**Multi-stage evolutionary game analysis of carbon emission trading among enterprises**

a Department of Information Management, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

**摘要：**随着碳排放交易体系的发展成熟，如何更有效地达成碳排放权交易对国家低碳经济发展、企业转型升级及绿色技术创新起到极其重要的作用。碳排放权交易能够优化环境容量和资源配置效率，降低全社会污染控制成本。然而目前利用博弈研究碳排放交易主要集中不同级别的双方或多方群体之间的监管博弈，缺乏二级交易市场中同一级别群体之间的多阶段性竞价博弈研究。为此，本文构建了企业之间的、基于讨价还价的多阶段演化博弈模型，分析讨论了企业之间碳排放权交易博弈的稳定均衡点，解决交易过程中的最优策略选择问题，为实际行业碳减排提供了有效的策略建议。研究结果发现，

**关键词**：碳减排 多阶段演化博弈 讨价还价动态博弈 碳排放权交易

## Introduction

二氧化碳排放增加导致的全球变暖已成为世界面临的严峻挑战之一，为了遏制气候改变和环境污染，低碳管理发展必不可少（Xuan et al., 2020）。自1992年《联合国气候变化框架公约》签署以来，世界各国采取了一系列节能减排政策，其中碳排放权交易已成为各国实行低碳经济和节能减排的一个重要环境经济手段。实际上从2006年，中国已经超过美国成为世界上最大的碳排放国，占全球碳排放总量的27.6%（Zhang et al., 2020a）。根据Carbon Brief的计算，2018年中国总CO2排放量达到101亿吨，比美国和欧盟（EU）的总和多出12亿吨，这使中国的碳排放比例又上升到27.8%（Zhang et al.，2020a）。在此严峻的碳排放形势背景下，作为应对气候变化的积极参与者，中国制定了一系列更加雄心勃勃的节能减排目标。

2020年习主席在领导人气候峰会上正式宣告：中国将在2030年之前实现碳排放峰值，并在2060年之前实现碳中和。为了履行这一减少碳排放的国际承诺，早在2007年，中国便实施排污权交易制度旨在减少有害废气的排放，这是我国在排污权交易制度上的重大突破。2011年，国家发展改革委印发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》，指出拟于2013年建立包括北京市、上海市、天津市、重庆市、深圳市、广东省和湖北省共7个试点碳市场。中国曾实施过六年的实施清洁发展机制（CDM），因此在污染减排中引入市场机制有一定的经验可循（Wang and Hu，2021）。值得一提的是，这七个试点计划具有不同的特点，并且独立运行（Swartz and IETA，2016）。它们的建立是全国碳交易市场建设计划的一部分，旨在为国家碳交易市场的建设积累经验。建立高效成熟的[碳交易](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-trading" \o "Learn more about carbon trading from ScienceDirect's AI-generated Topic Pages)体系对于优化资源配置，降低经济成本，实现经济可持续增长是至关重要的（Fang et al.，2018）。

碳排放权交易政策是我国一项降低碳排放的重要举措，丰富了中国环境治理的手段，改变了之前主要靠对纳税人防治污染资产的税收减免以及直接对污染物进行征税的相对较单一的税收优惠政策（Zhan et al.，2021）。我国碳排放权交易采用的是总量管制和排放权交易的政策，它是最有效的减排机制之一，并已得到广泛实施（Sda et al.，2020）。碳排放权交易的基本思想是政府根据减排需要和可能设置排放上限，通过一定的计算方法将碳排放总量分配给企业，允许碳排放权在各企业之间进行交易，通过一系列交易机制与市场平台，在相关规则约束下，企业可以根据自身的运转情况选择购买或者出售配额（Jiang，2021），促使企业减少碳排放。另外，碳排放权交易政策的功能不止局限在降低碳排放上，在激发组织创新和改变行业结构方面也有一定的作用。碳交易政策在促进绿色经济的发展基础上，能够引导相关行业和企业转型升级，实现经济的高质量发展。同时有效实现“减排促经”效果，提升碳生产率（Fan，2021）。

