

## 碳交易机制下地方政府与发电企业的演化博弈分析

徐晶芝, 董雨

(中国科学技术大学管理学院, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 基于演化博弈理论, 构建了地方政府和发电企业之间的博弈模型, 分析了两者之间的复制动态和演化稳定趋势。研究表明, 当企业超额排放预期增加收益发生变化时, 此博弈系统的演化会出现多种不同的均衡。为此, 地方政府需要采取加大对积极遵守碳约束减排企业的激励、适当提高碳市场碳交易价格、降低地方政府监管严格与宽松时的成本差、加强民众对政府的监督等措施, 来督促引导发电企业自觉减排, 从而实现社会碳排放总量的控制目标。

**关键词:** 节能减排; 碳交易机制; 演化博弈; 发电企业; 地方政府

**中图分类号:** F062      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.11.008

**引用格式:** 徐晶芝, 董雨. 碳交易机制下地方政府与发电企业的演化博弈分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(11):929-939.

XU Jingzhi, DONG Yu. Evolutionary game analysis between local governments and power generation enterprises based on carbon trading mechanism[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(11):929-939.

## Evolutionary game analysis between local governments and power generation enterprises based on carbon trading mechanism

XU Jingzhi, DONG Yu

(School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Based on evolutionary game theory, a game model between local governments and power generation enterprises was constructed, and then the dynamic stability and evolution trend were analyzed. The analysis result suggests that there exist some different equilibria in the evolution of the game system when the expected profits of enterprises are changing. Accordingly, local governments need to take some measures, for example, strengthening incentives to enterprises who actively abide by emission reduction polices, increasing carbon trading prices appropriately, reducing the variance of cost when local governments choose strict regulation or loose regulation, and strengthening public supervision of the governments, so as to urge the power generation enterprises to consciously reduce carbon emissions, thus achieving control over the overall carbon emissions.

**Key words:** energy saving and emission reduction; carbon trading mechanism; evolutionary game; power generation enterprises; local governments

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(71571171)资助.

作者简介: 徐晶芝, 男, 1991年生, 硕士. 研究方向: 能源与经济管理. E-mail: jzxu1355@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 董雨, 博士/副教授. E-mail: ydong@ustc.edu.cn

## 0 引言

2017 年全国两会上的政府工作报告部署了今年要抓好的 9 项重点工作,其中第 7 项工作是加大生态环境保护治理力度.这体现了对生态环境保护的重视,回应了人民群众的迫切愿望.节能减排不仅成为加强生态环境建设、改善民生福祉的重要举措,也是衡量一个城市乃至地区绿色、协调发展的重要指标.一直以来,人民群众关注节能减排和绿色发展的热度从未降温,对雾霾、空气质量等话题的讨论层出不穷.国家发改委宣布力争在 2017 年全面启动全国碳排放权交易市场,《碳排放权交易管理条例》也已送审,通过市场机制激励企业的减排行为将成为未来的趋势.随着“十三五”规划拉开大幕,我国进入了一个新的发展阶段,绿色发展的全面落实,显得更加刻不容缓.

《2014 中国电力行业与碳交易研究》报告显示,电力行业是我国碳排放的重要领域,2010 年电力行业碳排放量在全国碳排放总量中的占比达到接近一半;另一方面,电力行业在我国能否有效实施碳减排政策中的地位非常重要,电力行业在 2005~2012 年间的碳减排量累计达到四十多亿吨.可见,通过控制碳排放量占比最大的电力行业碳排放是实现我国总体减排目标的必由之路.在节能减排研究中,如何有效降低发电企业的碳排放量,是国内外学者的研究焦点.由于低碳减排问题是多元利益冲突和复杂社会条件等多方面相互作用的结果,以非合作博弈为主的经典博弈论被广泛应用于政府、企业、公众等多元主体利益冲突协调以及博弈均衡等研究中.任玉珑等构建了关于政府与发电企业的两阶段 Stackelberg 模型,分析发现如果发电市场上的发电厂商数量较少时,政府可以并且应当通过向发电厂商征收调节税的方式,最终转移支付给消费者;当发电厂商超过某一数量之后,政府则应当进行反向操作;社会总福利与发电厂数量的关系曲线呈倒“U”型变化,即先增大后变小,并存在某点使社会总福利达到最大<sup>[1]</sup>.Hopkin 研究了政府、发电企业和监管部门这三方面的博弈关系,结果表明政府可以采取诸如降低监管成本等措施来防范监管部门与企业合谋<sup>[2]</sup>.

但由于低碳减排博弈各方的决策行为更多时候是以有限理性特征呈现的,并在多次博弈过程中通过模仿、学习、变异等动态过程来寻求优化策略.因此,越来越多的学者运用演化博弈理论来分析低碳

减排中的博弈问题.李海锋等设计了一种由政府、公众和发电企业三方参与、可进行碳排放期权合约交易的碳排放期权交易市场,以鼓励发电企业减少碳排放;演化博弈过程进行的条件是期望收益大于平均收益;并且博弈存在一个稳定演化策略使得所有发电企业都能采用低碳技术和低碳设备来减少碳排放<sup>[3]</sup>.张倩和曲世友基于规制经济学,通过构建动态演化博弈模型研究了政府实施排污税环境规制下政企之间的博弈关系;分析认为,政府方面的排污税率、罚金等因素以及企业自身方面的排污技术水平、排污引起的声誉损失会直接影响企业的环境策略选择<sup>[4]</sup>.张宏娟和范如国运用复杂网络演化博弈理论建立了关于传统产业集群的低碳演化模型,研究发现要想在产业集群内涌现低碳策略,产业集群的复杂网络结构、产业主体的异质性预期和集群的决策行为都是重要的影响因素<sup>[5]</sup>.

