

# 基于 Agent 的报价学习对碳排放权拍卖的影响

胡东滨<sup>1,2</sup>, 胡紫娟<sup>1</sup>, 陈晓红<sup>1,2,3</sup>

(1. 中南大学商学院, 湖南长沙 410083; 2. 新零售虚拟现实技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083;  
3. 湖南商学院, 湖南长沙 410205)

**摘要:** 针对碳排放权序贯拍卖中竞标主体的报价学习行为对拍卖结果的影响, 引入自适应性报价模型并改进 PSO (particle swarm optimization) 智能算法来模拟控排企业报价动态变化的学习机制, 并构建基于多 Agent 的拍卖仿真模型, 实验分析不同拍卖情景下, 报价学习行为对碳排放权拍卖出清价格、年均履约水平以及拍卖效率的影响。实验结果表明: 报价学习行为可以显著提高企业年均履约水平, 但是在歧视价格拍卖以及统一价格拍卖(市场供小于求时)下, 会显著降低碳排放权出清价格和拍卖效率; 歧视价格拍卖的出清价格和拍卖效率都高于统一价格拍卖, 但从公平性以及降低企业成本的角度出发, 统一价格拍卖可以减少拍卖对没有学习行为的竞标主体的不公平性以及避免报价学习行为对拍卖效率的影响。

**关键词:** 碳排放权拍卖; 报价学习行为; 多 Agent 仿真; 统一拍卖价格; 歧视价格拍卖

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2019)02-0170-16

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.02.003

## Influence of Agent-based bidding learning on carbon emission rights auction

Hu Dongbin<sup>1,2</sup>, Hu Zijuan<sup>1</sup>, Chen Xiaohong<sup>1,2,3</sup>

(1. Business School of Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Key Laboratory of Hunan Province for New Retail Virtual Reality Technology, Changsha 410083, China;  
3. Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China)

**Abstract:** This paper introduces a self-adaptive pricing model and improved particle swarm optimization (PSO) algorithm to simulate the learning mechanism of the dynamic change of bidding prices to examine the impacts of bidders' learning bidding strategies on carbon allowance sequential auction. A multi-agent auction simulation model is constructed to study the impacts of bidders' learning behaviors on carbon allowance clearing prices, annual performance level, and auction efficiency under different experimental situations. The results show that the bidding learning behaviors can significantly increase the average annual compliance level of bidding firms but reduce the clearing prices and auction efficiencies under discriminatory-price auction and uniform-price auction (when market supply is less than demand). Meanwhile, discriminatory-price auctions have higher clearing prices and auction efficiency than uniform-price auctions. However, in view of fairness and reducing corporate costs, uniform-price auctions reduce unfairness for firms who do not have bidding learning behaviors, and avoid the influence of bidding learning behaviors on auction efficiency.

**Key words:** carbon emission right auction; bidding learning behaviors; multi-agent simulation; uniform-price auction; discriminatory-price auction

收稿日期: 2018-03-26; 修订日期: 2018-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(71431006); 教育部哲学社会科学研究重大课题资助项目(13JZD0016); 国家自然科学基金资助项目(71271216).

## 1 引言

面对全球气候形势变化的严峻挑战, 发展低碳经济、节能减排已成为全球经济可持续发展的重大战略举措之一. 在低碳背景下, 各国制定了不同的节能减排政策. 2005 年欧盟首次实施总量限制碳排放权交易计划(EUETS), 此后, 东京排放权交易体系、加州排放权交易体系和魁北克排放权交易体系也于 2005 年至 2013 年间相继建立<sup>[1,2]</sup>. 中国作为世界上最大的二氧化碳排放国, 自 2013 年起相继启动了包括北京、天津、上海、重庆、广东、福建与深圳在内的七个区域碳排放权交易试点, 2017 年底启动了全国统一碳排放权交易市场, 承诺到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放相比于 2005 年下降 40% ~ 50%<sup>[3]</sup>.

全国统一碳排放权交易市场涵盖两级市场: 一级市场为初始碳排放权分配市场; 二级市场为交易市场. 其中初始碳排放权分配作为碳排放交易体系的基础和关键环节, 是政府关注和学术研究的重点领域. 根据现行的排放权交易体系, 目前最常见的初始碳排放权分配方式有: 政府免费分配、公开拍卖以及两者相结合的混合分配方式. 其中拍卖不仅可以克服免费分配的弊端, 如“鞭打快牛, 不公平的惩罚”<sup>[4]</sup>, 还能产生所谓的“双重红利效应”<sup>[5]</sup>: 将碳排放权分配给估值最高的控排企业, 产生最大的效用, 达到碳排放权的最优配置, 同时拍卖收入还可以为环保项目提供资金支持. 因此, 鉴于上述优势, 近年来 EUETS 和中国的五个试点(北京, 深圳, 上海, 广东, 湖北)都逐渐引入了拍卖模式. 但是目前中国正处于全国统一碳交易市场启动之际, 政府和控排企业的碳排放权拍卖实践经验尚少, 拍卖机制设计仍处于起步阶段, 如何设计出有效的碳排放权拍卖机制是政府和科研机构亟待解决的难点.

与普通单一商品和单一需求拍卖不同, 碳排放权本质上是一种同质的可分离公共物品<sup>[6]</sup>, 其拍卖具有以下几个方面的特殊性: 其一, 每年拍卖多次, 每次拍卖的碳配额总量可同时分配给多个不同的竞标主体, 属于多物品序贯拍卖的范畴; 其二, 在序贯拍卖过程中, 投标者可以根据每次拍卖获胜者信息和市场交易信息更新对其他竞争对手的类型信念以及优化下一次报价<sup>[7,8]</sup>, 因此有信息学习的均衡报价策略一阶随机占优于无信息学习的均衡报价策略<sup>[9]</sup>; 其三, 在碳排放权交易市场上控排企业具有明显的履约属性<sup>[10]</sup>, 即控排企业每次拍卖报价受履约时间和配额缺口压力的影响.

学术界对于碳排放权拍卖机制的研究主要分为两个维度和三种方法: 1) 从政府机制设计的角度, 构建拍卖经济学模型, 研究了拍卖方式<sup>[11]</sup>、政府保留价<sup>[12]</sup>、惩罚价格、市场势力<sup>[13]</sup>等因素对碳排放权拍卖结果的影响, 如 Wei<sup>[14]</sup>从政府收益和企业收益的角度对比了统一价格拍卖和歧视价格拍卖, 发现政府收益和企业收益对市场供需关系、发电成本不确定性、竞标者学习行为较为敏感. Liu 等<sup>[15]</sup>从市场价格的角度对比了电力市场歧视价格拍卖和统一价格拍卖的定价过程, 发现在市场达到均衡之前歧视价格拍卖下市场价格高于统一价格拍卖, 市场达到均衡以后的结果则相反; 2) 从竞标主体的角度, 研究了企业均衡报价策略问题<sup>[16,17]</sup>, 另外, 由于碳排放权为重复多次拍卖, 竞标主体的报价学习行为也受到越来越多的关注. 比如 Cong 等<sup>[18]</sup>运用 Erev 等<sup>[19]</sup>提出的强化学习算法, 研究竞标企业报价策略调整过程, 并模拟了报价学习行为. 郑君君等<sup>[20]</sup>将排污权拍卖市场上污染厂商的学习速度引入报价策略更新规则中, 通过仿真探讨了学习速度与信息交互结构对策略演化的影响机理, 研究表明厂商的策略收敛速度与学习速度和信息交互的度正相关. 郑君君等<sup>[21]</sup>通过构建不同污染物排污权迭代组合拍卖模型, 并利用 EWA 模型研究了排污企业的个体属性和学习行为对排污权分配结果的影响, 研究发现排污企业的报价策略选择越依赖其学习行为, 其收益越高. 在研究方法上, 主要有运用经济学理论构建最优规划模型<sup>[6,13]</sup>, 实验室研究<sup>[18]</sup>和基于复杂适应性系统理论的 Agent 仿真方法<sup>[22,23]</sup>三种, 其中 Rao 等<sup>[6]</sup>通过构建可分离物品多阶段统一价格拍卖的最优化模型, 研究了拍卖均衡点的形成过程以及竞标者均衡策略. Cong 等<sup>[18]</sup>采用实验经济学的研究方法研究了允许排放权存储、竞标者交流以及惩罚价格对碳排放权拍卖效率的影响. Tang 等<sup>[22]</sup>运用多主体仿真模型讨论了碳交易机制对经济和减排的影响, 研究表明不同的排放权分配方式、基准值碳价、惩罚比率以及补贴比率都是影响碳交易政策有效性的重要因素.

