

引用格式:陈亚林,刘姣姣,王先甲,等.双重水资源规制下异质涉煤生产企业的策略行为[J].资源科学,2021,43(11):2251-2263. [Chen Y L, Liu J J, Wang X J, et al. Strategic behavior of heterogeneous coal-based enterprises under dual regulations[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2251-2263.] DOI: 10.18402/resci.2021.11.09

# 双重水资源规制下异质涉煤生产企业的策略行为

陈亚林<sup>1</sup>,刘姣姣<sup>1</sup>,王先甲<sup>2</sup>,于 荣<sup>1,3</sup>

(1. 南京财经大学管理科学与工程学院,南京 210023;2. 武汉大学经济与管理学院,武汉 430072;  
3. 南京航空航天大学经济管理学院,南京 211106)

**摘 要:**在行政规制与水权交易共存的制度框架下,分析高耗水、异质涉煤生产企业的策略行为,是提高区域水资源规制效率的基础。采用复制动态方程描述存在内生差异的涉煤生产企业行为的相互作用过程,建立非对称演化博弈模型,理论分析表明:两类异质涉煤生产企业群体的行为演化存在3个局部渐近稳定点且存在如下特征:惩罚程度由弱至强,涉煤生产企业群体的行为选择由“不友好”过渡为“友好”;当惩罚程度介于两类涉煤生产企业的额外收益时,其策略行为出现分化。结合不同惩罚程度情景的计算实验和仿真分析可知:“最小”期望效用差的变化驱动两类企业群体行为分化;弱势涉煤生产企业是“不友好”行为的跟随者和“友好”行为的领先者;群体“不友好”的初始状态不直接作用于企业行为选择,但是当两类企业群体的初始“不友好”概率均大于0.5时,水权交易将影响强势涉煤生产企业的行为收敛速率。研究结果表明行政惩罚能有效引导涉煤生产企业的“水友好”行为。因此,为了确保合理的市场集中度,应针对规制对象内生差异设计不同规制惩罚程度;并根据涉煤生产企业群体的初始“不友好”状况,引入水权交易可以有效增强惩罚规制的实施效果。

**关键词:**水资源规制;涉煤生产企业;非对称演化博弈;复制动态方程;计算实验;仿真

DOI :10.18402/resci.2021.11.09

## 1 引言

中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋,决定了煤炭在能源结构中具有基础性地位<sup>[1]</sup>;同时,煤炭还是炼焦、制油等化工产业的重要原材料。当前,涉煤产业链主要包括:原煤洗选、燃煤发电和煤化工,均存在高耗水环节<sup>[2]</sup>。中国煤炭资源与水资源的空呈逆向分布,导致富煤地区的涉煤生产与水资源的可持续发展相矛盾<sup>[3]</sup>。党的“十八大”以来,根据“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的原则<sup>[4-6]</sup>,设计合理的治理体系将有助于引导、激励涉煤生产企业切实执行区域水资源分配和治理计划,实现基于“以水定产”的区域水资源与产业协同发展<sup>[6]</sup>。现有治理框架主要包含行政与水权交易两种

规制方式,研究涉煤生产企业在双重规制下的策略行为对于优化治理机制设计,实现区域水资源可持续发展有积极意义<sup>[7-9]</sup>。

值得注意的是,在无差别制度供给下,存在内生差异的企业策略行为选择将出现分化,强势企业有可能无序扩张,产生社会福利损失<sup>[9,10]</sup>,富煤地区的水-煤矛盾将进一步恶化。据此,本文从问题还原角度出发,考虑行政惩罚与水权交易共存形成的双重规制约束,研究异质涉煤生产企业策略行为:建立非对称演化博弈模型,推导异质企业群体的演化稳定策略;在此基础上,通过计算实验与仿真分析异质企业群体行为的演化过程特征,提出优化规制设计的建议。