碳交易计划主要通过碳交易市场实现政府对企业的配额以及企业与企业间排污权的流通，相应将排污权交易市场分为一级市场和二级市场。近年来，博弈论已被广泛应用于碳减排的研究领域，主要集中于碳减排决策优化，常见于一级市场中政府之间或与企业不同级别群体之间，解决政府对企业的监管及初始排污权的优化分配中。例如Chen et al.（2021）为了解决企业绿色低碳创新的选择问题，构建了企业与政府之间的演化博弈模型以及制造企业之间的演化博弈模型，并通过仿真比较不同动静态模型，从而确定最优的碳税和补贴机制。Halat et al.（2019）应用了政府与多阶段绿色供应链（GSC）之间八种情景下的动态博弈，旨确定政府决策对GSC遵守碳法规的重要性，并分析了这些法规对成本和碳排放的影响。Huang et al.（2020）考察政府与多个工业企业之间的减排博弈问题，比较政府合作和不合作两种情况下对政企最终决策的影响。探究出地区之间合作减排激励补偿机制。Yang et al.（2019）通过构建体现公平原则的碳排放量初分配和体现着碳排放权市场效率原则的再分配博弈模型，利用市场实现资源和产权的合理分配，给出国际间合作建议，激励各国国家都实行强力减排。Ming et al.（2021）在国际碳排放背景下分析了国际汽车碳排放交易市场中各参与国的博弈机制和偏好。通过建立和求解一个博弈模型，揭示了每个参与者的主导策略也就是偏好对于完善国际碳排放交易机制是具有启发性的，最终实现碳排放目标。为了调动不同减排实体在排污权交易过程中的积极性，Ye（2021）提出了一种多人非对称纳什讨价还价模型，以确保所有实体在谈判后都能获得更多初始排污权配额。Wei and Wang（2021）通过考虑供应链的成本分摊契约和分散、集中决策策略，分别采用三种差分博弈法研究碳减排技术创新与政府干预的相互作用，证明了去中心化决策下碳减排技术创新的最佳水平和政府干预的最佳水平与没有成本分摊的集中式情况相同，并且只有成本分摊比例达到一定幅度的情况下，二者的最佳水平才会提高。Sun et al.（2020）利用演化博弈模型分析了碳交易下政府监管选择和企业创新选择的互动机制，探讨如何实现必要监管强度下碳规制政策促进企业低碳创新的政策路径，随后采用数值仿真技术模拟相关因素对均衡点的影响，发现低碳创新成本是影响企业创新行为是否发生的关键性变量，向政府提供了政策建议。

其次，二级市场在排污权交易中占有更为重要的位置，不仅可以提高排污单位减排的积极性，还能使环境资源在排污单位之间有效流动，促使其配置最优化（Cao et al.，2020）。所以部分文献以二级市场交易下的参与个体为研究对象，主要针对供应链中的制造商和供应商交易过程中的相关问题建立不同的博弈模型。例如动态博弈（Stackelberg）模型下探讨供应链环节下碳排放权交易价格等因素对减排管理决策的影响：Shi et al.（2020）以销售商驱动的低碳化再制造闭环供应链为研究对象，通过考虑资源-产品-碳排放权的三维交易模式，分析研究了低碳产品市场和废旧产品市场中低碳产品销售价、碳交易价格、低碳废旧产品回收价格等重要变量和节点企业利润以及基于Stackelberg博弈下整个链条期望效用的变化规律，从而实现验证了低碳再制造闭环供应链模型的有效性，对企业的协同减排具有启发性。Wang et al.（2019）考虑了一个由制造商和零售商组成的动态供应链，在Stackelberg差分博弈模型的基础上和不同碳权价格下，研究制造商分别以短视和远见的方式行事，对于相对较高的碳排放许可价格，制造商采用短视策略会让整个供应链减排表现更好，当碳排放许可证价格相对较高时有利于销售商。liu et al.（2021）利用Stackelberg博弈模型获得了每种模式的最优决策，进行对比分析，研究了低碳效应和碳价格对三种模式均衡结果的影响，为整个低碳供应链企业的减排战略提供见解。Ren（2019）构建了碳排放权交易政策下供应商主导和制造商主导的供应链利润模型，运用动态博弈找到了最优单位减排量。同时还讨论了低碳偏好和碳权交易价格对模型解的影响。Xing et al.（2020） 利用斯塔克尔伯格博弈找到由一个制造商、一家零售商和两个竞争的第三方回收商组成的供应链均衡决策，研究了碳排放交易价格变化、消费者低碳意识、碳排放和第三方回收商竞争所带来的影响。合作博弈主要关注供应链下交易对象利润分配或合作效益等方面：Zheng et al.（2019）研究了由制造商、分销商和零售商组成的三级闭环供应链（CLSC）下，由于零售商的公平性导致的利润分配不公问题，通过合作博弈论确定促进合作和实现剩余利润公平分配的可能途径。为了达成可持续发展的供应链，Xu et al.（2016）应用合作博弈理论优化设计石油化工行业供应链，将碳交易政策纳入多周期优化供应链模型，其中除了考虑经济优势外，还探索公司间横向合作可能带来的环境效益。