虽然上述研究对于碳排放权拍卖机制研究有着重大的贡献,但仍存在一些不足.例如:1)对拍卖结果的分析仅关注了碳价和政府收益<sup>[14,15]</sup>,忽略了控排企业的履约水平以及拍卖效率两个重要指标.当前中国尚不承担国际上强制碳减排义务,在自愿减排阶段,为了避免排放权有偿出售对经济发展造成较大冲击,政府现阶段获取拍卖收益的同时要保证较高的碳排放权成交量,所以现阶段碳价和控排企业的履约水平是政府关注的重点.另外,碳排放权作为越来越稀缺的公共资源,其拍卖效率也是拍卖机制设计需要评估的核心之一;2)由于传统经济学模型较难表征多物品序贯拍卖中竞标主体之间的信息交互,而且求解困难,较少有研究在碳排放权拍卖系统模型构建时考虑竞标主体的履约属性和报价学习行为.为数不多的相关研究也是基于一些简单的理想假设,比如:竞标主体只有单位排放权需求<sup>[24]</sup>,估价独立同分布等.与竞标主体多单位排放权需求的现实情况不符,不利于设计出完善而有效的碳排放权拍卖机制;3) Cong 等<sup>[18]</sup>采用的强化学习模型以及郑君君等<sup>[21]</sup>采用的 EWA 模型在刻画竞标主体的学习行为时,仅适用于竞标主体报价为离散的报价集合,不能应用于竞标者报价为连续函数的情况,模型缺乏一般性.另外,在三种研究方法中,多主体仿真方法作为一种自底向上的分析工具,可以刻画每个独立经济主体的决策行为并反映主体之间的信息交互.一方面可以克服理论推导中假设条件过多且较难得出显解的弊端,另一方面避免了实验室实验在被试选择上的主观性对分析结果的影响.

鉴于以上问题,本文首先运用多 Agent 仿真平台 Netlogo,搭建由政府和企业 Agent 组成的碳排放权拍卖系统;其次,提出考虑企业 Agent 履约属性和信息学习能力的两种报价学习模型以及设定拍卖市场规则;然后,以拍卖方式和供需情况为两个控制变量,设计四种实验情景,模拟分析不同的拍卖情景下企业报价学习行为对碳排放权拍卖结果(市场出清价格、履约水平和拍卖效率)的影响,主要探讨以下两个问题:

1)控排企业 Agent 的报价学习行为对企业履约成本以及履约水平有何影响?

2)考虑到企业的报价学习行为,从公平和拍卖效率的角度,政府 Agent 应该如何设计碳排放权拍卖机制(如:拍卖定价方式的选择和拍卖总量的设定)?

本文与以往基于均衡假设的碳排放拍卖理论研究的区别在于:1)考虑竞标 Agent 带有履约属性的报价学习机制,引入了两种连续型报价学习策略模型,即自适应学习型竞标策略和 PSO 学习型竞标策略,扩展了现有研究报价策略离散的假设.2)建立基于 Netlogo 的碳排放权拍卖市场仿真模型,模拟每年序贯拍卖过程中竞标 Agent 之间的信息交互,克服了现有拍卖均衡分析模型中仅考虑单次拍卖以及竞标者单一需求量的理想假设以及求解困难的问题.3)通过设计仿真实验,深入分析了不同碳排放权拍卖方式以及不同市场供需情况下控排企业 Agent 报价学习行为对碳排放权出清价格、履约水平和拍卖效率的影响.本文的研究发现政府采取歧视价格拍卖时政府收益和拍卖效率更高,但从公平性以及降低企业成本的角度出发,统一价格拍卖可以减少拍卖对没有学习行为的竞标主体的不公平性以及避免报价学习行为对拍卖效率的影响,为政府在碳排放权拍卖机制设计时拍卖方式决策和拍卖总量确定提供参考依据.

## 2 基于多 Agent 的碳排放权拍卖模型

### 2.1 碳排放权拍卖市场 Agent 关系

为模拟碳排放权拍卖中拍卖 Agent(政府)和竞标 Agent(控排企业)的市场行为,本节基于多 Agent 仿真平台 Netlogo 建立了碳排放权序贯拍卖模型.在本模型中政府 Agent 和竞标企业 Agent 关系如图 1 所示,政府 Agent 确定碳排放权拍卖总量以及拍卖方式,竞标 Agent 根据自身情况和外部市场信息制定竞标策略,每次拍卖结束后市场出清价格和企业中标数量又指导企业动态调整下一次拍卖的竞标策略,而政府根据拍卖收益评估拍卖效率.

### 2.2 政府 Agent 行为规则

政府是碳排放权拍卖市场的拍卖 Agent 以及市场管理者,政府在每个履约年的行为包括:1)根据国家整体减排目标,确定拍卖次数  $N$  以及每次拍卖排放权总量  $Q_0$ .2)综合二级市场碳价和其他不确定性因素确

定第  $t$  次拍卖的政府保留价  $RP_t$ . 3)选择碳排放权拍卖方式: 统一价格拍卖或者歧视价格拍卖.

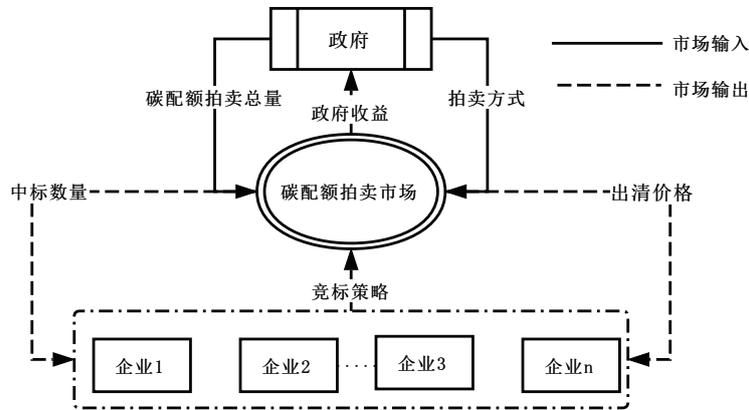


图 1 碳排放权拍卖市场主体关系图

Fig.1 Relationship between carbon emission right auction market agents

### 2.3 控排企业 Agent 行为规则

控排企业作为碳市场上最主要的交易 Agent 和排放核查对象, 本模型中假设所有控排企业在拍卖市场中做竞标决策时都是逐利且相互独立的经济个体. 为获得最大的经济效益, 竞标企业  $i$  根据自身情况和外部市场信息进行自主交易以及调整竞标决策, 确定第  $t$  次拍卖的竞标价格  $Pb_{i,t}$  以及申报数量  $qb_{i,t}$ .

#### 2.3.1 报价策略

为表征序贯拍卖过程中竞标主体动态更新报价以及反复学习的过程, 本文在 ZI-C 的报价策略基础上提出两种有学习行为的报价策略.

##### 1) ZI-C (zero intelligence with constraint)策略

ZI-C 策略是由 Gode 等<sup>[25]</sup>模拟市场上有限理性个体时提出的“约束型零信息”策略(以下简称零智能策略), 是一种不考虑任何外在市场信息的随机报价策略, 既不受外部其他竞标者报价的影响也不体现报价主体的行为偏好. 随机取值范围为市场允许的最低报价和决策主体能接受的最高价格之间. 则竞标企业  $i$  第  $t$  次拍卖的报价表示为

$$Pb_{i,t} = RP_t + r(PV_i - RP_t), \tag{1}$$

其中  $r$  为  $[0, 1]$  上的随机数,  $RP_t$  为第  $t$  次拍卖政府保留价,  $PV_i$  指企业  $i$  对排放权的私有估值, 可理解为企业  $i$  能接受的最高价格或控排企业的边际减排成本.

##### 2) 考虑履约时间和排放权缺口的自适应学习型报价策略

ZI-C 策略不能表征在序贯拍卖中企业竞价策略随时间动态变化的适应性过程. 通过对上海碳交易试点的履约企业实地调研, 访谈钢铁、电力、石化等八大我国碳排放重点监管行业的 32 家有意愿参与拍卖的控排企业, 其中 27 家控排企业表示现阶段企业参与碳排放权拍卖主要是为了履约, 企业拍卖报价也主要受政府保留价、履约时间以及企业配额缺口的影响, 越临近履约期以及配额缺口越大, 企业履约压力越大, 报价越高. 同时在理论研究方面, Farnia 等<sup>[26]</sup>通过对木材拍卖市场上竞标者对于交易剩余时间和未完成产量的感知, 引入了一种竞标者适应性竞标函数. 由于文献[26]中的木材拍卖市场与碳排放权拍卖市场在拍卖形式、拍卖规则以及竞标主体属性上具有高度一致性, 因此在实践和理论研究的基础上本文提出了一种考虑履约时间以及排放权缺口压力影响报价的自适应学习型报价策略(以下简称自适应策略).