收稿日期:2020-08-28;修订日期:2021-03-11

基金项目:教育部人文社会科学青年项目(18YJCZH016);国家自然科学基金重点项目(72031009)。

作者简介:陈亚林,女,贵州贵阳人,副教授,硕导,研究方向为资源可持续发展的公共治理研究。E-mail: chen.yalin@nufe.edu.cn

通讯作者:王先甲,男,湖北汉川人,教授,博导,主要研究方向为基于博弈论的公共治理机制设计。E-mail: wangxj@whu.edu.cn

## 2 文献综述

水资源约束下的异质涉煤生产企业行为研究主要涉及涉煤生产的规制原因、规制框架下企业的“水友好”行为与异质性对企业行为影响3个方面的研究。

煤炭的开发与利用导致富煤地区的水资源匮乏,从而导致区域生态脆弱<sup>[1]</sup>,为了缓解该问题,实现水资源系统的可持续利用,涉煤生产企业作为责任主体可从技术层面上采取保水采煤、矿井水处理、空冷发电等节水与治污行为以降低单位产量耗水和污染<sup>[12]</sup>;企业还可从经营决策角度控制产量以减少用水和排污,从而实现用水量和水污染的控制。将上述节水、水处理和控制产量行为统称为“水友好”行为。企业的“水友好”行为不仅需要额外投资,甚至以牺牲利润为代价<sup>[12,13]</sup>。因此,企业缺乏主动选择节水、治污和控制生产规模的行为动力。为避免“公地悲剧”,需要建立水资源规制以引导企业的“水友好”行为。

涉煤生产过程外部性明显,是规制集中的产业。以“最严水资源管理”的“三条红线”为基础,相关规制机构形成涉煤生产企业的相关规制包括:产业规划调整、超额取水惩罚、奖励节水治污创新和水权交易等。上述规制可划分为行政和市场两种类型且均增加盲目扩张生产规模的用水成本,以约束其生产产量、激励节水<sup>[14-17]</sup>。优化规制设计是实现区域水资源、涉煤生产系统发展治理的核心<sup>[18,19]</sup>。相关研究围绕“区域水资源承载力”评价,分析不同水资源规制情景下的承载力的变化,以此作为反馈、调控规制设计的依据。该类研究的重点为水资源承载力评价指标体系构建、权重设置与综合评价方法<sup>[20]</sup>。评价模型的引入有利于分析涉煤生产对区域水资源系统的影响,形成可供借鉴的经验,但评价作为事后机制缺乏预警性。值得注意的是,微观相关利益主体的行为互动关系是宏观水资源系统“承载力”的基础,被规制者的行为将有助于提高规制的实施效率<sup>[21-23]</sup>。因此,对规制约束下涉煤生产企业的策略行为进行研究是优化规制设计的基础。

当前针对涉煤生产企业“水友好”行为的研究较少,但环境规制下企业的策略行为研究成果丰

富。考虑到环境问题本质上是复杂社会条件下,多元主体冲突、妥协与合谋的结果,博弈论研究了参与者之间的策略行为互动以及最终的均衡结果,因此,采用博弈模型研究环境问题中的主体的策略行为具有天然的合理性。例如,张艳芳<sup>[24]</sup>引入“生态补偿因子”,运用合作博弈的Shapley值法研究矿产资源开发收益分配问题以达到社会经济效益最优、生态环境影响最小的目标;李冬冬等<sup>[25]</sup>采用博弈论的重要分支激励理论构建企业减排行为的激励模型,发现,当存在双重信息不对称时,采用多重规制综合有助于激励企业积极减少排污;金帅等<sup>[26]</sup>基于动态博弈构建不同惩罚下的企业环境行为模型,发现高强度惩罚将可以预见企业的环境友好行为;另外,基于博弈模型研究发现环保监督成本、企业预期收益、声誉成本等均影响企业的环境行为<sup>[27,28]</sup>。上述分析均采用传统博弈模型,主要关注企业环境行为均衡的存在与特征,忽视企业作为决策主体的有限理性,以及决策主体间的相互学习机制。因此,考虑参与人有限理性和学习机制的演化博弈理论进入研究视野,其研究思路主要是建立有限理性参与人的行为模型,基于复制动态方程的稳定性分析,探讨特定情景下,参与主体的行为策略及其稳定性<sup>[28]</sup>。例如Ye等<sup>[29]</sup>分析演化稳定策略(Evolutionary Stable Strategy, ESS)发现,当规制惩罚的感知超过追寻利润的感知时,不同企业群体行为趋于“环境友好”策略。