自提出碳排放权交易机制以来,国内外学者在碳排放权的初始配额分配方式、碳排放权交易价格的影响因素、碳交易机制的经济效应等方面展开了众多研究,并且很多国家和地区也进行了碳排放权交易的实践活动. Du 等指出环保部门对每个企业进行排放限制,使企业需要进行权衡:追求生产利润的企业可以选择购买碳排放权,企业通过碳排放权交易或者自行减排来控制碳排放量;在这种机制中,碳排放权成为可以显著影响生产运作的资源<sup>[6]</sup>.杜少甫等基于企业运作层面研究了排放许可与交易的生产优化问题,在单周期、单排放情形下,分别探讨了净化水平确定与可控情况,得到了企业优先选择净化处理的充要条件,即“存在净化空间”<sup>[7]</sup>.Cramton 和 Kerr 提出为使二级市场的流动性最大化,碳排放权将是完全可交易的.政府将进行季度拍卖,拍卖比原先根据历史排放量分配配额要更受欢迎,因为拍卖减少了税收扭曲,在成本分配方面提供了更大的灵活性,为创新提供更大的激励<sup>[8]</sup>.Bode 研究了常常被忽视的如何随时间分配碳排放权的问题,他对碳交易的市场效应和履行减排义务的合规成本作了区分,发现整个电力行业会从电价上涨中获益;关于不同的配额分配方式,公用事业会因所使用燃料的不同而有不同的偏好<sup>[9]</sup>.

综上所述,现有文献对地方政府与发电企业碳排放之间博弈的研究存在以下不足:一是部分文献研究是基于政府或企业是完全理性的,博弈参与者能够掌握博弈过程的所有信息,因此能够很容易地实现最终的纳什均衡,这不符合实际情况;二是应用

演化博弈理论分析的文献中,对政府监管与发电企业碳排放之间的冲突原理和政府如何激励发电企业完成减排任务的研究不多;三是随着碳交易机制的兴起,在研究两群体博弈中考虑碳交易因素的文献极少;四是发电行业作为控制我国碳排放总量的关键领域,直接分析发电行业碳排放的文献很少.因此,本文构建地方政府与发电企业之间的演化博弈模型,在碳排放交易机制下,从理论上研究演化规律以及演化稳定策略存在的条件,分析了影响系统演化均衡方向的各个因素,对政府引导发电企业自觉减排给出了一些政策建议.

### 1 模型假设

本博弈中参与者群体为地方政府和发电企业两个群体,并且两群体都具有有限理性特征.地方政府的行为策略集  $S_1 = \{H \text{ 监管程度高}, L \text{ 监管程度低}\}$ ,发电企业的行为策略集  $S_2 = \{A \text{ 碳排放不超额}, N \text{ 超额排放}\}$ .假设在地方政府和发电企业两群体博弈的初始阶段,地方政府选择“监管程度高”策略的概率为  $x$ ,选择“监管程度低”策略的比例为  $1-x$ ;发电企业选择“碳排放不超额”策略的比例为  $y$ ,选择“超额排放”策略的比例为  $1-y$ . $x$  和  $y$  都是时间  $t$  的函数.下面对模型中相关参数进行假设及说明其含义.

①假设国家分配给发电企业在特定时期内的碳排放配额为  $D$ ,目前我国在碳交易市场试点地区  $D$  的确定一般是以历史碳排放平均水平确定,并且以免费分配为主.当发电企业排放不超额时,碳排放量为  $D_A$ ;当发电企业超额排放时,碳排放量为  $D_N$ .显然存在  $D_A \leq D \leq D_N$ .

②假设发电企业每单位产品的成本为  $c_0$ ,成本  $c_0$  的大小主要与发电原料价格、发电技术等因素相关.假设每单位产品的售价为  $e$ ,电价  $e$  的大小与政府管控、用电性质、电压等级、变压器容量等有关.假设每单位产品的碳排放为  $d$ ,其大小受发电使用原料、减排技术等因素影响.令  $\alpha = (e - c_0) / d$ ,则  $\alpha$  可以理解为单位碳排放的产能效益.

③假设地方政府监管程度高时的监管成本投入为  $C_{gH}$ ,监管程度低时的监管成本投入为  $C_{gL}$ ,假设存在  $C_{gH} \geq C_{gL}$ .

④假设当发电企业碳排放配额之内时,政府可以从减排行为中获利  $P_g$ , $P_g$  与发电企业的减排量  $D - D_A$  有关. $P_g$  包括:发电企业减排行为降低了环境破坏程度,使得环境得到一定改善,以及由此带

来的民众对政府满意度的提升.发电企业也可以从减排行为中获利  $P_c$ , $P_c$  也是与发电企业的减排量  $D - D_A$  有关的函数. $P_c$  包括:企业社会形象和声誉得到提高,同时可以更多得到政府肯定,从而获得更多政府有关的支持.

⑤假设当发电企业超额碳排放时,政府发现发电企业超额排放行为后会对发电企业进行罚款  $R$ , $R$  与发电企业超额排放量  $D_N - D$  有关.这里的罚款既包括现金罚款,也包括政府对发电企业超额排碳行为的相关制裁行动.此外,企业超额排放也会给地方政府带来损失  $V$ ,损失  $V$  包括:政府将承担因企业超额碳排放对环境造成的危害,民众因环境变差而对政府的不满以及上级政府对地方政府减排不力的警告等处罚.

以上主要指标和参数定义如表 1 所列.

表 1 主要指标和参数定义

Tab.1 Main indicators and parameter definitions

符号	定义	符号	定义
$D$	企业被分配的碳排放配额	$c_0$	每单位电力产品成本
$D_A$	发电企业采取策略 A 的碳排放量	$e$	每单位电力产品售价
$D_N$	发电企业采取策略 N 的碳排放量	$d$	每单位电力产品碳排放
$C_{gH}$	监管程度高时政府监管成本	$P_g$	企业未超额排放时政府获利
$C_{gL}$	监管程度低时政府监管成本	$P_c$	企业未超额排放时企业获利
$R$	企业超额排放时政府收取罚款	$V$	企业超额排放时政府损失

### 2 演化博弈模型分析

演化博弈论不再将人模型化为超级理性的博弈方,认为人类通常是通过试错的方法达到博弈均衡的.Madani 认为,应用在研究环境保护和气候变换问题上的博弈大多为演化博弈<sup>[10]</sup>.演化博弈模型不仅仅依赖局中人的信息,而且与时间有关,这样的博弈过程具有生物演化特征,本文将重点分析研讨地方政府与发电企业之间博弈的演化机制动态系统.