假设竞标主体的报价  $Pb_{i,t}$  随履约压力  $\theta$  线性递增, 则参考 Farnia<sup>[26]</sup>提出的适应性函数的基本原理, 竞标企业  $i$  第  $t$  次的报价为

$$Pb_{i,t} = (PV_i(1 + \theta) + RP_t(1 - \theta)) / 2. \tag{2}$$

由于剩余的拍卖次数越少或者剩余的碳排放权缺口越大, 竞标主体履约压力越大, 履约压力系数  $\theta$  可表示为

$$\theta = \tanh \left( \frac{N}{N-t+1} \frac{RN_{i,t}}{q_i} - 2 \right), \quad (3)$$

其中  $N$  表示一个履约年总拍卖次数,  $t$  表示当前拍卖次数,  $RN_{i,t}$  表示第  $t$  次拍卖前企业  $i$  的剩余的碳排放权缺口,  $q_i$  为企业  $i$  的年度总排放权缺口, 单调增函数  $\tanh(\cdot)$  为双曲正切函数.

履约压力参数  $\theta$  的取值范围为  $[-1, 1]$ , 结合式(2), 当履约压力参数  $\theta$  趋近于  $-1$  时, 企业第  $t$  次的报价趋近于最小值  $RP_t$ . 当履约参数趋近于  $1$  时, 企业第  $t$  次的报价趋近于最大值  $PV_i$ , 换言之, 竞标主体报价总介于政府保留价  $RP_t$  以及企业私有估值  $PV_i$  之间.

将式(3)代入式(2), 竞标企业  $i$  第  $t$  次的报价可表示为

$$Pb_{i,t} = \left( \frac{PV_i - RP_t}{2} \right) \tanh \left( \frac{N}{N-t+1} \frac{RN_{i,t}}{q_i} - 2 \right) + \left( \frac{PV_i + RP_t}{2} \right). \quad (4)$$

用式(4)对拍卖次数  $t$  和剩余排放权缺口  $RN_{i,t}$  求导可得  $\frac{\partial Pb_{i,t}}{\partial t} < 0$ ,  $\frac{\partial Pb_{i,t}}{\partial RN_{i,t}} > 0$ , 表明企业履约剩余时间越少或者剩余排放权缺口越大, 企业的竞标价格越高. 因此, 这种报价策略可以视为竞标主体为完成控排目标, 报价随其对履约时间和排放权缺口变化的自适应学习策略. 企业报价会随着履约期的临近而增大, 但是随排放权缺口的减小, 企业报价又会出现下降趋势. 这与广东省碳排放权拍卖市场的真实报价情况一致, 广东省碳排放权履约窗口期为每年 7 月~8 月, 每年 9 月到次年的 6 月为一个履约周期. 在一年连续 4 次拍卖中, 企业申报价格先上升后下降, 在一定程度上验证了本模型的合理性.

### 3) 基于 PSO 算法的学习型报价策略

自适应报价策略是从个体现状的角度调整报价策略, 然而实际序贯拍卖过程中, 由于历史竞标结果的公开, 投标者之间还存在间接的信息交互, 竞标企业在学习个体历史竞标经验的同时也可以根据市场公开信息(群体竞标结果)观察其他中标的控排企业的报价行为并进行借鉴和报价学习, 不断调整竞标策略.

与常见的只考虑个体学习行为的强化学习算法不同, Kennedy 等人<sup>[27]</sup>提出的粒子群优化算法(PSO), 结合了个体学习和群体学习行为, 更接近人类决策行为. PSO 算法的基本原理是粒子根据自身经历的个体极值和群体极值来不断自我优化更新, 算法结构简单高效, 可调参数较少, 其在函数优化、神经网络训练<sup>[28]</sup>、模糊系统控制等领域得到了广泛应用. 近年来也有研究将 PSO 算法应用于拍卖策略优化, Zhu 等<sup>[29]</sup>采用 PSO 算法模拟了双边拍卖模型中投标主体的学习行为, 并通过仿真验证了有限理性的买卖双方的最终报价策略基本与理论的线性均衡一致.

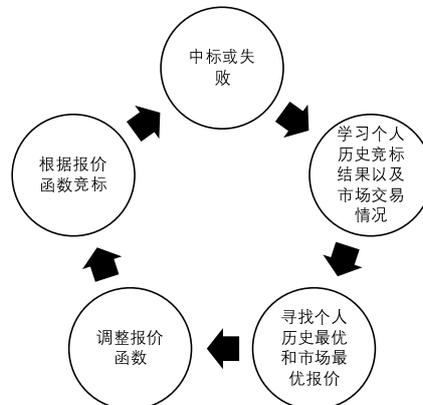


图 2 拍卖中企业基于 PSO 的竞标学习过程

Fig.2 PSO-based bidding learning process for bidders

区别于买卖双方同时竞价的双边拍卖模型, 碳排放权拍卖是只有买方竞价的单边拍卖, 因此本文

将 PSO 算法的基本原理应用于碳排放权序贯拍卖过程中, 提出一种基于 PSO 算法的学习型竞拍策略(以下简称 PSO 学习型策略), 同时兼顾竞标主体的自我学习和群体学习行为. 企业基于 PSO 的竞标学习过程如图 2 所示. 首先, 竞标主体按照自己的报价函数竞标, 拍卖结束后企业根据个人历史竞标结果以及市场交易信息, 找出个人历史最优报价和市场最优报价, 进而调整报价函数, 等待下一次拍卖, 如此往复.

根据 PSO 算法的基本原理, 将  $m$  家控排企业视为一个群体, 每家投标企业  $i$  都可视为空间上的一个粒子, 企业  $i$  前  $N$  次拍卖的报价集合  $Pb_i = \{Pb_{i,1}, Pb_{i,2}, \dots, Pb_{i,N}\}$  相当于粒子的位置矢量, 企业前  $N$  次拍卖报价的调整幅度  $X_i = \{X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,N}\}$  视为粒子的速度矢量. PSO 学习型报价策略的基本原理是: 竞标企业  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 利用截至到第  $t$  次拍卖的个体历史竞标经验以及外部市场信息来更新第  $t+1$  次拍卖的报价调整幅度  $X_{i,t+1}$ , 进而调整第  $t+1$  次拍卖的报价  $Pb_{i,t+1}$ , 可表示为

$$Pb_{i,t+1} = Pb_{i,t} + X_{i,t+1}. \quad (5)$$

企业首次拍卖报价为  $RP_t$  到  $PV_i$  之间的随机报价, 企业  $i$  第  $t+1$  次报价的调整幅度  $X_{i,t+1}$  可表示为

$$X_{i,t+1} = wX_{i,t} + C_1R_1(Pb_{i,t}^{\text{best}} - Pb_{i,t}) + C_2R_2(Pb_{i,t}^{\text{gbest}} - Pb_{i,t}), \quad (6)$$

其中  $w$  是惯性因子, 是投标企业投标惯性的表现;  $C_1$  和  $C_2$  均为非负常数, 分别是控排企业的自我学习能力和群体学习能力的体现;  $R_1$  和  $R_2$  都是  $[0, 1]$  上的随机参数;  $Pb_{i,t}^{\text{best}}$  表示企业  $i$  截止到第  $t$  次拍卖的个体历史最优报价,  $Pb_{i,t}^{\text{gbest}}$  表示对企业  $i$  而言截止到第  $t$  次拍卖的市场最优报价.

式(6)说明报价调整幅度由三部分组成, 第一部分反映投标企业对上次报价的认可程度, 第二部分和第三部分分别体现了竞标主体对自我历史报价经验的学习和市场交易信息的学习.

首先, 因为企业第  $t+1$  次拍卖的申报价格不低于政府保留价且不超过企业对碳排放权的私有估值, 则将  $RP_{t+1} \leq Pb_{i,t+1} \leq PV_i$ , 代入式(5), 可得  $X_{i,t+1}$  的取值范围如下

$$RP_{t+1} - Pb_{i,t} \leq X_{i,t+1} \leq PV_i - Pb_{i,t}. \quad (7)$$

其次, 传统的粒子群算法通常适用于信息完全公开的情形, 并假定一个适应度函数, 当个体和群体的适应度值取极大值时, 粒子达到最优位置. 考虑到碳排放权拍卖过程中竞标主体除了自身报价信息, 交易信息以及市场出清价格以外, 并不知道其他竞标主体的报价以及盈利情况, 本文针对不完全信息下碳排放权拍卖控排企业的报价利润驱动属性, 对个体和群体分别提出两种不同的适应度函数来表征以往拍卖的个体历史最优报价和市场最优报价, 竞标主体每次报价的个体适应度函数用企业拍卖剩余表示, 竞标主体  $i$  第  $s$  次的拍卖剩余可表示为  $(PV_i - P_{i,s})Qb_{i,s}$ , 其中  $P_{i,s}$  表示第  $s$  次拍卖企业  $i$  的中标价格,  $Qb_{i,s}$  指企业  $i$  第  $s$  次拍卖的中标数量. 因此式(6)中企业  $i$  截止到第  $t$  次拍卖的个体历史最优报价  $Pb_{i,t}^{\text{best}}$  可定义为使企业  $i$  拍卖剩余最大的个人历史报价,  $Pb_{i,t}^{\text{best}}$  可表示为

$$Pb_{i,t}^{\text{best}} = \underset{Pb_{i,s}}{\operatorname{argmax}}((PV_i - P_{i,s})Qb_{i,s}), \quad s = 1, 2, 3, \dots, t. \quad (8)$$