分析相关研究可知,演化博弈理论对企业环境行为的研究已经较为成熟,但大部分已有研究将企业视为同类的参与者,主要研究同类企业群体行为,较少涉及不同类型企业群体间互相学习及其对整体行为的影响。本文将不同类型企业的内生特征用“异质”加以描述<sup>[30,31]</sup>。“异质”主要源于企业的要素和组织,具体表现为企业资本结构、生产率和成本等的差异。“异质”起初是用于描述会导致企业贸易比较优势的内生特征<sup>[32,33]</sup>,已逐步扩展为对企业内生的竞争优势描述<sup>[34]</sup>。本文围绕规制下异质涉煤生产企业群体的策略行为,展开后续研究:首先,基于非对称演化博弈模型,形式化异质涉煤生产企业的行为演化,证明演化稳定策略存在,讨论内生

2021年11月

差异如何驱动群体策略行为的分化;其次,采用计算实验验证不同行政惩罚情景下,异质涉煤生产企业的行为收敛于ESS的过程;采用系统动力学仿真两类企业群体对应期望值差异的变化趋势,据此分析惩罚规制驱动行为分化的过程及其收敛速率;最后,总结已有研究,提出针对“异质”涉煤生产企业的规制建议。

### 3 异质涉煤生产企业对规制的响应行为模型

#### 3.1 问题描述与支付矩阵

根据涉煤产品标准进行产品种类划分后,假设区域内属于同类市场的产品完全可替代。依据生产规模、成本以及市场控制力<sup>[34]</sup>,将处于同类产品市场的企业分为强势与弱势两类。其中, $n$ 个强势涉煤生产企业(简称强势企业, Advantage Enterprise),形成强势企业群体,记为 $A=\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ;  $m$ 个弱势涉煤生产企业(简称弱势企业, Disadvantage Enterprise),形成弱势企业群体,记为 $D=\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$ ;考虑水资源约束规制,两类企业群体的行为策略集合为{友好, 不友好}。其中,“友好(Friendly)”行为即根据水资源取水配额,“以水定产”控制产量以减少耗水;“不友好(Unfriendly)”行为即企业追逐单一利润目标,盲目扩大产量。为激励企业采取“友好”行为,规制者采用市场与行政两种引导手段:当生产耗水高于取水配额时,企业通

过水权交易获取额外用水,支付额外用水成本分别记为 $c_{aw}$ 、 $c_{dw}$ ;当规制者获知涉煤生产企业采取“不友好”行为,则处以行政惩罚,记为 $R$ 。强势企业群体 $A$ 中选择“不友好”行为的比例为 $x$ ,则选择“友好”行为的比例为 $(1-x)$ ;弱势企业群体 $D$ 选择不友好策略的比例为 $y$ ,则选择“友好”行为的比例为 $(1-y)$ 。由于,规制者与企业间的信息不对称,政府部门准确获知企业“不友好”行为的概率为 $\alpha$ 。总结博弈过程变量及定义如表1所示。

企业集合 $A$ 、 $D$ 中的企业随机配对进行博弈。在某阶段博弈中,强、弱企业均采取“友好”行为,所获收益分别记为 $U_a$ 、 $U_d$ ;如果企业采取“不友好”行为,除支付超限生产的生产成本 $c_a$ 、 $c_d$ 外,面临超额取水的行政惩罚 $R$ ;另外,双方均采取“不友好”行为时,通过水权交易获得部分超额用水,支付额外成本 $c_{aw}$ 、 $c_{dw}$ ;企业单方面控制产量从而减少销量,损失利润分别为 $\Delta I_a$ 、 $\Delta I_d$ 。据此,形成支付矩阵如表2所示。

#### 3.2 异质涉煤生产企业的复制动态分析

根据表2,强势企业采取“友好”策略的期望效用为:

$$U_{af} = (1-y)U_a + y(U_a - \Delta I_a) \quad (1)$$

强势企业群体采取“不友好”策略的期望效用:

$$U_{au} = (1-y)(U_a + \Delta u_a - c_a - \alpha R) + y(U_a + \Delta u_a - c_a - c_{aw} - \alpha R) \quad (2)$$