#### 2.1 不考虑碳交易情形的演化分析

由假设,可得到地方政府与发电企业在不同策略组合下的收益函数.

当地方政府监管程度高而发电企业排放未超额

时(即选择策略  $\{H, A\}$ ), 地方政府的收益函数为  $\pi_g(H, A) = P_g - C_{gH}$ , 发电企业的收益函数为  $\pi_c(H, A) = \alpha D_A + P_c$ .

当地方政府监管程度高而发电企业超额排放时(即选择策略  $\{H, N\}$ ), 地方政府的收益函数为  $\pi_g(H, N) = R - C_{gH} - V$ , 发电企业的收益函数为  $\pi_c(H, N) = \alpha D_N - R$ .

当地方政府监管程度低而发电企业排放未超额时(即选择策略  $\{L, A\}$ ), 地方政府的收益函数为  $\pi_g(L, A) = P_g - C_{gL}$ , 发电企业的收益函数为  $\pi_c(L, A) = \alpha D_A + P_c$ .

当地方政府监管程度低而发电企业超额排放时(即选择策略  $\{L, N\}$ ), 地方政府的收益函数为  $\pi_g(L, N) = -C_{gL} - V$ , 发电企业的收益函数为  $\pi_c(L, N) = \alpha D_N$ .

由此可得到博弈的收益矩阵如表 2 所列.

表 2 地方政府与发电企业的博弈支付矩阵  
(不考虑碳交易情形)

**Tab.2 Pay-off matrix between local government and power generation enterprises (without consideration of carbon trading mechanism)**

		发电企业	
		碳排放不超额(A)	超额排放(N)
		y	1-y
地方政府	监管程度高(H)	$P_g - C_{gH}, \alpha D_A + P_c$	$R - C_{gH} - V, \alpha D_N - R$
	监管程度低(L)	$P_g - C_{gL}, \alpha D_A + P_c$	$-C_{gL} - V, \alpha D_N$
		1-x	x

从而可知, 地方政府采取策略  $H$  和  $L$  (即监管程度高和低时)的期望得益以及地方政府群体的平均期望收益分别为

$$\pi_g(H) = y \pi_g(H, A) + (1-y) \pi_g(H, N) = y(P_g - R + V) + R - V - C_{gH} \quad (1)$$

$$\pi_g(L) = y \pi_g(L, A) + (1-y) \pi_g(L, N) = y(P_g + V) - V - C_{gL} \quad (2)$$

$$\bar{U}_g = x \pi_g(H) + (1-x) \pi_g(L) \quad (3)$$

从演化博弈的基本内容介绍部分可知, 如果某种策略的适应度(或支付)高于参与者群体的平均适应度, 那么这种策略就能在种群中获得发展, 此时, 体现在参与者群体中采取此策略之个体在群体中所占比例的增长率为正数. 这就是复制动态方程. 事实上, 复制动态方程是一个动态微分方程, 用以刻画某特定策略在一个群体中被个体采用的频度或频数.

则构造地方政府的复制动态方程如下:

$$F(x) = dx/dt = x [\pi_g(H) - \bar{U}_g] = x(1-x)(-Ry + R - C_{gH} + C_{gL}) \quad (4)$$

式中,  $dx/dt$  表示随着时间的推移, 地方政府选择严格监管的概率的变化率.

令  $\Delta C = C_{gH} - C_{gL}$ ,  $\Delta C \geq 0$  表示地方政府选择监管程度高低时的监管成本差值.

则有

$$F(x) = dx/dt = x(1-x)(-Ry + R - \Delta C) \quad (5)$$

类似地, 发电企业采取策略  $A$  和  $V$  的期望收益以及发电企业群体平均期望得益分别为

$$\pi_c(A) = x \pi_c(H, A) + (1-x) \pi_c(L, A) = \alpha D_A + P_c \quad (6)$$

$$\pi_c(N) = x \pi_c(H, N) + (1-x) \pi_c(L, N) = -Rx + \alpha D_N \quad (7)$$

$$\bar{U}_c = y \pi_c(A) + (1-y) \pi_c(N) \quad (8)$$

发电企业的复制动态方程如下:

$$F(y) = dy/dt = y [\pi_c(A) - \bar{U}_c] = y(1-y) [Rx + P_c - \alpha(D_N - D_A)] \quad (9)$$

令  $\Delta D = D_N - D_A$ ,  $\Delta D$  表示发电企业两种策略下的碳排放差值.

则有

$$F(y) = y(1-y)(Rx + P_c - \alpha \Delta D) \quad (10)$$

根据式(5)和(10), 有:

令  $F(x) = 0$ , 可得到两个可能的稳定状态点:  $x_1 = 0, x_2 = 1$ ; 以及

$$y^* = 1 - \Delta C/R.$$

令  $F(y) = 0$ , 可得到两个可能的稳定状态点:  $y_1 = 0, y_2 = 1$ ; 以及

$$x^* = (\alpha \Delta D - P_c)/R.$$

因此,  $(0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)$  是该演化博弈系统的均衡点. 当  $R > \Delta C$  时,  $0 < y^* < 1$ ; 当  $0 < \alpha \Delta D - P_c < R$  时,  $0 < x^* < 1$ . 因  $dx/dt = 0$  和  $dy/dt = 0$  知,  $(x^*, y^*)$  也是系统的均衡点. 故可以得到如下命题:

**命题 2.1** 系统的均衡点为  $(0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)$ ; 当  $R > \Delta C, 0 < \alpha \Delta D - P_c < R$  时,  $(x^*, y^*)$  也是系统的均衡点.

但通过复制动态方程求出来的上述五个系统均衡点不一定是系统的稳定演化策略(ESS), 需要对它们进行稳定性分析. Friedman 提出, 通过分析博弈系统的雅克比矩阵(Jacobian)的局部稳定性, 可以判断均衡点的稳定性<sup>[11]</sup>. 具体判别标准是: 若

平衡点 Jacobian 矩阵的行列式( $\det J$ )为正,并且该矩阵的迹( $\text{tr}J$ )为负,则该点就是博弈系统的演化稳定策略.

**命题 2.2**

①当  $\alpha\Delta D - P_c < 0$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(L, A)$ .