还有少量的研究通过演化博弈求得二级市场下群体间特定交易状态下进化决策的稳定解。Tong et al.（2019）开发了一个进化博弈(EG)模型来检查强大的零售商和制造商的行为演变，以分析几个变量的影响，如排放上限，碳信用的市场价格，消费者对低碳产品的偏好，对制造商和零售商的行为。Zhu et al.（2013）基于演化博弈理论分析了两家企业之间排污权竞争博弈的过程，发现博弈最终趋于动态平衡状态，指出应该全面采用市场分配资源的方式。Zhao et al.（2016）基于演化博弈分析了有限理性企业之间相互博弈时的减排行为选择，并对影响政减排策略选择的因素如单位碳减排成本、政府补贴进行分析。Wu et al.（2017）提出运用经验加权吸引力学习理论，为西北小世界网络中具有不同能耗水平的企业构建演化博弈模型，并研究面对渐进式碳排污权政策时其战略选择。Wan et al.（2021）以蓝碳封存为经济增长提供了新的途径和机遇为出发点，开发了一个三方演化博弈模型：海洋牧场公司，碳交易平台和政府。在模型中分析三者的进化稳定战略，同时讨论了碳交易价格，政府补贴以及消费者支付蓝碳的意愿对策略选择的影响，为提高蓝碳封存利用、发展蓝碳封存交易市场、设计政府补贴机制提供依据。

但是排污权在二级交易市场中往往存在难以定价等问题：Qiu et al.（2016）提出占有优势的企业会利用市场力量操纵价格，具体表现为合谋行为，即蓄意压低或者提高价格，或形成合谋小团体，操纵排污指标的市场价格，控制供需，导致排污权交易市场的交易价格不能真实地反映排污权的价格，损害其他正常交易者的收益。Luo（2017）表明碳市场目前尚未把握碳排放权交易的真实价值, 由于各种数据缺失、致使碳排放交易权的价格受人为因素的干扰, 出现市场价格高于真实价值, 市场活力无法真正被激发出来。Pan et al.（2020）等认为在碳排放影响下，制造商需要根据碳排放权最佳定价考虑是否实施绿色燃气轮技术，构建了一个考虑绿色消费偏好的两方（一个绿色制造商，一个非绿色制造商）博弈模型，发现当碳价格足够高时，制造商排放成本较高，此时会减少碳排放。所以合理的交易出价、促使双方达成交易对于充分发挥二级市场机制，实现高效的碳减排管理尤为重要。

在文献回顾部分，我们发现目前对碳排放权交易中二级市场下企业交易双方竞价下演化稳定相关问题的研究特别不充分，大部分忽略了普通工业企业在排污权交易中会讨价还价情况这一事实。考虑在现实中，买卖双方的出价往往是一个短期动态过程，二者之间的竟价一般不是一次而是多次的这种情景下，多阶段演化博弈便可以提供全新的视角将讨价还价这种经济现象纳入模型中，在一定假设前提下，在交易双方动态谈判过程中提供服务，同时可以从微观层面讨论主要影响因素，给出均衡解和策略选择，促使企业达成交易。所以为了更好地为碳排放权交易二级市场提供优化决策支持，弥补前人研究的空白之处，本文拟构建用于工业企业之间碳排放权交易的演化博弈模型，该模型在讨价还价动态博弈的基础上，融合多阶段演化博弈方法，讨论如何使交易群体做出最优买卖价格、最优交易量选择、合适的耐心程度等策略选择，实现双方利益最大化的同时让交易尽快达成，提高排污权在二级市场下的流通率，为实际行业碳排放交易提供有效的策略建议。