表1 模型变量与参数

Table 1 Description of model variables and parameters

符号	定义	符号	定义
$U_a$	双方均选择友好行为时,强势企业获得收益	$U_d$	双方均选择友好行为时,弱势厂商获得收益
$c_a$	强势企业扩大产量的额外生产成本	$c_d$	弱势企业扩大产量的额外生产成本
$\Delta u_a$	强势企业扩大产量所获额外收益( $\Delta u_a > c_a$ )	$\Delta u_d$	弱势企业扩大产量所获额外收益( $\Delta u_d > c_d$ )
$c_{aw}$	强势企业通过水权交易支付的额外水成本	$c_{dw}$	弱势企业通过水权交易支付的额外水成本
$\Delta I_a$	强势企业单方采取“友好”行为,所损失的市场收益	$\Delta I_d$	弱势企业单方采取“友好”行为,所损失的市场收益
$\alpha$	政府部门监管成功率( $0 < \alpha < 1$ )	$R$	涉煤生产企业超额取水的行政惩罚

表2 异质涉煤生产企业支付矩阵

Table 2 Pay-off matrix of heterogeneous coal-based producers

		强势企业	
		友好	不友好
弱势企业	友好	$U_a; U_d$	$U_a - \Delta I_a; U_d + \Delta u_d - c_d - \alpha R$
	不友好	$U_a + \Delta u_a - c_a - \alpha R; U_d - \Delta I_d$	$U_a + \Delta u_a - c_a - c_{aw} - \alpha R; U_d + \Delta u_d - c_d - c_{dw} - \alpha R$



综合可得,强势企业的平均期望效用为:

$$\bar{U}_a = (1-x)U_{af} + xU_{au} \quad (3)$$

同上,弱势企业采取“友好”策略的期望效用:

$$U_{df} = (1-x)U_d + x(U_d - \Delta I_d) \quad (4)$$

弱势企业采取“不友好”策略的期望效用:

$$U_{du} = (1-x)(U_d + \Delta u_d - c_d - \alpha R) + x(U_d + \Delta u_d - c_d - c_{dw} - \alpha R) \quad (5)$$

弱势企业的平均期望效用:

$$\bar{U}_d = (1-y)U_{df} + yU_{du} \quad (6)$$

当企业学习与行为模仿存在时滞时,两类企业群体采取“不友好”行为的比例  $x$ 、 $y$  是时间  $t$  的函数  $x(t)$ 、 $y(t)$ 。文献[35]指出区别于混合均匀的同质主体,当种群中存在个体一致时,需要以网络结构为基础,探讨个体微观层面上的演化动态。为了简化讨论,本文假设企业的学习发生在群体内部,采用复制动态方程(Replicator Dynamics, RD)描述两类企业群体随机配对的反复博弈中,群体行为策略的比例变化,根据式(1)-(3)推导强势企业的复制动态方程为:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(U_{au} - \bar{U}_a) = x(1-x)(U_{au} - U_{af}) \\ &= x(1-x)[\Delta u_a - c_a - \alpha R - y(c_{aw} - \Delta I_a)] \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(4)-(6)推导弱势企业的复制动态方程为:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= y(U_{du} - \bar{U}_d) = y(1-y)(U_{du} - U_{df}) \\ &= y(1-y)[\Delta u_d - c_d - \alpha R - x(c_{dw} - \Delta I_d)] \end{aligned} \quad (8)$$

令  $\frac{dx}{dt} = 0$ 、 $\frac{dy}{dt} = 0$ , 由复制动态方程(7)、(8),求得系统可能的平衡点分别为:  $P_1(0,0)$ 、 $P_2(1,0)$ 、 $P_3(0,1)$ 、 $P_4(1,1)$  和  $P_5(x^*, y^*)$ 。其中:

$$x^* = \frac{\Delta u_d - c_d - \alpha R}{c_{dw} - \Delta I_d}, y^* = \frac{\Delta u_a - c_a - \alpha R}{c_{aw} - \Delta I_a} \quad (9)$$