②当  $R < \Delta C, \alpha\Delta D - P_c > 0$  时,博弈系统的演

化稳定策略为  $(L, N)$ .

③当  $R > \Delta C, \alpha\Delta D > R + P_c$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(H, N)$ .

④当  $R > \Delta C, 0 < \alpha\Delta D - P_c < R$  时,博弈系统不存在演化稳定策略.

**证明** 该系统的 Jacobian 矩阵为

$$\begin{bmatrix} (1-2x)(-Ry+R-\Delta C) & -Rx(1-x) \\ Ry(1-y) & (1-2y)(Rx+P_c-\alpha\Delta D) \end{bmatrix}$$

则各均衡点处 Jacobian 矩阵的行列式和迹分别为表 3 所列.

**表 3 各均衡点处 Jacobian 矩阵的行列式和迹**

**Tab.3 Determinant and trace of the Jacobian matrix at each equilibrium point**

均衡点	$\det J$	$\text{tr}J$
$(0,0)$	$(R-\Delta C)(P_c-\alpha\Delta D)$	$R-\Delta C+P_c-\alpha\Delta D$
$(0,1)$	$\Delta C \cdot (P_c-\alpha\Delta D)$	$\alpha\Delta D-P_c-\Delta C$
$(1,0)$	$(\Delta C-R)(R+P_c-\alpha\Delta D)$	$\Delta C+P_c-\alpha\Delta D$
$(1,1)$	$\Delta C \cdot (\alpha\Delta D-P_c-R)$	$\Delta C+\alpha\Delta D-P_c-R$
$(x^*, y^*)$	$\Delta C \cdot (\Delta C-R)(R+P_c-\alpha\Delta D)/R^2$	0

博弈系统的参数有六种情况,分别是:

- ①  $R < \Delta C, \alpha\Delta D - P_c < 0$ ; ②  $R < \Delta C, \alpha\Delta D - P_c > R$ ; ③  $R < \Delta C, 0 < \alpha\Delta D - P_c < R$ ;
- ④  $R > \Delta C, \alpha\Delta D - P_c < 0$ ; ⑤  $R > \Delta C, \alpha\Delta D - P_c > R$ ; ⑥  $R > \Delta C, 0 < \alpha\Delta D - P_c < R$ .

分析每种情形下每个均衡点的 Jacobian 矩阵,结果如表 4 所列.从而可以证得四个命题.

**表 4 各种情形下平衡点的局部稳定性(不考虑碳交易)**

**Tab.4 Local stability of the equilibrium point (without consideration of carbon trading mechanism)**

均衡点	情形 1			情形 2			情形 3		
	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性
$(0,0)$	-	不确定	鞍点	+	-	ESS	+	-	ESS
$(0,1)$	+	-	ESS	-	不确定	鞍点	-	-	鞍点
$(1,0)$	+	+	不稳定点	-	不确定	鞍点	+	+	不稳定
$(1,1)$	-	不确定	鞍点	+	+	不稳定	-	+	鞍点
$(x^*, y^*)$	非平衡点			非平衡点			非平衡点		
均衡点	情形 4			情形 5			情形 6		
	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr}J$	稳定性
$(0,0)$	+	+	不稳定	-	-	鞍点	-	不确定	鞍点
$(0,1)$	+	-	ESS	-	+	鞍点	-	不确定	鞍点
$(1,0)$	-	+	鞍点	+	-	ESS	-	不确定	鞍点
$(1,1)$	-	-	鞍点	+	+	不稳定点	-	不确定	鞍点
$(x^*, y^*)$	非平衡点			非平衡点			-	0	

六种情形下的系统演化相位图如图 1 所示。

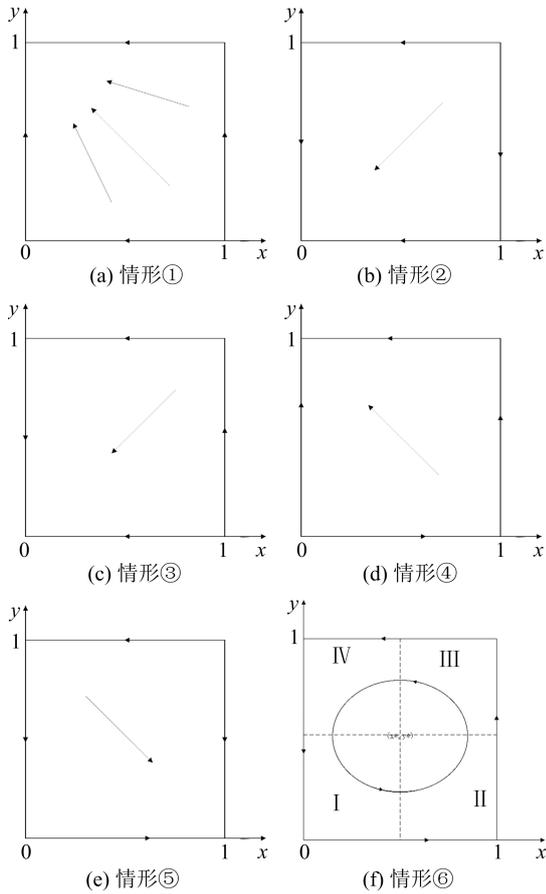


图 1 六种情形下的演化相位图

Fig.1 Evolutional phase diagrams of six cases

通过博弈结果和图 1 的六张相位图,可以发现:

①由命题 2.2①,当  $\alpha\Delta D - P_c < 0$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(L, A)$ .  $\alpha\Delta D$  是发电企业超额排放比遵守碳排约束时预期的收益增加值.这表明当企业超额排放预期的收益增加小于遵守碳排约束带来的各方面客观收益时,系统的演化将趋向于(地方政府监管程度低、发电企业碳排放不超额).这是一种理想的社会状态,即发电企业自觉进行碳减排工作,而地方政府不需要花费太多进行监管。

②当  $R < \Delta C, \alpha\Delta D - P_c > 0$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(L, N)$ . 在这种情形下,地方政府严格监管时收取的罚款不足以补偿比宽松监管时高出的监管成本,而发电企业超额排放预期的收益增加大于遵守碳排约束带来的客观收益,因此博弈最终的演化稳定策略是地方政府不再严格监管,而发电企业超额排放。