论文的其余部分组织如下。第2节介绍了演化博弈模型及交易的基本信息，第3节讨论了基本模型的求解，第4节找到模型在不同情境下的进化稳定策略（ESS）。随后在第5节中选取造纸企业排污权市场交易模拟场景，在此基础上进行数值模拟说明买卖双方相关参数在演化过程中影响机制。最后，我们的结论和未来研究的一些方向在第6节中给出。

## 2. Problem and model

### **2.1. Problem statement**

假设工业企业间碳排放权交易存在两大交易主体，一方为工业供给方（卖方群体）、另一方为工业需求方（买方群体）；双方在交易过程中都有接受与拒绝两种选择；卖方和买方依次轮流的出价，分别为、；卖方和买方的预计出售量和购买量分别为、；买方每单位碳排放权用来生产产生的边际产品收益为；博弈次数为；每次博弈会发生损失成本，即定率损失用表示。具体交易信息如表1所示。

表1 交易信息

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 含义 | 范围 |
|  | 卖方出售排污权的数量 |  |
|  | 买方购买排污权的数量 |  |
|  | 卖方出售排污权的价格 |  |
|  | 买方购买排污权的价格 |  |
|  | 卖方的贴现因子 |  |
|  | 买方的贴现因子 |  |
|  | 买方边际收益产品 |  |
|  | 博弈次数 |  |
|  | 卖方第阶段成交的收益 |  |
|  | 买方第阶段成交的收益 |  |

### **2.2. Model assumption**

假设为卖方企业群体，为买方企业群体，企业间排污权交易的讨价还价过程如图1所示，具体为：

第1阶段，卖方先出价，如果买方接受，则达成协议，双方收益分别为和；否则拒绝，进入第二阶段。

第2阶段，买方出价，若这一还价被卖方接受，则达成协议，双方收益分别为和。否则，卖方拒绝，进入第三阶段。以此类推下去，直至第n阶段。



图1 博弈树

排污权交易市场买卖方有条路径：第1阶段成交、第2阶段成交、…、第n阶段成交。本研究以阶段的讨价还价博弈，即企业最后一定会达成交易，分析出价过程。

从演化博弈角度，假设在不同路径下，卖方A群体以的概率选择第i阶段博弈成交，共有n个阶段；买方群体以的概率选择第i阶段成交。则企业间排污权交易的两阶段支付矩阵如下表2所示。

表2 企业间排污权交易的两阶段支付矩阵

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 卖方 |  | | 买方 | |  |
| 第1阶段 | 第2阶段 | | … | 第阶段 |
| 第1阶段成交 | ( | (0, 0) | | (0, 0) | (0, 0) |
| 第2阶段成交 | (0, 0) |  | | (0, 0) | (0, 0) |
| …… | (0, 0) | (0, 0) | |  | (0, 0) |
| 第阶段成交 | (0, 0) | (0, 0) | | (0, 0) |  |

## 3. Solution of the multi-stage evolutionary game

### **3.1 Duplicate dynamic equation of buyers and sellers**

卖方选择“第i阶段成交”的期望收益为：

(1)

卖方群体的期望收益为：

(2)

带入公式(1)(2)，化简可得：

(3)

买方选择“第i阶段成交”的期望收益为：

(4)

买方群体期望收益为：

(5)

带入公式(4)(5)化简得：

(6)

买卖构成的演化博弈的基因复制动态过程的微分方程可以表示买卖双方在不同阶段的复制动态方程。

卖方群体选择“第i阶段成交”的复制动态方程为：

(7)

买方群体选择“第i阶段成交”的复制动态方程为：

(8)