分别对  $x$  和  $y$  求偏导数,可得出 Jacobian 矩阵为:

$$\begin{aligned} J &= \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial x} & \frac{\partial X}{\partial y} \\ \frac{\partial Y}{\partial x} & \frac{\partial Y}{\partial y} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} (1-2x)[\Delta u_a - c_a - \alpha R - y(c_{aw} - \Delta I_a)]x(1-x)(\Delta I_a - c_{aw}) \\ (1-2y)[\Delta u_d - c_d - \alpha R - x(c_{dw} - \Delta I_d)]y(1-y)(\Delta I_d - c_{dw}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.3 演化稳定策略分析

将上述线性系统解的稳定性判定问题转化为对应线性齐次系统零解的稳定性问题<sup>[36]</sup>,证明不同惩罚程度下,演化策略稳定策略是否存在。

命题 1: 当  $R < \min\left(\frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta I_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta I_d}{\alpha}\right)$  时,平衡点  $P_4(1,1)$  为系统的局部渐近稳定点,则两类涉煤生产企业群体的演化稳定策略为{不友好,不友好}。

证明: 因为  $R < \min\left(\frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta I_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta I_d}{\alpha}\right)$ , 根据系统的 Jacobian 矩阵可解出相应的特征根分别为:  $\lambda_1 = -(\Delta u_a - c_a - \alpha R - c_{aw} + \Delta I_a)$ ,  $\lambda_2 = -(\Delta u_d - c_d - \alpha R - c_{dw} + \Delta I_d)$ ; 此时,系统特征根  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  均为负实部。因此,平衡点  $P_4(1,1)$  是系统演化稳定策略 ESS(1,1)。

由于内生异质性,强势企业成本控制、盈利能力均优于弱势企业,则有  $\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta I_a > \Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta I_d$ , 当  $\alpha$  一定时 ( $0 < \alpha < 1$ ), 由命题 1 可知,以弱势企业扩大产量所获额外收益 ( $\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta I_d$ ) 为界,若惩罚  $R$  小于该值,则两类企业“不友好”行为所获额外收益大于额外水成本与惩罚之和,两类群体均倾向于“不友好”行为。

命题 2: 当  $R > \max\left(\frac{\Delta u_d - c_d}{\alpha}, \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha}\right)$  时,平衡点  $P_1(0,0)$  为系统的局部渐近稳定点,双方行为策略演化稳定为{友好,友好}。

证明: 局部平衡点为  $P_1(0,0)$  时,根据系统的 Jacobian 矩阵可解出相应的特征根分别为:  $\lambda_1 = \Delta u_a - c_a - \alpha R$ ,  $\lambda_2 = \Delta u_d - c_d - \alpha R$ ; 由于  $R > \max\left(\frac{\Delta u_d - c_d}{\alpha}, \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha}\right)$ , 则两个特征根均为负实部; 因此,  $P_1(0,0)$  为系统的局部渐近稳定点,此时系统的演化稳定策略 ESS(0,0)。

由命题 2 可知,若惩罚  $R$  大于强势企业扩大产量所获额外收益,此时两类企业“不友好”所获额外收益小于惩罚  $R$ ,两类群体均倾向于选择“友好”行为。

2021年11月

命题3: 由于惩罚  $R \notin \left( \frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d}{\alpha} \right)$ , 平衡点  $P_3(0, 1)$  不是系统的局部渐近稳定点。

证明: 由于强势企业的获利优势, 以下关系成立: ①  $\Delta u_a - c_a > \Delta u_2 - c_2$ ; ②  $\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a > \Delta u_2 - c_2 - c_{aw} + \Delta l_a > \Delta u_d - c_d$ 。因此, 惩罚:

$$R \notin \left( \frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d}{\alpha} \right) \quad (11)$$

局部平衡点为  $P_3(0, 1)$  时, 根据系统的 Jacobian 矩阵可解出相应的特征根分别为:  $\lambda_1 = \Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a - \alpha R$ ,  $\lambda_2 = -(\Delta u_d - c_d - \alpha R)$ 。此时, 由于  $R \notin \left( \frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d}{\alpha} \right)$ , 上述特征根  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为非负实部。由此可知,  $P_3(0, 1)$  不是系统的局部渐近稳定点, 则两类群体不可能达到  $ESS(0, 1)$ , 即强势企业群体选择“友好”行为, 弱势企业群体选择“不友好”行为。