③当  $R > \Delta C, \alpha\Delta D > R + P_c$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(H, N)$ . 此时,地方政府严格监管

时收取的罚款可以补偿比宽松监管时高出的监管成本,但发电企业超额排放预期增加的收益不仅大于遵守碳排约束带来的客观收益,还可以支付政府罚款,很显然,两群体最终的选择分别是地方政府严格监管,而发电企业超额排放。

④在  $R - \Delta C > 0, 0 < \alpha\Delta D - P_c < R$  情形下,博弈系统没有演化稳定策略,这说明在碳减排政策实施过程中,地方政府与发电企业的博弈表现出一种周期行为模式<sup>[12]</sup>,即系统的平衡点  $(x^*, y^*)$  是系统的中心.地方政府与发电企业之间的行为可以形象地理解为“敌退我进”、“敌进我退”。

### 2.2 考虑碳交易情形的演化分析

碳交易是一种市场交易机制,旨在加快全世界的温室气体减排进程,减少全球的碳排放.它的基本原理是:企业可以将富余的碳排放配额通过交易手段转让给需求方,需求方将购入的碳排放配额用于满足自身的减排需要,从而实现减排目标.碳交易的实质是利用市场手段有效实现资源再配置,提高资源利用率,从而降低全社会的碳排放.在本节,将探讨碳交易机制下地方政府与发电企业的相互作用关系。

假设为了促进碳交易机制的发展,当发电企业碳排放量超过分配的碳配额时,地方政府收取的罚款远高于购买碳配额所需资金,此时,发电企业的选择是向其他企业购买碳排放权.假设如果发电企业最终的碳排放量小于分配给它的配额,则为了实现企业效益最大化,发电企业会选择将富余的碳配额出售。

假设每单位碳的交易价格为  $p$ ,  $p$  是外生变量,由市场决定.发电企业碳排放不超过配额时,通过出售碳排放权获得的收益为  $P_A$ ,  $P_A = p(D - D_A)$ . 发电企业超额排放时,需要花费  $P_N$  去购买碳排放权,  $P_N = p(D_N - D)$ . 假设企业通过购买其他企业的碳排放权来实现减排目标,地方政府不需要再承担损失  $V$ , 因为全社会的碳排放权总量是既定的.其他假设同上节中所述,可得到地方政府与发电企业在不同策略组合下的收益函数及支付矩阵(表 5)。

则地方政府的复制动态方程为

$$F(x) = dx/dt = x [\pi_g(H) - \bar{U}_g] = x(1-x)(-Vy + V - \Delta C) \quad (11)$$

类似地,发电企业采取策略 A 和 V 的期望收益以及发电企业群体平均期望得益分别为

$$\pi_c(A) = x \pi_c(H, A) + (1-x) \pi_c(L, A) = \alpha D_A + P_c + P_A \quad (12)$$

$$\pi_c(N) = x \pi_c(H, N) + (1-x) \pi_c(L, N) =$$

表 5 地方政府与发电企业的博弈支付矩阵  
(考虑碳交易情形)

Tab.5 Pay-off matrix between local government and power generation enterprises (with consideration of carbon trading mechanism)

		发电企业	
		碳排放不超额(A)	超额排放(N)
		y	1-y
地方政府	监管程度高(H)	$P_g - C_{gH},$ $\alpha D_A + P_c + P_A$	$-C_{gH},$ $\alpha D_N - P_N$
	监管程度低(L)	$P_g - C_{gL},$ $\alpha D_A + P_c + P_A$	$-C_{gL} - V,$ $\alpha D_N$

$$-P_N x + \alpha D_N \quad (13)$$

$$\bar{U}_c = y \pi_c(A) + (1-y) \pi_c(N) \quad (14)$$

发电企业的复制动态方程如下:

$$F(y) = dy/dt = y [\pi_c(A) - \bar{U}_c] = y(1-y) [P_N x + P_c + P_A - \alpha \Delta D] \quad (15)$$

根据式(11)和(15):

令  $F(x) = 0$ , 可得到两个可能的稳定状态点:

$x_1 = 0, x_2 = 1$ ; 以及

$$y^* = 1 - \Delta C / V \quad (16)$$

令  $F(y) = 0$ , 可得到两个可能的稳定状态点:

$y_1 = 0, y_2 = 1$ ; 以及

$$x^* = (\alpha \Delta D - P_c - P_A) / P_N \quad (17)$$

因此, (0,0), (1,0), (0,1), (1,1) 是该演化博弈系统的均衡点. 当  $V > \Delta C$  时,  $0 < y^* < 1$ ; 当  $0 < \alpha \Delta D - P_c - P_A < P_N$  时,  $0 < x^* < 1$ , 故  $(x^*, y^*)$  也是系统的均衡点. 故可以得到如下命题:

**命题 2.3** 系统的均衡点为 (0,0), (1,0), (0,1), (1,1); 当  $V > \Delta C, 0 < \alpha \Delta D - P_c - P_A < P_N$  时,  $(x^*, y^*)$  也是系统的均衡点.

与 2.1 节相似, 下面对平衡点 Jacobian 矩阵的行列式和迹进行稳定性分析.

**命题 2.4**

① 当  $\alpha \Delta D < P_c + P_A$  时, 该博弈系统的演化稳定策略为 (L, A).

② 当  $V < \Delta C, \alpha \Delta D > P_c + P_A$  时, 博弈系统的演化稳定策略为 (L, N).

③ 当  $V > \Delta C, \alpha \Delta D > P_c + P_A$  时, 博弈系统的演化稳定策略为 (H, N).

④ 当  $V > \Delta C, P_c + P_A < \alpha \Delta D < P_c + P_A + P_N$  时, 博弈系统不存在演化稳定策略.

**证明** 碳交易情形下, 该系统的 Jacobian 矩阵为

$$\begin{bmatrix} (1-2x)(-Vy + V - \Delta C) & -Vx(1-x) \\ P_N y(1-y) & (1-2y)(P_N x + P_c + P_A - \alpha \Delta D) \end{bmatrix}$$

则各均衡点处 Jacobian 矩阵的行列式和迹分别为表 6 所示.