### **3.2 Nash Equilibrium of the multi-stage evolutionary game**

通过，，求解演化博弈系统在其动态过程中多维空间中的均衡点的。作为群体中选择某种策略的概率，其限定范围是。

求解，，得到

；或；且 ；或。

由此，得到排污权交易演化博弈动态过程的均衡点有，，，，。其中，。

## 4. Evolutionary stability strategy analysis of the Equilibrium

根据Malthusian动态方程，策略的变化率等于其适应度。因此，得到由买卖双方构成的多阶段演化博弈的雅可比矩阵，雅可比矩阵中每一项为基因复制动态过程的微分方程，即：

我们将3.2中得到的6个均衡点分别代入雅可比矩阵计算它们的和：If det(J) > 0 and tr(J) < 0, the equilibrium point is ESS. If det(J) > 0 and tr(J) > 0, the equilibrium point is unstable. Or else, the equilibrium point is saddle point.以此来判断以上10个均衡点的类型，并总结在表三表四。

表3 均衡解稳定性分析

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 平衡点 |  |  | 局部稳定性 | 条件 |
|  | 0 | 0 | 不稳定 | No |
|  | 0 | + | EES | No |
|  | + | - | EES | No |
|  | + | - | EES | No |
|  | 0 | + | EES  鞍点 | Case1/ Case2 |

## 5. Numerical analysis

造纸企业是重污染排放的典型行业之一，而当前我国各地进行排污权交易的污染物物主要包括二氧化硫（工业 SO2）、化学需氧量（COD）、氨氮、氮氧化物等，其中尤以化学需氧量（COD）作为废水排放的主要衡量标准来衡量造纸工业的污染排放情形，为了分析上述均衡解，故本节我们以化学需氧量（COD）为交易对象，对造纸行业两方群体进行了数值模拟。

根据表3演化博弈平衡解分析，本研究将重点关注于稳定点、以及的分析。为了说明不同情景下初始值和参数值对博弈路径和演化结果的影响，我们设置了四组参数值如下表4，单位为万。

表4参数值

|  |
| --- |
| 实验I 1.5 24 1 15 3.2 0.8  实验II 2 20 1 15 3.2 0.8  实验III 1.5 24 1.2 20 3.2 0.8  实验Ⅳ 2 20 1 15 3 0.8 |

首先在这四组实验下，我们假定贴现因子不变，即耐心程度相同，实验I 、实验II我们主要针对卖家的出价和出售量不同，实验I、实验III表现为买家的出价和购买量，其次实验II、III我们同时改变买卖双方的出价和数量，最后买家的边际收益不同从实验II、实验Ⅳ体现。

（1）分析

1、初始策略改变对演化趋势的影响

在满足可以成为稳定解的条件下，即，首先我们考虑初始禀赋的影响机制，根据表4中设置的参数值，可以分别得到四组试验下的。对小数取整后分别为实验（0.32,0.68,0.25,0.75）、实验（0.36,0.64,0.23,0.77）、实验III（0.36,0.64,0.35,0.65）、实验Ⅳ（0.35,0.65,0.23,0.77）。现在选取一组实验下稳定解的值我们可以设置四组不同初始禀赋：（0.5,0.5,0.5,0.5）、（0.15,0.85,0.1,0.9）、（0.5,0.5,0.1,0.9）、（0.15,0.85,0.5,0.5）

2、、对演化过程的影响

现在我们选取上表中参数值两两对比模拟场景，首先对比研究实验I、II，当买家相关参数不变，卖方的影响机制，即在这个实验组中研究 =24、=1.5和=20、=2 两种状态下对演化路径的影响，同时我们假定造纸企业买卖双方初始状态策略集为（0.2,0.8,0.2,0.8）。

3、、对演化过程的影响

其次我们考察当卖方相关参数不变时，买方的影响机制。此时我们假定初始状态集（0.9,0.1,0.9,0.1），选取实验I与实验III交易过程：研究 =15、=1和=20、=1.2 两种状态下的演化过程。