式(9)中对企业  $i$  来说截止到第  $t$  次拍卖的市场最优报价  $Pb_{i,t}^{\text{gbest}}$  可以用  $t$  次拍卖的市场最优报价的平均值来表示, 其中  $Y_{i,s}$  指对企业  $i$  而言, 第  $s$  次拍卖的市场最优报价.

$$Pb_{i,t}^{\text{gbest}} = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t Y_{i,s}. \quad (9)$$

针对中标和落选的竞标主体提出两种不同的群体适应度函数, 即两种不同的市场最优报价函数, 如式(10)所示, 当企业  $i$  在第  $s$  次拍卖中落选, 即本次获得的排放权数量  $Qb_{i,s}$  小于申报数量  $qb_{i,s}$ , 表明企业  $i$  本次报价较低, 因此, 为增加中标概率, 对企业  $i$  而言, 第  $s$  次拍卖的最优报价在市场出清价格上浮  $\Delta\epsilon$ ; 相反, 当竞标主体  $i$  在第  $s$  次拍卖时中标, 即企业本次拍卖获得的排放权数量  $Qb_{i,s}$  等于申报数量  $qb_{i,s}$ , 表明该企业本次报价较高, 排放权成本也相应较高, 则对于企业  $i$  来说, 为降低经济成本, 本次拍卖的市场最优报

价为市场出清价格,其中  $\Delta\varepsilon \in [0.1, 0.2]$ .

$$Y_{i,s} = \begin{cases} CP_s(1 + \Delta\varepsilon), & 0 \leq Qb_{i,s} < qb_{i,s}, \\ CP_s, & Qb_{i,s} = qb_{i,s}, \end{cases} \quad s = 1, 2, 3, \dots, t. \quad (10)$$

### 2.3.2 竞标数量

由于碳排放权拍卖市场上参与拍卖的竞标企业所属区域、行业以及企业规模的异质性,每个企业在履约期内排放权需求量差异较大,由此导致的企业每次拍卖的申报数量也千差万别.借鉴 Rao<sup>[6]</sup>在竞标者私人估值非对称、风险中性假设下,拍卖数量与报价之间存在线性均衡的研究结论,本文假设企业  $i$  第  $t$  次拍卖的申报数量为连续可微函数  $qb_{i,t} = RN_{i,t} (PV_i - Pb_{i,t}) / (PV_i - RP_t)$ ,其中  $RN_{i,t}$  表示企业  $i$  在第  $t$  次拍卖前企业的碳排放权缺口.由于  $RP_t \leq Pb_{i,t} \leq PV_i$ ,可得  $0 \leq (PV_i - Pb_{i,t}) / (PV_i - RP_t) \leq 1$ ,则企业每次拍卖的申报数量  $qb_{i,t}$  处于0到排放权缺口  $RN_{i,t}$  之间;又  $\frac{\partial qb_{i,t}}{\partial Pb_{i,t}} < 0$ ,即申报数量随申报价格的增加而降低,符合企业作为理性人的基本特征.

## 2.4 市场规则设定

当竞标企业提交完每次拍卖的竞标价格和申报数量以后,按照政府确定的拍卖形式遵循“价格优先”的原则,  $m$  家控排企业进行重新排序,申报价格  $Pb_{i,t}$  最高的企业编号  $i$  为1,申报价格次高的企业编号  $i$  为2,以此类推.当竞标者的累积申报数量等于拍卖排放权总量  $Q_0$  时,确定市场的出清价格、企业拍卖成交价格以及企业中标数量.

当政府采用统一价格拍卖时,所有中标企业的拍卖成交价格  $P_{i,t}$  都等于市场出清价格  $CP_t$ ,

$$P_{i,t} = CP_t = \begin{cases} Pb_{u+1,t}, & \text{若 } \sum_{i=1}^u qb_{i,t} < Q_0, \sum_{i=1}^{u+1} qb_{i,t} \geq Q_0, i \leq u+1 & (11a) \\ +\infty, & \text{若 } \sum_{i=1}^u qb_{i,t} < Q_0, \sum_{i=1}^{u+1} qb_{i,t} \geq Q_0, i > u+1 & (11b) \\ Pb_{n,t}, & \text{若 } \sum_{i=1}^n qb_{i,t} < Q_0, & (11c) \end{cases}$$

其中  $P_{i,t}$  表示企业  $i$  在第  $t$  次拍卖的成交价,  $qb_{i,t}$  表示企业  $i$  在第  $t$  次拍卖的竞标数量,  $Pb_{u+1,t}$  和  $Pb_{n,t}$  分别表示企业  $u+1$  和企业  $n$  在第  $t$  次拍卖中的竞标价格.式(11a)表示在拍卖市场供小于求时,前  $u+1$  家企业在第  $t$  次拍卖中获胜,则第  $u+1$  家企业的竞标价格为所有中标企业的统一成交价;式(11b)表征对未中标企业而言,不存在成交价,因此成交价用无穷大表示;式(11c)表示出市场供大于求时,统一成交价为所有  $n$  家竞标主体中的最低报价  $Pb_{n,t}$ .统一价格拍卖下中标企业成交价一致,统一成交价即为市场出清价格  $CP_t$ .

当政府采取歧视价格拍卖时,所有中标企业的拍卖成交价为本企业的竞标价格,如下

$$P_{i,t} = \begin{cases} Pb_{i,t}, & \text{若 } \sum_{i=1}^u qb_{i,t} < Q_0, \sum_{i=1}^{u+1} qb_{i,t} \geq Q_0, i \leq u+1 & (12a) \\ +\infty, & \text{若 } \sum_{i=1}^u qb_{i,t} < Q_0, \sum_{i=1}^{u+1} qb_{i,t} \geq Q_0, i > u+1 & (12b) \\ Pb_{i,t}, & \text{若 } \sum_{i=1}^n qb_{i,t} < Q_0, & (12c) \end{cases}$$

市场出清价格

$$CP_t = \sum_{i=1}^{u+1} Pb_{i,t} qb_{i,t} \left( \sum_{i=1}^{u+1} qb_{i,t} \right)^{-1}. \quad (13)$$

式(12a)和式(12b)分别指出在市场供小于求时前  $u+1$  个中标企业和其他未中标企业的成交价计算方式,式(12c)计算了市场供大于求的情形.歧视价格拍卖下市场的出清价格用式(13)表示,即所有  $u+1$  个中

标企业的加权平均竞标价格(若市场供大于求,则  $u + 1 = n$ ).

统一价格拍卖和歧视价格拍卖下企业的中标数量的计算方式相同,表示如下

$$Qb_{i,t} = \begin{cases} qb_{i,t}, & Pb_{i,t} > Pb_{u+1,t} \\ qb_{i,t} \left( Q_0 - \sum_{j=1}^{w-1} qb_{j,t} \right) \left( \sum_{j=w}^{u+1} qb_{j,t} \right)^{-1}, & Pb_{w,t} = Pb_{w+1,t} \cdots = Pb_{u,t} = Pb_{u+1,t} \\ 0, & Pb_{i,t} < Pb_{u+1,t}, \end{cases} \quad (14a)$$

$$Qb_{i,t} = \begin{cases} qb_{i,t}, & Pb_{i,t} > Pb_{u+1,t} \\ qb_{i,t} \left( Q_0 - \sum_{j=1}^{w-1} qb_{j,t} \right) \left( \sum_{j=w}^{u+1} qb_{j,t} \right)^{-1}, & Pb_{w,t} = Pb_{w+1,t} \cdots = Pb_{u,t} = Pb_{u+1,t} \\ 0, & Pb_{i,t} < Pb_{u+1,t}, \end{cases} \quad (14b)$$

$$Qb_{i,t} = \begin{cases} qb_{i,t}, & Pb_{i,t} > Pb_{u+1,t} \\ qb_{i,t} \left( Q_0 - \sum_{j=1}^{w-1} qb_{j,t} \right) \left( \sum_{j=w}^{u+1} qb_{j,t} \right)^{-1}, & Pb_{w,t} = Pb_{w+1,t} \cdots = Pb_{u,t} = Pb_{u+1,t} \\ 0, & Pb_{i,t} < Pb_{u+1,t}, \end{cases} \quad (14c)$$

其中  $Qb_{i,t}$  表示竞标企业  $i$  在第  $t$  次拍卖中获得的排放权数量, 式(14a)说明当企业的竞标价格高于最低成交价  $Pb_{u+1,t}$  时, 企业中标排放权数量即为其申报数量, 式(14b)指出当有多个竞标企业都按最低成交价报价时, 其获得的排放权数量与其申报数量成正比, 式(14c)表示企业未中标的情况.