表 6 各均衡点处 Jacobian 矩阵的行列式和迹

Tab.6 Determinant and trace of the Jacobian matrix at each equilibrium point

均衡点	detJ	trJ
(0,0)	$(V - \Delta C)(P_c + P_A - \alpha \Delta D)$	$V - \Delta C + P_c + P_A - \alpha \Delta D$
(0,1)	$\Delta C \cdot (P_c + P_A - \alpha \Delta D)$	$\alpha \Delta D - P_c - P_A - \Delta C$
(1,0)	$(\Delta C - V)(P_N + P_c + P_A - \alpha \Delta D)$	$\Delta C - V + P_N + P_c + P_A - \alpha \Delta D$
(1,1)	$\Delta C \cdot (\alpha \Delta D - P_N - P_c - P_A)$	$\Delta C + \alpha \Delta D - P_N - P_c - P_A$
$(x^*, y^*)$	$\Delta C \cdot (\Delta C - V)(P_N + P_c + P_A - \alpha \Delta D)(P_c + P_A - \alpha \Delta D) / V P_N$	0

博弈系统的参数仍然有六种情况, 分别是:

- ①  $V < \Delta C, \alpha \Delta D < P_c + P_A$ ;
- ②  $V < \Delta C, P_c + P_A < \alpha \Delta D < P_c + P_A + P_N$ ;
- ③  $V < \Delta C, \alpha \Delta D > P_c + P_A + P_N$ ;
- ④  $V > \Delta C, \alpha \Delta D < P_c + P_A$ ;

⑤  $V > \Delta C, P_c + P_A < \alpha \Delta D < P_c + P_A + P_N$ ;

⑥  $V > \Delta C, \alpha \Delta D > P_c + P_A + P_N$ .

分析每种情形下每个均衡点的 Jacobian 矩阵, 结果如表 7 所列. 图 2 是每种情形下的系统演化相位图. 从而可以证得命题 2.4.

表 7 各种情形下平衡点的局部稳定性(考虑碳交易)

Tab.7 Local stability of the equilibrium point (with consideration of carbon trading mechanism)

均衡点	情形 1			情形 2			情形 3		
	detJ	trJ	稳定性	detJ	trJ	稳定性	detJ	trJ	稳定性
(0,0)	-	不确定	鞍点	+	-	ESS	+	-	ESS
(0,1)	+	-	ESS	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点
(1,0)	+	+	不稳定点	+	+	不稳定	-	不确定	鞍点
(1,1)	-	不确定	鞍点	-	+	鞍点	+	+	不稳定
$(x^*, y^*)$	非平衡点			非平衡点			非平衡点		

均衡点	情形 4			情形 5			情形 6		
	detJ	trJ	稳定性	detJ	trJ	稳定性	detJ	trJ	稳定性
(0,0)	+	+	不稳定	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点
(0,1)	+	-	ESS	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点
(1,0)	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点	+	-	ESS
(1,1)	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点	+	+	不稳定点
$(x^*, y^*)$	非平衡点			-	0		非平衡点		

通过博弈分析结果(表 7)和相位图(图 2),可以归纳以下结论:

①当  $\alpha\Delta D < P_c + P_A$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(L, A)$ . 由相位图 2(a)和 2(d)可以看出,  $(0, 1)$  是唯一的演化稳定点,不管从任何初始状态出发,系统总是收敛于  $(0, 1)$ . 这表明当企业超额排放预期的收益增加小于遵守碳排约束带来的各方面客观收益和出售富余碳配额收入之和时,超额排放对发电企业来说没有诱惑力,无论地方政府采取何种策略,发电企业的策略都将趋向于不超额排放;而地方政府要获得最大利益,当然选择监管程度低的策略.从而系统的演化将趋向于(地方政府监管程度低、发电企业碳排放不超额).这是碳交易机制下地方政府希望看到的稳定状态,即在地方政府不严格监管的条件下,发电企业可以自觉进行低碳生产.

②当  $V < \Delta C, P_c + P_A < \alpha\Delta D < P_c + P_A + P_N$  或  $V < \Delta C, \alpha\Delta D > P_c + P_A + P_N$  时,博弈系统的演化稳定策略为  $(L, N)$ . 由相位图 2(b)和 2(c)可以看出,  $(0, 0)$  是唯一的演化稳定点,不管从任何

初始状态出发,系统总是收敛于  $(0, 0)$ . 在这种情况下,地方政府监管不严格时的损失(如声誉成本、环境损害等)小于监管严格时需要多付出的监管成本,而发电企业超额排放预期的收益增加大于遵守碳排约束带来的客观收益和出售富余碳配额的收入之和,此时,(监管程度低,超额排放)是地方政府和发电企业的必然选择.这都是地方政府所不愿意看到的,政府可以通过降低  $\alpha\Delta D$  或增大  $P_A, P_c, P_N$  来推动这两个阶段逐渐演化到情形①,具体措施包括适当降低电价  $e$ 、提高碳交易价格  $p$ 、加大对积极减排企业的宣传和扶持力度以提高企业获利  $P_c$ .

③在  $V > \Delta C, 0 < \alpha\Delta D - P_c - P_A < P_N$  情形下,博弈系统不存在任何演化稳定策略.此时,地方政府监管不严格时的损失超过了监管严格时多支出的监管成本,而发电企业超额排放预期增加的收益大于遵守碳排约束的收益和出售碳配额收入之和,小于遵守碳排约束的收益、出售碳配额收入和超额排放时购入碳配额支出之和.这说明在基于碳交易机制的碳减排政策实施过程中,地方政府与发电企