4、、、、同时改变对演化过程的影响

然后我们对比实验II、实验III，考察、、、同时变化时，演化过程的趋势走向。

5、边际收益的影响机制

最后通过实验II、实验Ⅳ的交易，得到边际收益在成为稳定解过程中的影响。

在上文我们已经讨论了稳定性的两种情况，基于case2的前提下，我们对相关变量进行赋值：=3、=5，然后分析 =0.7、0.6、0.5不同情况下对买卖双方策略选择的影响。

1. 分析

我们选择确定以及为0，即企业双方会在第二阶段下达到一致交易，出现稳定解。然后再通过改变初始策略的值，以说明演化趋势。我们继续选择固定=1，讨论自身初始值对收敛速度及状态的影响，类似地再固定=1，讨论自身初始值对演化的影响，可以发现：

为了考虑当双方同时参与博弈时，不同初始演化策略对演化结果的影响。我们分别选取两组（值，如下表5

表5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 博弈结果 | =0.3 | =0.5 =0.8 |
| =0.3  =0.5  =0.8 |  |  |

我们从复制动态方程可以看出，贴现因子对第二阶段的买卖双方的博弈会造成影响。为了进一步探索其机制，当其他参数固定时我们讨论，消除初始策略对结果的影响，我们同时假定（）为（0.8,0.8）。研究=0.3、=0.6、=0.9

然后我们固定贴现因子=0.5，研究=1、=5、=10三种不同边际收益对演化过程的影响机制。

1. 分析 分析与之前类似（第一阶段从边际收益值不同研究）

在分析时，本研究将固定以及为0，然后分别固定以及为1，分别研究和的概率以及博弈次数对演化博弈结果及路径的影响，研究结果如图5.1、5.2所示。

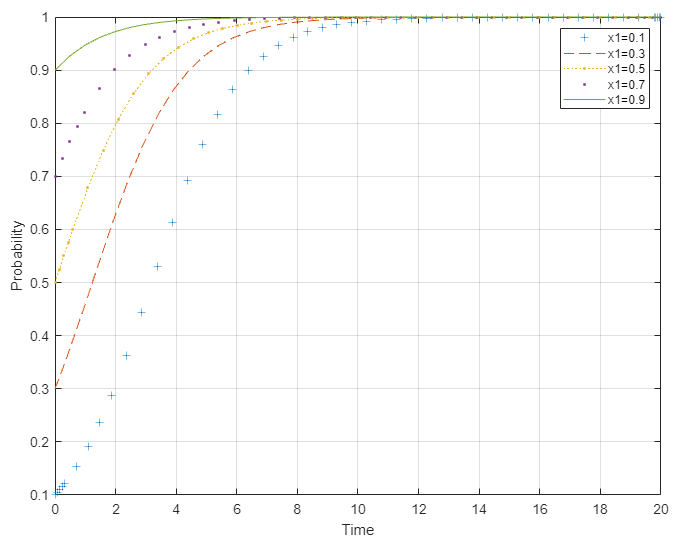


图5.1 初始赋值对时序演化博弈结果的影响。 注：

由图5.1和图5.2，可知，在以及为0时即明确造纸业在第一阶段就会达成交易的情况下，固定，不论初始值为多少，随着演化博弈次数的进行，的概率最终会趋向于1，且初始值越大，越快速趋向于1时；同理，固定，不论初始值为多少，随着演化博弈次数的进行，的概率最终会趋向于1，且初始值越大，越快速趋向于1。这意味着造纸业在排污权交易过程中，买卖双方任意一方如果明确自己完全偏好第一阶段达成交易，那么另一方最终也都会选择在第一阶段交易。同时达成稳定状态的速度取决于初始禀赋，从图中能推断出，相比与的演化趋势速度，在相等的初始值下演化速度更快，这说明在交易过程中，对于造纸业买家群体比卖家群体更迫切想要在第一阶段完成交易。这是由于造纸业作为国家重点污染控制行业，当造纸业超额排污时，为了按照规定落实污染物排放控制，其必须从二级交易市场中购买排污权，作为买家，如果交易失败，意味着政府将给予责令改正、限制生产、停产整治、罚款甚至停业、关闭等处罚。而对于卖家无非只是少了一些额外收益。