本模型用履约水平 CL 来表征所有竞标企业拍卖中标排放权弥补排放权缺口的平均程度,

$$CL = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^N Qb_{i,t} \left( \sum_{i=1}^m q_i \right)^{-1}, \quad (15)$$

其中  $\sum_{t=1}^N Qb_{i,t}$  表示竞标企业  $i$  一年中拍卖获得的碳排放权总量,  $q_i$  为竞标企业  $i$  的年度碳排放权缺口.

$\sum_{t=1}^N Qb_{i,t}/q_i$  表示竞标企业  $i$  一年中通过拍卖的排放权缺口达成率, 履约水平表示所有竞标企业的年均履约水平.

在整个碳排放权拍卖模型, 政府作为拍卖主体, 其收益与每次拍卖的成交价格和总排放权成交量相关, 政府第  $t$  次拍卖收益  $P_{g,t}$  以及政府总收益  $P_g$  表示如下

$$P_{g,t} = \sum_{i=1}^m P_{i,t} Qb_{i,t},$$

$$P_g = \sum_{t=1}^N P_{g,t}.$$

逐利的竞标主体在设法获得排放权完成履约任务的同时尽量最大化碳排放权拍卖剩余, 第  $t$  次碳排放权拍卖后竞标企业  $i$  拍卖剩余  $U_{i,t}$  以及所有企业总剩余  $U_f$  可分别表示为  $U_{i,t} = (PV_i - P_{i,t})Qb_{i,t}$ ,

和  $U_f = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^m U_{i,t}$ .

根据 Cong<sup>[18]</sup>对拍卖效率的定义, 本模型中碳排放权拍卖效率可表示为  $eff = P_g/(P_g + U_f)$ .

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真实验说明

基于 Netlogo 多 Agent 仿真平台, 本文构建了上述碳排放权拍卖模型. 为避免市场供求情况、拍卖方式等因素对碳排放权拍卖结果的影响, 本文将二者作为两个控制变量, 设计四种实验情景, 为减少随机干扰因素对实验结果的影响, 增加实验的可信度, 多次重复实验, 系统运行 1 次表示 1 个履约年的 4 次拍卖, 每种实验情景均在拍卖仿真系统中运行 90 次: 其中包括 1 个基准组和 2 个实验组各重复运行 30 次, 四种实验情景总计仿真 360 次.

#### 3.2 实验情景

本实验分为一个对照组和两个实验组, 对照组为 20 家竞标主体全部采用零智能策略(无学习行为), 两个实验组为 20 家竞标主体分别全部采用自适应学习型报价策略和 PSO 学习型报价策略.

两种拍卖方式(统一价格拍卖和歧视性价格拍卖)、两种市场供需关系(供小于求和供大于求), 其中假设实验对象为 20 个竞标主体, 每个竞标主体年度碳排放权缺口  $q_i$  服从均匀分布  $q_i \sim U[30, 50]$ , 则年度市场总排放权需求量服从  $U[600, 1\ 000]$ , 假设每年 4 次拍卖, 则平均每次拍卖市场总需求量服从  $U[125, 250]$ , 选取每次排放权拍卖总量  $Q_0 = 100$  和  $Q_0 = 400$  来表征市场供小于求和市场供大于求两种实验情景.

### 3.3 仿真实验及结果分析

根据 EUETS 以及我国广东试点的实践经验, 假设每次政府保留价  $RP_t = 16$ , 三组实验的企业数量  $m_1 = m_2 = m_3 = 20$  三组对比实验. 所有控排企业  $i$  对碳排放权的私人估值  $PV_i$  都服从均匀分布  $PV_i \sim U[20, 30]$ , 年排放权缺口  $q_i$  满足  $q_i \sim U[30, 50]$ . 惯性因子  $w = 0.8$ , 加速因子  $C_1 = 2, C_2 = 2$ , 随机数  $R_1$  和  $R_2$  服从 0 到 1 上的均匀分布<sup>[30]</sup>, 初始速度  $X_{i,t} = 0$ .

#### 3.3.1 统一价格拍卖下竞标主体学习行为对拍卖结果的影响

本实验通过参数设置模拟了市场供小于求和市场供大于求两种情景, 从市场出清价格、企业拍卖履约水平和拍卖效率三个维度比较对照组和实验组. 实验的仿真系统参数设置界面如图 3 所示, 统一价格拍卖下实验结果如图 4~图 6 所示.

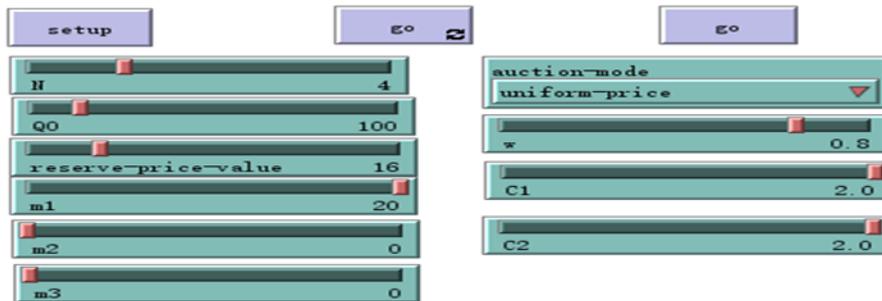


图 3 统一价格拍卖下拍卖系统参数设计界面

Fig.3 The interface of auction system parameter under the uniform-price auction

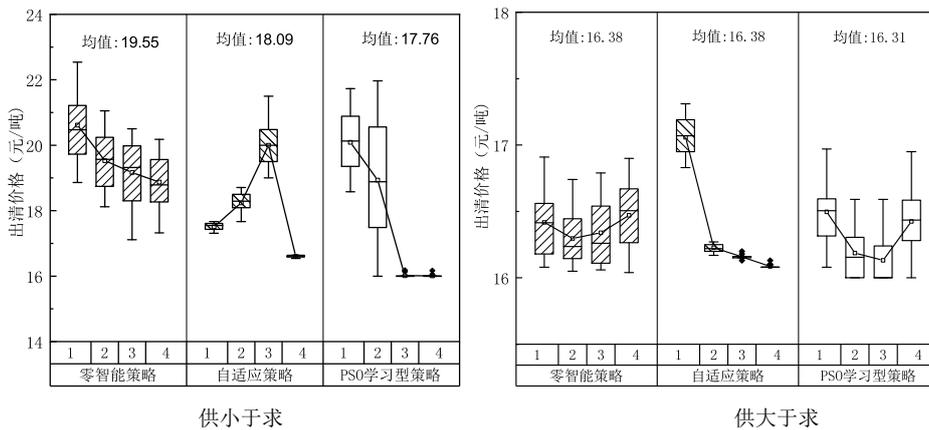


图 4 统一价格拍卖下三种竞标策略的市场出清价格

Fig.4 Market clearing prices for bidding strategies under uniform-price auctions

#### 1) 市场出清价格

图 4 中每种策略各仿真了 30 个履约年, 箱体竖线的两端表示 30 次仿真中出清价格的最大和最小值, 箱体上下边分别为出清价格的上、下四分位, 折线表示平均值. 由图 4 可知, 针对同一种报价策略, 市场供小于求时市场出清价格远高于市场供大于求的情况; 无论市场供求关系如何, 竞标企业采用自适应策略和 PSO 学习型报价策略的市场出清价格均值都略低于采用零智能报价策略, 由于出清价格均值相差不大, 为增加分析结果的有效性和显著性, 对三种报价策略下每年 4 次拍卖的平均市场出清价格进行单因素方差分析.