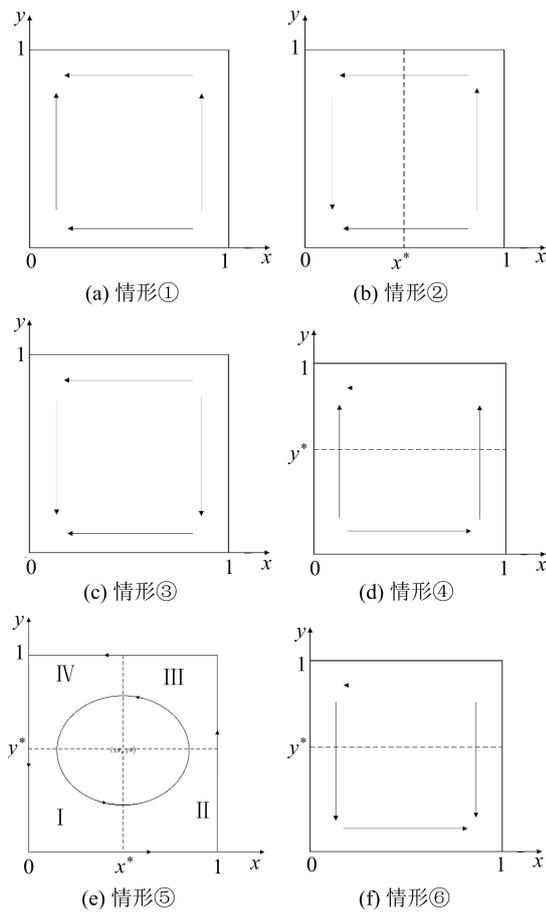


图 2 六种情形下的演化相位图(考虑碳交易)

Fig.2 Evolutional phase diagrams of six cases (with consideration of carbon trading mechanism)

业的博弈仍然表现出周期行为模式,该系统的演化趋势依赖于两群体博弈的初始状态位于图 2(e)中的哪个区域.如果初始状态在 I 区域,那么博弈过程收敛于 (1,0),即地方政府和发电企业的最终策略选择是 (H,N);如果初始状态在 II 区域,那么博弈过程收敛于 (1,1),即地方政府和发电企业的最终策略选择是 (H,A);如果初始状态在 III 区域,那么博弈过程收敛于 (0,1),即地方政府和发电企业的最终策略选择是 (L,A);如果初始状态在 IV 区域,那么博弈过程收敛于 (0,0),即地方政府和发电企业的最终策略选择是 (L,N).

④当  $V > \Delta C, \alpha\Delta D > P_c + P_A + P_N$  时,博弈系统的演化稳定策略为 (H,N).由相位图 2(f)可以看出, (1,0) 是唯一的演化稳定点,不管从任何初始状态出发,系统总是收敛于 (1,0).此时,地方政府监管不严格时的损失超过了监管严格时多支出的监管成本,但发电企业超额排放预期增加的收益大于遵守碳排约束带来的客观收益、出售碳配额收入

以及超额排放时购买碳配额所需资金之和,因而地方政府和发电企业两群体最终的策略选择分别是地方政府严格监管,而发电企业超额排放.

根据命题 2.4,可以知道,结论①中博弈结果是地方政府最希望看到的,第③种结果中当初始状态在 III 区域时也满足要求.而第②和第④种博弈结果是政府不愿意看到的.

由于当  $\alpha\Delta D < P_c + P_A$  时,不管从任何初始状态出发,系统总是收敛于 (0,1),演化稳定策略恒为(地方政府监管程度低、发电企业碳排放不超额).接下来主要讨论  $V > \Delta C, 0 < \alpha\Delta D - P_c - P_A < P_N$  时,地方政府和发电企业博弈过程中出现的周期行为.

**命题 2.5** 有利于地方政府和发电企业博弈系统向(监管程度低、碳排放不超额)稳定演化的措施包括:

- ① 公众增加对减排企业的认可、政府加大对减排企业的各方面支持力度等,使发电企业从中获利  $P_c$  增加;
- ② 提高碳交易价格  $p$ ;
- ③ 降低地方政府监管严格与宽松时的成本差  $\Delta C$ ;
- ④ 增大地方政府监管程度低时各方面的损失  $V$ .

**证明** 当  $x < x^*$  时,  $y = 0$  是稳定策略;当  $x > x^*$  时,  $y = 1$  是稳定策略;当  $y < y^*$  时,  $x = 1$  是稳定策略;当  $y > y^*$  时,  $x = 0$  是稳定策略. (0, 1) 是期望收敛的点,初始状态要落在 III 区域(如图 2(e)),所以要使系统向 (0,1) 收敛,就要使  $x^*$  变小、 $y^*$  变大.由式(16)和(17)知:

$$x^* = \frac{\alpha\Delta D - P_c - P_A}{P_N}, y^* = 1 - \frac{\Delta C}{V}.$$

$$\text{即: } x^* = \frac{\alpha\Delta D - P_c}{p(D_N - D)} - \frac{\Delta D}{D_N - D} + 1, y^* = 1 - \frac{\Delta C}{V}.$$

$$x^*, y^* \text{ 分别对各变量参数求导,有}$$

$$\frac{\partial x^*}{\partial P_c} = \frac{-1}{p(D_N - D)} < 0,$$

$$\frac{\partial x^*}{\partial p} = -\frac{\alpha\Delta D - P_c}{p^2(D_N - D)} < 0,$$

$$\frac{\partial y^*}{\partial \Delta C} = -\frac{1}{V} < 0, \frac{\partial y^*}{\partial V} = \frac{\Delta C}{V^2} > 0.$$

易知  $x^*$  是关于  $P_c$  的单调减函数,是关于  $p$  的单调减函数;  $y^*$  是关于  $\Delta C$  的单调减函数,是关于  $V$  的单调增函数.各参数变化对策略的影响如表 8

所列,从而证得几个命题.

表 8 参数变化对策略的影响

Tab.8 The influence of the parameter change to the strategy

参数变化	均衡点变化	收敛点
$P_c \uparrow$	$x^* \downarrow$	(0,1)
$p \uparrow$	$x^* \downarrow$	(0,1)
$\Delta C \downarrow$	$y^* \uparrow$	(0,1)
$V \uparrow$	$y^* \uparrow$	(0,1)

### 3 结论

我国正面临着严峻的能源和环境问题,因年度碳排放量世界最多导致在国际上承受了很大的减排压力.电力行业是碳排放的关键领域,本文聚焦于电力行业的碳减排,研究基于市场化手段进行减排的路径.本文尝试运用演化博弈理论,构建了基于碳排放权交易的演化博弈模型,系统分析了碳排放权交易机制下地方政府和发电企业的演化博弈过程及演化稳定策略.研究发现当企业超额排放预期增加的收益小于遵守碳排约束带来的间接获利和出售富余碳配额收入之和时,超额排放对发电企业来说没有诱惑力,发电企业的策略将趋向于不超额排放,地方政府将选择宽松监管的策略.当地方政府监管宽松时的损失超过了严格监管时多付出的监管成本,而发电企业超额排放预期增加的收益大于遵守碳排约束的收益和出售碳配额收入之和,小于遵守碳排约束的收益、出售碳配额收入和超额排放时购入碳配额支出之和时,地方政府与发电企业的博弈则表现出周期行为模式.