命题4: 当  $\frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta l_d}{\alpha} < R < \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha}$  时, 平衡点  $P_2(1, 0)$  为系统的局部渐近稳定点, 则两类企业群体最终达到的演化稳定策略为{不友好, 友好}。

证明: 局部平衡点为  $P_2(1, 0)$  时, 根据系统的 Jacobian 矩阵可解出相应的特征根分别为:  $\lambda_1 = -(\Delta u_a - c_a - \alpha R)$ ,  $\lambda_2 = \Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta l_d - \alpha R$ 。当  $\frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta l_d}{\alpha} < R < \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha}$  时, 系统的两个特征根  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  均为负实部, 点  $P_2(1, 0)$  是系统的局部渐近稳定点, 即演化稳定策略  $ESS(1, 0)$ 。

由命题4可知, 当惩罚  $R$  介于弱势企业“不友好”所获额外收益与强势企业扩大产量新增利润时, 参与博弈的企业群体行为选择出现分化, 系统  $ESS$  为{不友好, 友好}, 即强势企业群体倾向于“不友好”, 弱势企业群体则倾向于“友好”。

命题5: 当  $0 < x^*, y^* < 1$  时, 平衡点  $P_5(x^*, y^*)$  为系统的鞍点, 非动态系统的演化稳定策略。

证明: 当局部平衡点为  $E_5(x^*, y^*)$  时, 系统的 Jacobian 矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -(1-x)(\Delta u_d - c_d - \alpha R) \\ -(1-y)(\Delta u_a - c_a - \alpha R) & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

令  $P = -(1-x)(\Delta u_d - c_d - \alpha R)$ ,  $Q = -(1-y)(\Delta u_a - c_a - \alpha R)$ , 矩阵  $J$  的特征根为  $\lambda_1 = \sqrt{PQ}$ ,  $\lambda_2 = -\sqrt{PQ}$ 。由于  $0 < x < 1$ ,  $0 < y < 1$ , 可得  $PQ > 0$ , 则系统特征根  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  异号,  $P_5(x^*, y^*)$  为系统鞍点而非局部渐近稳定点。

由命题1-5可知, 不同惩罚程度  $R$  下, 异质涉煤生产企业群体的  $ESS$  为  $P_1(0, 0)$ ,  $P_2(1, 0)$ ,  $P_4(1, 1)$ 。

### 3.4 讨论1: 综合相位图与异质企业行为特征分析

惩罚  $R$  由强到弱分别记为  $R_{tough}$ ,  $R_{moderate}$ ,  $R_{mild}$ , 对应鞍点坐标分别记为  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , 由(9)式可知:

$$x_0 = \frac{\Delta u_d - c_d - \alpha R_{tough}}{c_{dw} - \Delta l_d}, y_0 = \frac{\Delta u_a - c_a - \alpha R_{tough}}{c_{aw} - \Delta l_a} \quad (13)$$

$$x_1 = \frac{\Delta u_d - c_d - \alpha R_{moderate}}{c_{dw} - \Delta l_d}, y_1 = \frac{\Delta u_a - c_a - \alpha R_{moderate}}{c_{aw} - \Delta l_a} \quad (14)$$

$$x_2 = \frac{\Delta u_d - c_d - \alpha R_{mild}}{c_{dw} - \Delta l_d}, y_2 = \frac{\Delta u_a - c_a - \alpha R_{mild}}{c_{aw} - \Delta l_a} \quad (15)$$

由于  $R_{tough} > R_{moderate} > R_{mild}$ , 则  $x_0 < x_1 < x_2$ ;  $y_0 < y_1 < y_2$ , 综合复制动态相位图、动态关系和稳定性如图1所示:

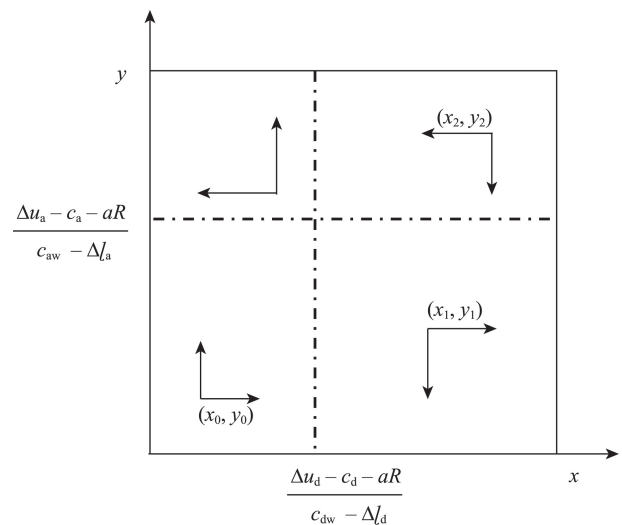


图1 异质涉煤生产企业群体的综合相位图

Figure 1 Comprehensive phase diagram of heterogeneous coal-based enterprises

由图1可知,在不同规制惩罚情景下,强势和弱势企业群体的策略行为的特征如下:

(1)两类企业群体最终演化结果均不稳定于以某一比例选择友好或者非友好,即不存在混合策略。两类企业群体的演化博弈系统存在5个可能的平衡点,其中,  $P_2$ ,  $P_4$  为ESS,  $P_5$  为鞍点。

(2)惩罚程度  $R$  决定两类企业群体行为的ESS:当惩罚为  $R_{\text{tough}}$  时,收敛于  $P_1(0, 0)$ ; 当惩罚为  $R_{\text{moderate}}$  时,强势企业群体趋向于选择“不友好”行为,而弱势企业群体趋向于采取“友好”行为,收敛于  $P_2(1, 0)$ ; 当惩罚为  $R_{\text{mild}}$  时,两类企业群体选择“友好”行为的概率逐渐减小,收敛于  $P_4(1, 1)$ 。

两类异质企业的复制动态演化轨迹如图2所示:

根据图2所示演化轨迹,参数对企业行为策略的影响为:

①两类企业采取“不友好”行为获得额外收益  $\Delta u_a$ 、 $\Delta u_d$ 。当强势企业的额外收益  $\Delta u_a$  越高以及弱势企业的额外收益  $\Delta u_d$  越小时,曲线下  $P_1P_3P_4P_5$  的面积愈大,说明两类企业群体收敛于ESS  $(1, 0)$  的可能性愈高。

②两类企业水权交易产生的额外水成本  $c_{aw}$ 、 $c_{dw}$  增大,鞍点将向左下方移动,表明两类企业群体收敛于ESS  $(0, 0)$  的概率提高。

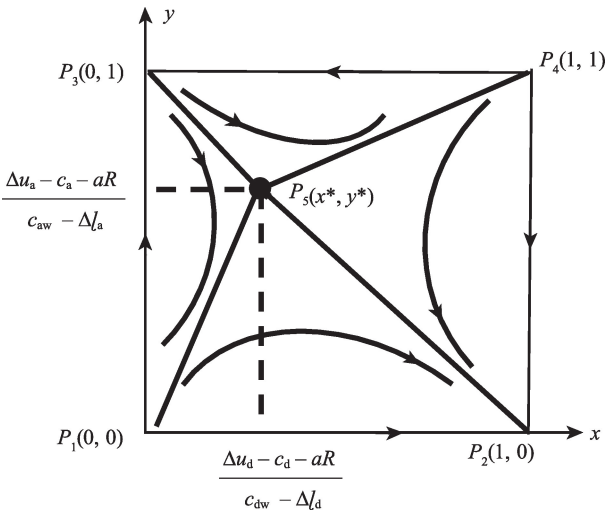


图2 异质涉煤生产企业群体的复制动态演化轨迹

Figure 2 Replication dynamic evolution trails of heterogeneous coal-based enterprises

③一方采取“不友好”行为,另一方采取“友好”行为的强、弱企业收益损失分别为  $\Delta I_a$ 、 $\Delta I_d$ 。若  $\Delta I_a > \Delta I_d$ ,  $c_{aw} - c_{dw} < \Delta I_a - \Delta I_d$ , 由图2所示,当  $R$  处于一定范围时,异质涉煤企业的行为选择差异越明显,四边形  $P_1P_3P_4P_5$  面积愈大,两类企业收敛于ESS  $(1, 0)$  的概率愈高。