表 1 是两种不同市场供需情况下的方差分析结果, P-值都小于 0.05, 说明在统一价格拍卖下, 竞标主体有无学习行为会显著影响市场的出清价格, 多重比较结果如表 2 所示。

表 1 单因素方差分析(平均出清价格)  
Table 1 One-way analysis of variance of average annual clearing price

		平方和	df	均方	F	显著性		平方和	df	均方	F	显著性	
供小于求	组间	36.099	2	18.049	65.964	0.000	供大于求	组间	0.070	2	0.035	5.036	0.010
	组内	15.596	57	0.274	—	—		组内	0.397	57	0.007	—	—
	总数	51.695	59	—	—	—		总数	0.467	59	—	—	—

表 2 单因素多重比较(平均出清价格)  
Table 2 Multiple comparison dependent variable: Average annual clearing price

	(I) 报价策略	(J) 报价策略	均值差(I-J)	标准误	显著性	95%置信区间	
						下限	上限
供小于求	零智能策略	自适应策略	1.463 87*	.15 884	0.000 1	0.066 1	1.861 6
		PSO 学习策略	1.679 9*	0.204 6	0.000 0	1.180 7	2.179 1
	自适应策略	零智能策略	-1.463 9*	0.158 8	0.000 0	-1.861 6	-1.066 1
		PSO 学习策略	0.322 8	0.135 1	0.063 0	-.0145 0	0.660 0
	PSO 学习策略	零智能策略	-1.67987*	0.204 6	0.000 0	-2.179 1	-1.180 7
		自适应策略	-.322 8	0.135 1	0.063 0	-.660 0	0.014 5
供大于求	零智能策略	自适应策略	-.001 0	0.028 8	0.999 0	-0.072 8	0.070 8
		PSO 学习策略	0.072 0	0.030 5	0.063 0	-.003 2	0.147 2
	自适应策略	零智能策略	0.001 0	0.028 8	0.999 0	-0.070 8	0.072 8
		PSO 学习策略	0.073 0	0.018 1	0.001 0	0.028 7	0.117 3
	PSO 学习策略	零智能策略	-.0720 0	0.030 5	0.063 0	-0.147 2	0.003 2
		自适应策略	-0.073 0	0.018 1	0.001 0	-0.117 3	-0.028 7

由表 2 中均值差和 P-值得到: 当市场供小于求时, 两种报价学习策略的出清价格无显著差异, 但都显著低于无报价学习行为的情况. 这一点不难理解, 为最大化自己的拍卖剩余, 竞标主体采取有报价学习行为时, 平均报价低于没有学习行为的随机报价, 出清价格则更低. 然而, 当市场供大于求时, 采取三种报价策略的市场出清价格差异不显著. 因为当碳排放权充裕时, 全部中标, 统一价格拍卖下出清价格为所有随机报价中的最低价, 无论竞标主体有无报价学习行为, 所有人中最低报价都接近政府保留价, 出清价格差异不显著。

### 2) 履约水平

从图 5 可知, 当竞标企业采用后两者有学习行为的报价策略时, 年均履约水平要明显高于采用无学习报价策略. 这是因为从图 4 可以看出, 企业有报价学习行为时报价更低, 且根据式  $qb_{i,t} = RN_{i,t}(PV_i - Pb_{i,t}) / (PV_i - RP_t)$ , 可知两种学习策略下企业拍卖的申报数量高于零智能策略. 进而由式(15)可得, 自适应和 PSO 学习型策略下, 企业中标数量更高的概率更大, 相应地年均履约水平更高。

### 3) 拍卖效率

由图 6 可知, 当市场供小于求的时候, 零智能报价策略的拍卖效率高于后两者有学习行为的报价策略; 当市场供大于求时, 差异不明显. 因此对供大于求的情况进一步做单因素方差分析。

从表 3 的 P-值  $0.023 < 0.05$  可知, 统一价格拍卖下当市场供大于求时, 三种报价策略的拍卖效率差异显著. 但从表 4 的均值差和显著性两项可以得出, 无学习行为的报价策略与有学习行为的报价策略在拍卖效率上不存在显著差异. 因为市场供小于求时, 有学习行为的报价策略都能显著降低碳排放权的市场出清价格, 降低企业成本, 结合式  $eff = P_g / (P_g + U_f)$  可知, 报价学习行为可以降低拍卖效率. 然而当市场碳排放权相对充裕时, 有无学习行为企业成本差异不大, 拍卖效率差异不显著。

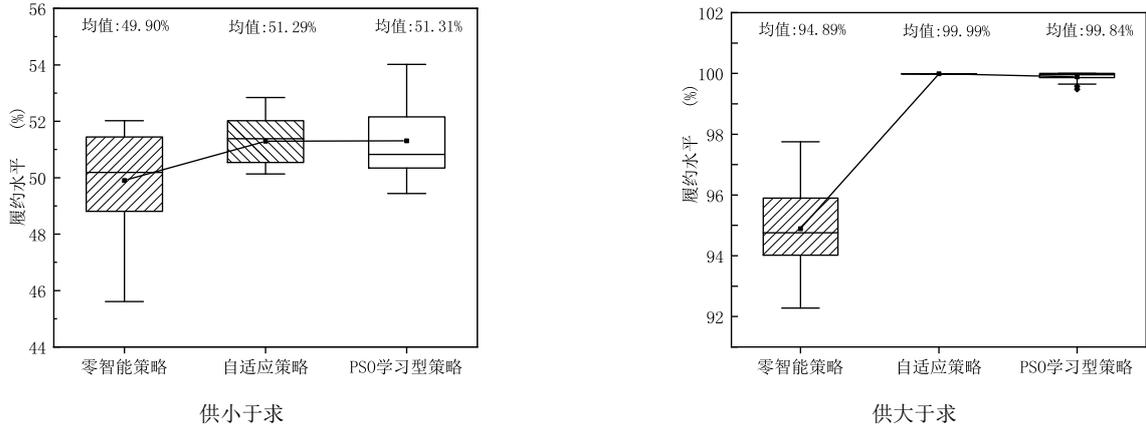


图5 统一价格拍卖下三种报价策略的企业年均履约水平

Fig.5 Average annual compliance levels of bidding strategies under a uniform-price auctions

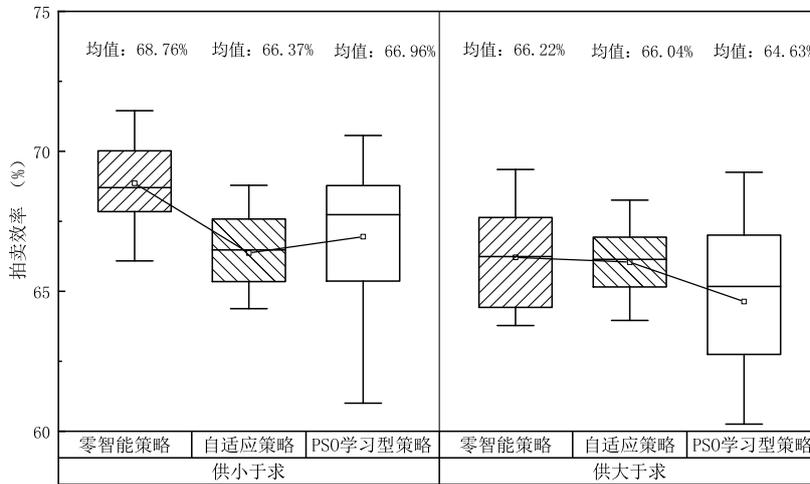


图6 统一价格拍卖下三种竞标策略的拍卖效率

Fig.6 Auction efficiency of bidding strategies under a uniform-price auctions

表3 拍卖效率单因素方差分析(供大于求)

Table 3 One-way analysis of variance of auction efficiency (supply exceeding demand)

	平方和	df	均方	F	显著性
组间	30.093	2	15.046	4.039	.023
组内	212.361	57	3.726	—	—
总数	242.454	59	—	—	—

表4 单因素方差多重比较(拍卖效率)

Table 4 Multiple comparison dependent variable: Auction efficiency

(I) 报价策略	(J) 报价策略	均值差(I-J)	标准误	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
零智能策略	自适应策略	0.179 50	0.476 96	0.925 0	-0.989 8	1.348 8
	PSO 学习策略	1.584 0	0.697 0	0.074 0	-0.125 1	3.293 1
自适应策略	零智能策略	-0.179 5	0.477 0	0.925 0	-1.348 8	0.989 8
	PSO 学习策略	1.404 5	0.635 9	0.088 0	-0.172 2	2.981 2
PSO 学习策略	零智能策略	-1.584 0	0.697 0	.074	-3.2931	.1251
	自适应策略	-1.404 5	0.635 9	0.088 0	-2.981 2	0.172 2

### 3.3.2 歧视价格拍卖下竞标主体学习行为对拍卖结果的影响

歧视价格拍卖实验下同样仿真了供小于求( $Q_0 = 100$ )和供大于求( $Q_0 = 400$ )两种情景, 实验的系统仿真界面如下图 7 所示, 其中拍卖方式为歧视价格拍卖, 其他参数设定与统一价格拍卖一致.



图 7 歧视价格拍卖下拍卖系统参数设计界面

Fig. 7. The interface of auction system parameter under the discriminatory-price auction

#### 1) 市场出清价格

从图 8 中三种策略下每年 4 次拍卖平均出清价格连线可以看出, 无论供大于求还是供小于求, 无报价学习行为的拍卖出清价格远高于两种有学习行为的情况. 因为歧视价格拍卖下中标价格为中标者自己的报价, 那么若竞标主体都无报价学习行为, 随机报价使得中标价格有高有低, 而若竞标主体有报价学习, 所有人平均报价都较低, 根据式(13), 歧视价格拍卖下出清价格等于加权平均中标价格, 那么有报价学习行为显著低于无报价学习行为的情况.

