支持.

## 参 考 文 献:

- [1] 丁 然, 康重庆, 周天睿, 等. 低碳电网的技术途径分析与展望[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 1-8.  
Ding Ran, Kang Chongqing, Zhou Tianrui, et al. Analysis and prospect on technical approaches for low carbon power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 1-8. (in Chinese)
- [2] 黎灿兵, 刘 琦, 曹一家, 等. 低碳发电调度与节能发电调度的一致性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 94-101.  
Li Canbing, Liu Yu, Cao Yijia, et al. Consistency evaluation of low-carbon generation dispatching and energy-saving generation dispatching [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 94-101. (in Chinese)
- [3] Mandell S. Optimal mix of emissions taxes and cap-and-trade [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2008, 56(2): 131-140.
- [4] Paoletti M S, Taschini L. An econometric analysis of emission trading allowance prices [J]. Journal of Banking & Finance, 2008, 32(10): 2022-2032.
- [5] 陈启鑫, 周天睿, 康重庆, 等. 节能发电调度的低碳化效益评估模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 24-29.  
Chen Qixin, Zhou Tianrui, Kang Chongqing, et al. An assessment model of low-carbon effect and its application to energy conservation based generation dispatching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 24-29. (in Chinese)
- [6] Ockwell D G, Watson J, MacKerron G, et al. Key policy considerations for facilitating low carbon technology transfer to developing countries [J]. Energy Policy, 2008, 36(11): 4104-4115.
- [7] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [8] Stępczyńska-Drygas K, Łukowicz H, Dykas S. Calculation of an advanced ultra-supercritical power unit with CO<sub>2</sub> capture installation [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74(10): 201-208.
- [9] Lilliestam J, Bielicki J M, Patt A G. Comparing carbon capture and storage (CCS) with concentrating solar power (CSP): Potentials, costs, risks, and barriers [J]. Energy Policy, 2012, 47(8): 447-455.
- [10] Caro F, Corbett C, Tan T, et al. Carbon-optimal and Carbon-neutral Supply Chains [R]. Working Paper, Anderson Graduate School of Management-Operations and Technology Management, UC Los Angeles, 2011.
- [11] Jaber M Y, Glock C H, Saadany A. Supply chain coordination with emissions reduction incentives [J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(1): 69-82.
- [12] 李友东, 赵道致, 夏良杰. 低碳供应链纵向减排合作下的政府补贴策略[J]. 运筹与管理, 2014, 23(4): 1-11.  
Li Youdong, Zhao Daozhi, Xia Liangjie. Governmental subsidy policy for enterprises' cooperative behavior in emission reduction in low-carbon supply chain [J]. Operations Research and the Management Sciences, 2014, 23(4): 1-11. (in Chinese)
- [13] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.  
Xu Chunqiu, Zhao Daozhi, Yuan Baiyun, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains [J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 53-65. (in Chinese)
- [14] 黄守军, 任玉珑, 孙 睿, 等. 双寡头电力市场垂直合作减排的随机微分对策模型[J]. 中国管理科学, 2014, 22(2): 101-111.  
Huang Shoujun, Ren Yulong, Sun Rui, et al. Stochastic differential game models of vertical cooperative mitigation in duopoly electricity market [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(2): 101-111. (in Chinese)