从地方政府的角度来说,希望此博弈过程的最优策略是地方政府监管程度低,而发电企业碳排放控制在配额内.根据本文的分析结果,可以给出如下政策建议.

一是政府加大对积极遵守碳约束减排企业的激励,包括在多种政策上给予这些企业倾斜,加大对企业正面形象的宣传,增加公众对减排企业的认可等,使发电企业从减排行为中“尝到甜头”,能更自觉地实行减排行动.

二是宏观调控,适当提高碳市场碳交易价格,使得发电企业出售富余碳配额的收入增加,而超额排碳时购买碳配额的成本也提高,迫使发电企业改进发电技术、增大可再生能源发电比例,降低碳排放.这样用市场手段实现环境资源有效配置,提升了环境资源的利用效率,使社会的减排总成本最小化,最终可以达到国家控制碳排放总量的目标.

三是降低地方政府监管严格与宽松时的成本差,提高监管效率.监督成本确定时,如果地方政府的监督成本降低,政府将可以增加对发电企业检查监督的频率或加大对每次检查的投入力度,从而提高监管效率.而当监管严格与宽松时成本差减小,发电企业会更倾向于认为政府的监管程度会变高,从而使得发电企业更可能在既定碳配额内排放,实现减排目标.

四是加大低碳减排的宣传力度,加强民众监督,使得地方政府在企业超额排放时承受的损失增加,这种损失可以理解为政府的“政治成本”.改变单纯以 GDP 增长为指标的考核体系,当域内企业超额排放时,加大上级政府对本地政府的惩戒力度,促使地方政府提高监管程度,从而督促企业在规定配额内排放.

囿于时间和水平,本文存在一些不足之处:

①模型假设部分还不够精细.低碳减排问题涉及到的主体非常多,本文仅挑选研究了最明显的地方政府与发电企业群体之间的相互作用.在研究这两者博弈关系时,对很多情况也做了简单化的假设处理,比如发电企业本身的规模等不同以及忽视了时间本身对变量的影响,这可能在一定程度上削弱了本模型对实际情况的解释力.

②某些参数数据难以获取,未能进行实证分析.如发电企业从减排行为中的获利、地方政府未能阻止企业超额排放时的损失等变量数据无法直接获取,也难以评估.

针对以上不足,在未来的研究中可以重点关注和加强的方向有:尝试适当增加或变换研究参数,更多角度考虑影响博弈的机理;研究发电企业减排时,除了政府,还可以考虑公众、第三方环保组织、第三方碳排放核算机构等主体;对于难以获取直接数据的变量,尝试将变量细化,或找出具有代表性的指标来研究.

#### 参考文献(References)

- [1] 任玉珑,张新华,邹小燕. Stackelberg 模型的拓展及在政府对发电市场规制中的应用[J]. 管理工程学报, 2004, 18(2): 117-119.  
REN Yulong, ZHANG Xinhua, ZOU Xiaoyan. The development of Stackelberg model and the application for government regulation in generation market[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2004, 18(2): 117-119.
- [2] HOPKIN M. Emissions trading: The carbon game[J]. Nature, 2004, 432(7015): 268-270.
- [3] 李海锋,孙睿,任玉珑,等. 基于演化博弈的发电企业

- 二氧化碳排放市场交易机制创新[J]. 系统工程, 2010, 28(7): 56-60.
- LI Haifeng, SUN Rui, REN Yulong, et al. The market trading mechanism of carbon dioxide emissions of power plants based on evolutionary game innovation research[J]. Systems Engineering, 2010, 28(7): 56-60.
- [4] 张倩, 曲世友. 环境规制下政府与企业环境行为的动态博弈与最优策略研究[J]. 预测, 2013, 32(4): 35-40.
- ZHANG Qian, QU Shiyu. Research on dynamic game between government and corporation environmental behavior and optimal strategies based on environmental regulation[J]. Forecasting, 2013, 32(4): 35-40.
- [5] 张宏娟, 范如国. 基于复杂网络演化博弈的传统产业集群低碳演化模型研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(12): 41-47.
- ZHANG Hongjuan, FAN Ruguo. Research on low-carbon evolutionary model of traditional industrial clusters based on evolutionary games theory on complex networks[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(12): 41-47.
- [6] DU S, MA F, FU Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(1): 135-149.
- [7] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. 中国管理科学, 2009, 17(3): 81-86.
- DU Shaofu, DONG Junfeng, LIANG Liang, et al. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(3): 81-86.
- [8] CRAMTON P, KERR S. Tradeable carbon permit auctions: How and why to auction not grandfather[J]. Energy Policy, 2002, 30(4): 333-345.
- [9] BODE S. Multi-period emissions trading in the electricity sector: Winners and losers [J]. Energy Policy, 2006, 34(6): 680-691.
- [10] MADANI K. Modeling international climate change negotiations more responsibly: Can highly simplified game theory models provide reliable policy insights? [J]. Ecological Economics, 2013, 90: 68-76.
- [11] FRIEDMAN R D. Toward a partial economic, game-theoretic analysis of hearsay[J]. Minn L Rev, 1991, 76: 723-796.
- [12] 孙庆文, 陆柳, 严广乐, 等. 不完全信息条件下演化博弈均衡的稳定性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(7): 11-16.
- SUN Qingwen, LU Liu, YAN Guangle, et al. Asymptotic stability of evolutionary equilibrium under imperfect knowledge [J]. System Engineering Theory and Practice, 2003, 23(7): 11-16.