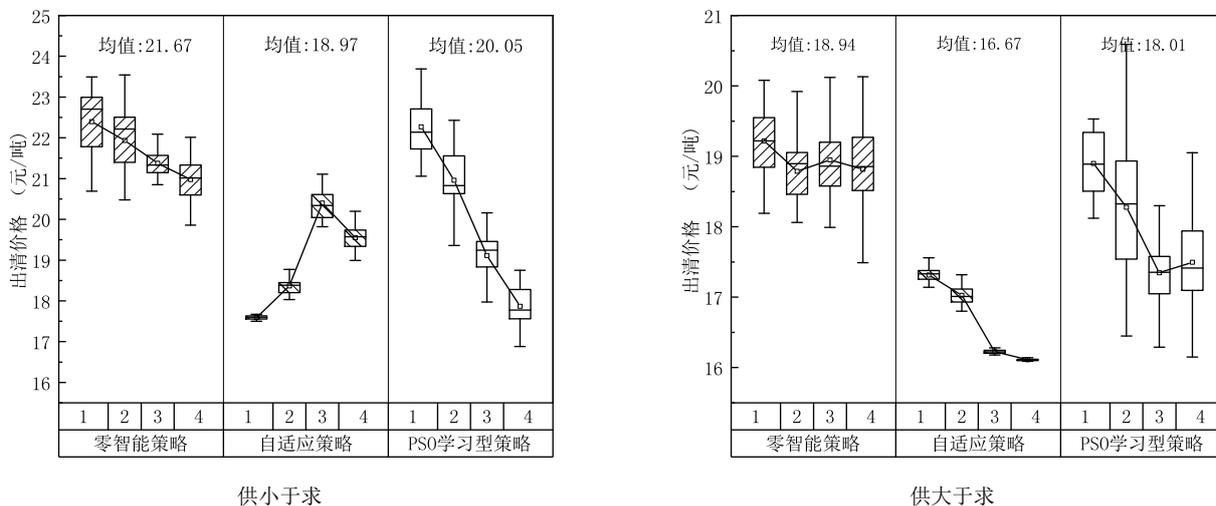


图 8 歧视价格拍卖下三种竞标策略的市场出清价格

Fig.8 Market clearing prices of bidding strategies under discriminatory-price auctions

#### 2) 履约水平

从图 9 中可清楚地看到, 无论市场供大于求还是供小于求, 采用有学习行为的报价策略总能提高竞标主体的年均履约水平.

#### 3) 拍卖效率

由图 10 可知, 歧视价格拍卖下, 无论市场供求关系如何, 就拍卖效率而言, 采用有学习行为的报价策略都要低于没有学习行为的报价策略.

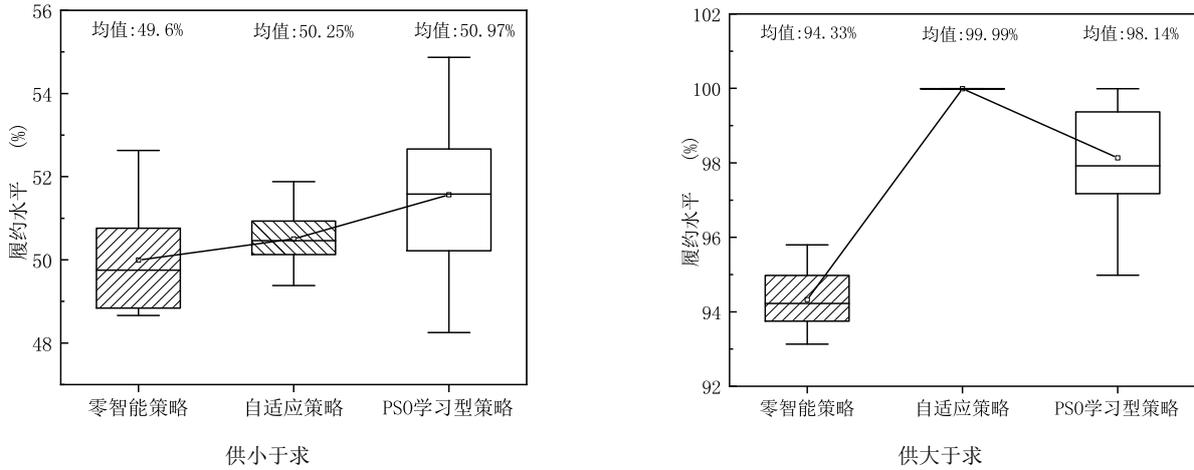


图 9 歧视价格拍卖下三种竞标策略的企业年均履约水平

Fig.9 Compliance level of bidding strategies under discriminatory-price auctions

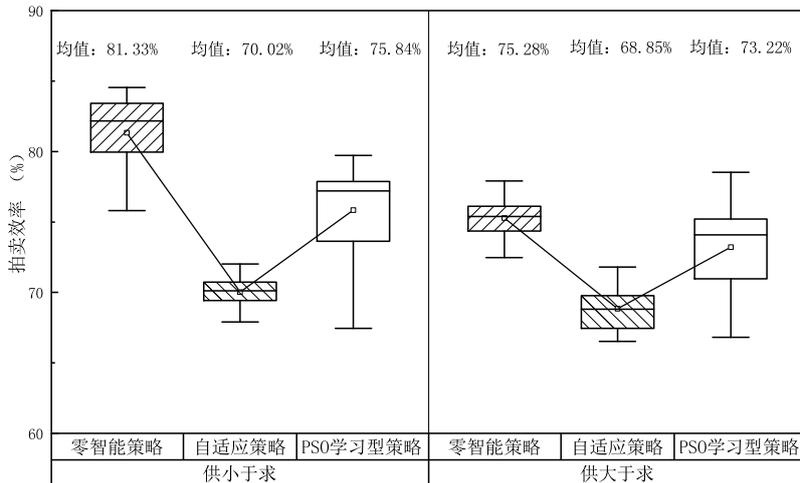


图 10 歧视价格拍卖下三种竞标策略的拍卖效率

Fig.10 Auction efficiency of bidding strategies under discrimination price auction

### 3.3.3 实验结果分析

上述实验分别在统一价格和歧视价格两种拍卖定价方式下对比分析了竞标 Agent 两种有学习行为的报价策略对碳排放权市场出清价格、企业年均履约水平和拍卖效率的影响. 实验结果可从三个方面总结如下:

#### 1) 市场出清价格

对比图 4 和图 8 可以发现: 无论竞标主体是否有学习行为以及市场供需情况如何, 采用同一种报价策略, 歧视价格拍卖的市场出清价格都要高于统一价格拍卖. 两种拍卖方式下, 市场供小于求时碳排放权出清价格都高于市场供大于求的情况. 当市场供小于求时, 无论政府采取统一价格拍卖还是歧视价格拍卖, 竞标主体采用两种有学习行为的报价策略都能显著降低碳排放权的市场出清价格. 当市场供大于求时, 歧视价格拍卖下竞标主体学习行为可以降低市场出清价格, 但是统一价格拍卖下有无学习行为对出清价格的影响不显著. 只有供大于求时, 统一价格拍卖可以减少竞标主体学习行为对出清价格的影响.

#### 2) 履约水平

对比图 5 和图 9, 实验结果表明, 两种拍卖方式下, 不论市场供需关系如何, 当企业有竞价学习行为时, 竞标主体年均履约水平显著高于没有学习行为的情况.

### 3) 拍卖效率

歧视价格拍卖下三种竞标策略的拍卖效率如图 10 所示. 对比图 6 和图 10, 无论竞标主体是否有学习行为以及市场供需情况如何, 采用同一种报价策略, 歧视价格拍卖的拍卖效率都要高于统一价格拍卖. 两种拍卖方式下, 市场供小于求时拍卖效率都高于市场供大于求的情况. 当市场供小于求时, 无论政府采取统一价格拍卖还是歧视价格拍卖, 竞标主体只要采用两种有学习行为的报价策略都会显著降低碳排放权的拍卖效率. 当市场供大于求时, 统一价格拍卖下, 有无学习行为, 拍卖效率差异不显著. 相反, 歧视价格拍卖下, 报价学习行为可以显著降低拍卖效率, 换言之, 供大于求时, 统一价格拍卖可以减少报价学习行为对拍卖效率的影响.

综上所述, 从企业的角度来说, 报价学习行为不仅大多数情况下可以显著降低碳排放权的出清价格(除统一价格拍卖且市场供大于求的情况外), 降低企业经济成本, 而且可以显著提高企业年均履约水平. 因此, 对于有意向参与碳排放权拍卖的控排企业, 一方面加强本企业碳排放权收支预算管理, 提高企业的排放权履约的自适应能力; 另一方面加大企业对于碳市场交易信息搜集的人力和财力的投入, 增强企业对拍卖市场信息的敏锐洞察, 培养企业从事碳交易的工作人员对交易数据的分析和市场学习能力或者聘请专业团队托管本企业碳交易业务, 都能有效降低企业碳排放权成本的同时提高企业拍卖市场排放权履约水平.