- [15]黄守军,陈其安,任玉珑. 低碳技术组合应用下纵向合作减排的随机微分对策模型[J]. 中国管理科学, 2015, 23(12): 94-104.  
Huang Shoujun, Chen Qian, Ren Yulong. Stochastic differential game models for vertical cooperative mitigation in electricity market with combined application of low-carbon technologies [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(12): 94-104. (in Chinese)
- [16]Lazear E P, Rosen S. Rank-order tournaments as optimum labor contracts [J]. Journal of Political Economy, 1981, 89(5): 841-864.
- [17]Green J R, Stokey N L. A Comparison of tournaments and contracts [J]. Journal of Political Economy, 1983, 91(3): 349-364.
- [18]Kini O, Williams R. Tournament incentives, firm risk and corporate policies [J]. Journal of Financial Economics, 2012, 103(2): 350-376.
- [19]Terwiesch C, Xu Y. Innovation contests, open innovation and multiagent problem solving [J]. Management Science, 2008, 54(9): 1529-1543.
- [20]周黎安. 中国地方官员的晋升锦标赛模式研究 [J]. 经济研究, 2007, 42(7): 36-50.  
Zhou Lian. Governing China's local officials: An analysis of promotion tournament model [J]. Economic Research Journal, 2007, 42(7): 36-50. (in Chinese)
- [21]Franke J. Affirmative action in contest games [J]. European Journal of Political Economy, 2012, 28(1): 105-118.
- [22]Gürtler O. Collusion in homogeneous and heterogeneous tournaments [J]. Journal of Economics, 2010, 100(3): 265-280.
- [23]李晓义,李维安,李建标,等. 首位晋升与末位淘汰机制的实验比较 [J]. 经济学(季刊), 2010, 10(1): 227-248.  
Li Xiaoyi, Li Weian, Li Jianbiao, et al. An experimental comparison between winner-up and loser-out tournaments [J]. China Economic Quarterly, 2010, 10(1): 227-248. (in Chinese)
- [24]O'Keeffe M W, Viscusi K, Zeckhauser R J. Economic contests comparative reward schemes [J]. Journal of Labor Economics, 1984, 2(1): 27-56.
- [25]Steven W, Brian R. Behavioral and welfare effects of tournaments and fixed performance contracts: Some experimental evidence [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2005, 87(1): 130-146.
- [26]Orrison A, Schotter A, Weigelt K. Multiperson tournaments: An experimental examination [J]. Management Science, 2004, 50(2): 268-279.
- [27]Smith V L, Suchanek G, Williams A. Bubbles, crashes and endogenous expectations in experimental spot asset markets [J]. Econometrica, 1988, 56(5): 1119-1151.
- [28]Mestelman S, Feeny D. Does ideology matter? Anecdotal experimental evidence on the voluntary provision of public goods [J]. Public Choice, 1988, 57(3): 281-286.
- [29]Fehr E, Fischbacher U. Why social preferences matter—the impact of non-selfish motives on competition, cooperation and incentives [J]. Economic Journal, 2002, 112(478): 1-33.
- [30]Bull C, Schotter A, Weigelt K. Tournaments and piece rates: An experimental study [J]. Journal of Political Economy, 1987, 95(1): C1-C33.
- [31]Lim N, Ahearne M J, Ham S H. Designing sales contests: Does the prize structure matter? [J]. Journal of Marketing Research, 2009, 46(3): 356-371.
- [32]Fischbacher U. z-Tree: Zurich toolbox for ready-made economic experiments [J]. Journal of Experimental Economics, 2007, 10(2): 171-178.
- [33]Lim N. Social loss aversion and optimal contest design [J]. Journal of Marketing Research, 2010, 47(4): 777-787.
- [34]Chen H, Ham S H, Lim N. Designing multiperson tournaments with asymmetric contestants: An experimental study [J]. Management Science, 2011, 57(5): 864-883.

- [35] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263–292.
- [36] Loewenstein G F, Bazerman M H, Thompson L. Social utility and decision making in interpersonal contexts [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1989, 57(3): 426–441.
- [37] Amaldoss W, Jain S. Pricing of conspicuous goods: A competitive analysis of social effects [J]. *Journal of Marketing Research*, 2005, 42(1): 30–42.
- [38] Amaldoss W, Jain S. Conspicuous consumption and sophisticated thinking [J]. *Management Science*, 2005, 51(10): 1449–1466.
- [39] Camerer C F. Behavioral Economics and Nonrational Organizational Decision Making. In Halpern J J & Stern R N (Eds.), *Debating Rationality: Nonrational Aspects of Organizational Decision Making* [M]. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1998.

## Mitigation tournament game under heterogeneous generators competition in electricity market: Structure and behavior

HUANG Shou-jun<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>

1. Lingnan(University) College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract:** The mitigation tournament game under heterogeneous generators competition in electricity markets is studied by using behavioral economics. The equilibrium marginal probabilities of winning and the optimal mitigation efforts in different market and bonus structures are discussed successively. Theoretical models are experimentally tested from the perspective of experimental economics and the models are extended to tournament models of mitigation considering non-pecuniary factors such as social comparison which also affects a generator's mitigation decision. The optimal parameter estimations and equilibrium predictive values of generalized models are given. The results gained through comparative analysis indicate that increasing the number of winning prizes, regardless of the generation subject compositions, neither drives superiors to raise nor forces the vulnerable to decrease respective mitigation quantities in a tournament with three or four participants. No matter what the initial dispatching endowments are, all generators present overinvestment behaviors as long as the experiment information is completely public. Contrary to the standard theory predictions, the levels of the latter's mitigation efforts are positively correlated with number of winners when a single vulnerable and double superior generators compete. The parameter constraints reduce the fitness of the behavioral economics model significantly and the equilibrium prediction of generalized model fits the basic features of test experiment best in contrast with the specific nested model which verifies the feasibility of the theoretical predictions.

**Key words:** electricity market; bonus structure; heterogeneous generators; mitigation tournament; experimental test; behavioral economics model