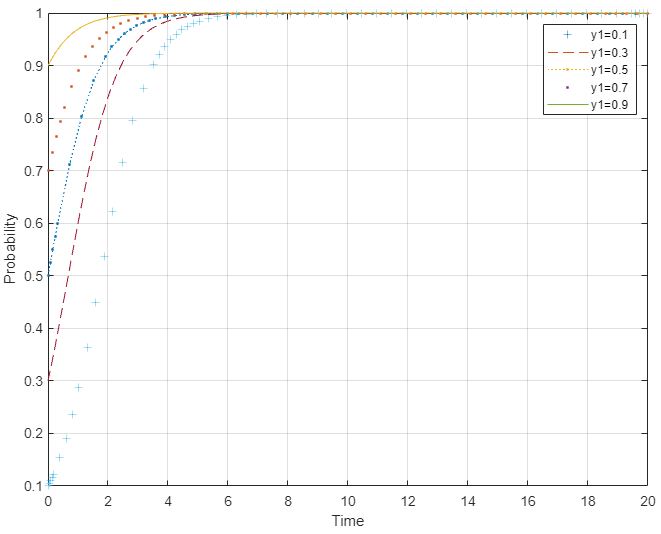


图5.2 初始赋值对时序演化博弈结果的影响。 注：

考虑当双方同时参与博弈时，不同初始演化策略对演化结果的影响。我们分别选取两组（值，如表6所示

表6

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 博弈结果 | =0.3 | =0.5 =0.8 |
| =0.3  =0.5  =0.8 |  |  |

我们从复制动态方程可以看出，边际收益对第二阶段的买卖双方的博弈会造成影响。为了进一步探索其机制，当其他参数固定时我们讨论，消除初始策略对结果的影响，我们同时假定（）为（0.85,0.85）。考虑现实场景分别取=3.5，=6、=9

## 6. Conclusions

**参考文献**

1. Zhang, Yue-Jun, Jing-Yue Liu, and Bin Su. "Carbon congestion effects in China's industry: Evidence from provincial and sectoral levels." Energy Economics 86 (2020): 104635.
2. Xuan, Dong, Xiaowei Ma, and Yuping Shang. "Can China’s policy of carbon emission trading promote carbon emission reduction?." Journal of Cleaner Production 270 (2020): 122383.

[2]Zhang, Yifei, et al. "The effect of emission trading policy on carbon emission reduction: Evidence from an integrated study of pilot regions in China." Journal of Cleaner Production 265 (2020): 121843.

[3]王敏,胡忠世.碳排放权交易政策对产业集聚的影响研究[J].南京财经大学报,2021(03):1-12.

[4]Swartz, Jeff. "China's National Emissions Trading System: Implications for Carbon Markets and Trade." International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD) (2016).

[5]Fang, Guochang, et al. "How to optimize the development of carbon trading in China—Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price." Applied energy 211 (2018): 1039-1049.

[6]蒋和胜, 孙明茜. 碳排放权交易,产业结构与地区减排[J]. 现代经济探讨, 2021(11):9.

[7]占文忠, 吕思琦, 郭娅妮. 碳排放权交易政策的影响及机制研究——基于试点省市准自然实验[J]. 经济研究参考, 2021(23):16.

[8] Sda, B , et al. "A cooperative game strategy for designing sustainable supply chains under the emissions trading system - ScienceDirect."Journal of Cleaner Production 285 (2021) :124845

[9]范秋芳, 张园园. 碳排放权交易政策对碳生产率的影响研究[J]. 工业技术经济, 2021.

[1]曹晴晴. 我国排污权交易二级市场构建的法律思考[J]. 浙江万里学院学报, 2020, 33(4):6.

[1]仇蕾, 张廷熙, 王瑜梁. 排污权交易市场中企业行为演化博弈分析[J]. 水利经济, 2016, 34(3):5.

[1]罗文君.我国碳排放权交易市场建设问题略谈[J].武汉船舶职业技术学院学报,2017,16(01):36-39.

[11]王梅,周鹏.碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究[J].管理科学报,2020,23(12):1-11.

[13]Chen H , Wang J , Miao Y . Evolutionary game analysis on the selection of green and low carbon innovation between manufacturing enterprises[J]. AEJ - Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(2):2139-2147.