从政府的角度来说, 在拍卖方式选择方面, 在市场配额供求关系不明确的情况下, 若考虑政府收益和拍卖效率, 则歧视价格拍卖优于统一价格拍卖. 若考虑企业成本和公平性, 统一价格拍卖优于歧视价格拍卖. 因为统一价格下碳排放权出清价格低, 企业经济压力相对较小, 在碳交易机制实施初期, 统一价格拍卖减少控排企业对碳排放权有偿分配的抵制情绪, 提高企业参与碳排放权拍卖的积极性. 同时, 统一价格拍卖下竞标者通过学习行为获得的超额收益更少, 对拍卖效率的影响也不显著, 因此统一价格拍卖对规模小、无报价学习能力的企业更加公平. 另外, 在排放权拍卖总量设定方面, 实验结果表明市场供小于求比供大于求时, 市场出清价格和拍卖效率都更高, 因此当中国被纳入强制减排国以后, 政府可以逐步降低拍卖的排放权总量, 减少市场碳排放权的供给, 逐渐扭转当前碳市场普遍供大于求, 交易量低迷, 市场冷清情况, 提高碳排放权拍卖的政府收益和拍卖效率.

## 4 结束语

针对碳排放权序贯拍卖过程中竞标主体的报价学习行为, 本文在 ZI-C 零智能报价策略的基础上分别引入和改进了两种报价学习策略模型, 构建了 Netlogo 多 Agent 仿真系统来模拟碳排放权拍卖市场. 并通过多组仿真实验分析, 从市场出清价格、企业履约水平和拍卖效率的角度综合考察了竞标主体报价学习行为对企业以及政府的影响, 为参与碳排放权拍卖的控排企业优化竞标策略, 以及政府选择拍卖方式提供了参考依据.

与现有研究不同, 本文的竞标主体报价学习策略模型, 考虑了我国碳排放权拍卖市场中竞标主体的履约属性和自我、群体报价学习能力, 弥补了传统拍卖均衡研究中对动态学习行为的忽视. 同时, 采取连续型报价策略函数, 拓展了现有研究中报价策略离散的理论假设. 另外, 基于 Netlogo 的拍卖仿真克服了现有均衡分析模型中仅考虑单次拍卖以及竞标者单一需求量的理想假设以及求解困难的问题. 但是, 本文仅考虑了碳排放权初始分配中的拍卖市场, 未考虑二级市场碳价与拍卖市场碳价的相互影响, 因此考虑碳排放权交易一、二级市场联动机制是后续研究的方向之一.

### 参考文献:

- [1] Li Y. The valuation relevance of greenhouse gas emissions under the European Union carbon emissions trading scheme. *European Accounting Review*, 2014, 24(3): 551-580.

- [2] Newell R G, Pizer W A, Raimi D. Carbon markets 15 years after Kyoto: Lessons learned, new challenges. *Journal of Economic Perspectives*, 2013, 27(1): 123–146.
- [3] 徐 静, 郭松睿, 任庆忠. 基于混合能源的企业碳减排决策研究. *系统工程学报*, 2017, 32(6): 732–737.  
Xu J, Guo S R, Ren Q Z. Enterprises carbon emission reduction strategy based on mixed energy. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(6): 732–737. (in Chinese)
- [4] Anderson B, Maria C D. Abatement and allocation in the pilot phase of the EUETS. *Environmental & Resource Economics*, 2011, 48(1): 83–103.
- [5] Parry I W H, Iii R C W, Goulder L H. When can carbon abatement policies increase welfare: The fundamental role of distorted factor markets. *Journal of Environmental Economics & Management*, 1999, 37(1): 52–84.
- [6] Rao C, Li P. Multi-stage sequential uniform price auction mechanism for divisible goods. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(15): 6105–6114.
- [7] Wolfstetter E. Auctions: An introduction. *Journal of Economic Surveys*, 1996, 10(4): 367–420.
- [8] 胡二琴, 赵 勇, 陈 莹, 等. 序贯拍卖中报价排序信息披露的研究. *系统工程学报*, 2016, 31(3): 317–327.  
Hu E Q, Zhao Y, Chen Y. Study of bids' ordinal ranks information disclosure in sequential auctions. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(3): 317–327. (in Chinese)
- [9] 韩晓虎. 序贯拍卖理论若干问题研究. 北京: 对外经济贸易大学, 2016.  
Han X H, Study on Some Issues in Sequential Auction Theory. Beijing: University of International Business and Economics, 2016. (in Chinese)
- [10] 陈 欣, 刘 明, 刘 延. 碳交易价格的驱动因素与结构性断点: 基于中国七个碳交易试点的实证研究. *经济问题*, 2016(11): 29–35.  
Chen X, Liu M, Liu Y, et al. Price drivers and structural breaks in China's carbon prices: Based on seven carbon trading pilots. *On Economic Problems*, 2016(11): 29–35. (in Chinese)
- [11] Feng J, Chatterjee K. Simultaneous vs. sequential sales: Bidder competition and supply uncertainty. *Decision Support Systems*, 2010, 49(3): 251–260.
- [12] 王素凤, 杨善林. 考虑保留价影响报价策略的碳排放权拍卖模型. *管理工程学报*, 2016, 30(2): 181–187.  
Wang S F, Yang S L. Carbon emission rights auction considering the influence of reserve price on bidding strategies. *Journal of Industrial Engineering & Engineering Management*, 2016, 30(2): 181–187. (in Chinese)
- [13] Jiang M X, Yang D X, Chen Z Y, et al. Market power in auction and efficiency in emission permits allocation. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(Pt 3): 576.
- [14] Wei Y M. Auction design for the allocation of carbon emission allowances: Uniform or discriminatory price. *International Journal of Energy & Environment*, 2010, 1(3): 533–546.
- [15] Liu Z, Yan J, Shi Y, et al. Multi-agent based experimental analysis on bidding mechanism in electricity auction markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 43(1): 696–702.
- [16] Vickrey W. Counterspeculation, Auctions and competitive sealed tenders. *Journal of Finance*, 1961, 16(1): 8–37.
- [17] Criesmer J H, Levitan R E, Shubikt M. Toward a study of bidding processes, Part IV: Games with unknown costs. *Naval Research Logistics*, 1967, 14(4): 415–433.
- [18] Cong R G, Wei Y M. Experimental comparison of impact of auction format on carbon allowance market. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 4148–4156.
- [19] Erev I, Roth A E. Predicting how people play games: Reinforcement learning in experimental games with unique, mixed strategy equilibria. *American Economic Review*, 1998, 88(4): 848–881.
- [20] 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. *中国管理科学*, 2017(3): 76–84.  
Zheng J J, Wang X M, Zhu D S, et al. Evolution of strategies in emissions permits auction on small-world networks with learning speed. *Chinese Journal of Management Science*, 2017(3): 76–84. (in Chinese)
- [21] 郑君君, 李润发, 李诚志, 等. 基于迭代组合拍卖的排污权交易影响因素研究. *技术经济*, 2018(1): 76–83.  
Zheng J J, Li R F, Li C Z, et al. Research on factors influencing emission trading based on iterative combined auction. *Technology Economics*, 2018(1): 76–83. (in Chinese)
- [22] Tang L, Wu J, Yu L, et al. Carbon emissions trading scheme exploration in China: A multi-agent-based model. *Energy Policy*, 2015, 81: 152–169.
- [23] Tang L, Wu J, Yu L, et al. Carbon allowance auction design of China's emissions trading scheme: A multi-agent-based approach. *Energy Policy*, 2017, 102:30–40.

- [24] Damianov D S, Becker J G. Auctions with variable supply: Uniform price versus discriminatory. *European Economic Review*, 2010, 54(4): 571–593.
- [25] Gode D K, Sunder S. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality. *Journal of Political Economy*, 1993, 101(1): 119–137.
- [26] Farnia F, Frayret J M, Lebel L, et al. Multiple-round timber auction design and simulation. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(1): 129–141.
- [27] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization // *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, 2011: 1942–1948.
- [28] Shi X H, Liang Y C, Lee H P, et al. An improved GA and a novel PSO -GA-based hybrid algorithm. *Information Processing Letters*, 2005, 93(5): 255–261.
- [29] Zhu X B. Strategic learning in multiple equilibria for double bargaining mechanism by PSO . *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 571–572:258–261.
- [30] 郑君君, 张 平, 饶从军, 等. 基于Swarm的股权拍卖机制设计与仿真研究. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(4): 883–891.  
Zheng J J, Zhang P, Rao C J, et al. Research on mechanism design and simulation of equity auction based on Swarm. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2014, 34(4): 883–891. (in Chinese)

### 作者简介:

胡东滨(1969—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 决策理论与方法, 资源优化配置与可持续发展, Email: hdbin@163.com;

胡紫娟(1991—), 女, 湖北孝感人, 硕士, 研究方向: 决策理论与方法, 资源优化配置与可持续发展, Email: 161611114@csu.edu.cn;

陈晓红(1963—), 女, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向: 决策理论与决策支持系统, Email: csu\_cxh@csu.edu.cn.