[14] Halat, K. , and A. Hafezalkotob . "Modeling carbon regulation policies in inventory decisions of a multistage green supply chain: A game theory approach." Computers & Industrial Engineering 128.FEB.(2019):807-830.

[15]黄欣,凌能祥.基于排放权交易与减排研发补贴的政企减排微分博弈模型[J].系统管理学报,2020,29(06):1150-1160.

[16]杨璇.低碳经济的国际合作问题分析——基于博弈的视角[J].海峡科技与业,2019(04):78-81.

[17]Ming ,Ji “Game analysis on constructing the model of an international carbon emissions trading model.”Chinese Journal of Population, Resources and Environment,Volume 19, Issue 1,2021,Pages 82-87,ISSN 2325-4262.

[18]Ye F, Li L, Wang Z, et al. An Asymmetric Nash Bargaining Model for Carbon Emission Quota Allocation among Industries: Evidence from Guangdong Province, China[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4210.

[19]Wei, Junyi, and Chuanxu Wang. "Improving interaction mechanism of carbon reduction technology innovation between supply chain enterprises and government by means of differential game." Journal of Cleaner Production 296 (2021): 126578.

[20]孙正林,卞晨,初钊鹏,王晗.政府监管视域下碳排放规制与企业低碳技术创新演化仿真研究[J].工业技术经济,2021,40(12):103-112.

[21]任晓莉. 碳排放权交易政策下低碳供应链合作广告—成本分摊策略研究[D].成都理工大学,2019.DOI:10.26986/d.cnki.gcdlc.2019.000132.

[22] Pan Y , Hussain J , Liang X , et al. A Duopoly Game Model for Pricing and Green Technology Selection[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 153:107030.

[24] Wu B, Huang W, Liu P. Carbon reduction strategies based on an NW small-world network with a progressive carbon tax[J]. Sustainability, 2017, 9(10): 1747.

[29] Xu, J. , Y. Chen , and Q. Bai . "A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation." Journal of Cleaner Production 135.Complete(2016):42-56.

[29]Zheng, Xiao-Xue, et al. "Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns." International Journal of Production Economics 212 (2019): 92-110.

[30]邢恩凤,史成东,闫秀霞,程顺斌,林静,倪士萍.三维交易模式下企业协同低碳减排研究[J].中国管理科学,2020,28(03):174-181.DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.1456.

[31]Wang, Jun, et al. "Myopic versus farsighted behaviors in a low-carbon supply chain with reference emission effects." Complexity 2019 (2019).

[32]Liu, Hao, et al. "Which emission reduction mode is the best under the carbon cap-and-trade mechanism?." Journal of Cleaner Production 314 (2021): 128053.

[1] Xing, Enfeng, et al. "Double third-party recycling closed-loop supply chain decision under the perspective of carbon trading." Journal of Cleaner Production 259 (2020): 120651.

[33] Tong, Wen, et al. "The impact of cap-and-trade mechanism and consumers’ environmental preferences on a retailer-led supply Chain." Resources, Conservation and Recycling 142 (2019): 88-100.

[34]Yong Z, Luo F, Gou Y. Game Analysis of Enterprise Emission Rights Competition under the Background of Sustainable Development[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 13(22): 5126-5131.

[23]赵令锐,张骥骧.碳排放权交易中企业减排行为的演化博弈分析[J].科技管理研究,2016,36(05):215-221.

[35]Hong, Zitao, Zhen Peng, and Liumei Zhang. "Game analysis on the choice of emission trading among industrial enterprises driven by data." Energy 239 (2022): 122447.

[35]Wan, Xiaole, et al. "How do carbon trading platform participation and government subsidy motivate blue carbon trading of marine ranching? A study based on evolutionary equilibrium strategy method." Marine Policy 130 (2021): 104567.

对于排污权交易中的买方来说，买方选择会在交易过程中出价越低越好，而对于卖方而言，卖方会选择出价越高越好。可以看出，排污权的边际收益反映了其营运资金污染排放、生产规模和排污权平均市场价格的客观综合排名。