基于上述理论分析,下一节采用数值实验和仿真刻画不同惩罚情景下,企业群体策略行为收敛于ESS的过程与行为驱动原因。

4 计算实验与仿真

4.1 参数设置

根据企业内生异质性的来源可知:强势企业存在规模优势,其成本控制、额外获利能力均优于弱势企业,因此  $c_a < c_d$ ,  $\Delta u_a > \Delta u_d$ ; 由于异质企业扩张能力差异,强势企业单方“不友好”导致的收益损失小于弱势企业单方“不友好”导致的收益损失,即  $\Delta I_a < \Delta I_d$ ; 由于强势企业在水权交易过程中议价能力更强<sup>[37]</sup>,因此  $c_{aw} < c_{dw}$ 。根据上述分析,设置强、弱势企业的静态参数值如表3所示。

4.2 计算实验:异质涉煤生产企业行为策略演化过程

根据命题1-3,设置3种程度的惩罚情景,  $i$  表示某种惩罚情景,  $i=1, 2, 3$  分别表示无惩罚、适中惩罚和强硬惩罚,分别设定为:无惩罚  $R_1=0$ 、适中惩罚  $R_2=90$ 、强硬惩罚  $R_3=180$ ;  $x, y$  分别表示强势与弱势企业不友好概率,则惩罚情景  $i$  下,强、弱势企业群体的初始不友好概率为  $(x_{0i}, y_{0i})$ ,按照该初始概率由小到大设置为:  $(0.10, 0.25)$ 、 $(0.50, 0.50)$  和  $(0.82, 0.73)$ ; 仅存在某惩罚情景  $i$  时,强、弱势企业群体选择不友好的概率为  $(x_i, y_i)$ ; 行政惩罚和水权交易叠加

表3 异质涉煤生产企业计算实验参数值设定

Table 3 Parameter setting of calculation experiment for heterogeneous coal-based enterprises

强势企业		弱势企业	
$\Delta u_a$	100	$\Delta u_d$	50
$c_a$	25	$c_d$	40
$c_{aw}$	12	$c_{dw}$	15
$\Delta I_a$	6	$\Delta I_d$	9
$\alpha$	0.5	$\alpha$	0.5

2021年11月

(简称双重规制)时,强、弱势企业群体不友好的选择概率为 $(x_i^w, y_i^w)$ 。采用Matlab和Python实现计算实验,获得异质企业收敛于ESS的过程如下详述。

(1)当惩罚为 $R_1=0$ 时,计算实验结果如图3所示:

由图3可知,当 $R_1=0$ 时,满足:

$$R < \min \left( \frac{\Delta u_a - c_a - c_{aw} + \Delta l_a}{\alpha}, \frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta l_d}{\alpha} \right) \quad (16)$$

强、弱势企业群体行为收敛于 $ESS(1, 1)$ ,与命题1的结论相符;当无惩罚规制时,强势企业群体选择“不友好”的概率逐步增加,且企业间相互学习、扩散,最后整体收敛于“不友好”行为;相较于强势企业,弱势企业选择“不友好”概率的渐进趋势较缓,当强势企业群体行为收敛于“不友好”时,弱势企业群体快速收敛于“不友好”,可见弱势企业是“不友好”行为的“跟随者”;对比水权交易下两类企业群体的行为演化轨迹可知:当惩罚不存在时,市场化的水权交易对涉煤生产企业的行为无影响;此时,两类企业群体的初始不友好概率对上述演化趋势无影响。

(2)当惩罚 $R_2=90$ 时,计算实验结果如图4所示:

由图4可知, $R_2=90$ 时,满足:

$$\frac{\Delta u_d - c_d - c_{dw} + \Delta l_d}{\alpha} < R < \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha} \quad (17)$$

两类企业群体的行为收敛为(不友好,友好),与命题4的结论相符:在适中惩罚情景下,弱势企业群体倾向选择“友好”行为,强势企业扩大生产所获利润高于惩罚,该群体倾向选择“不友好”行为,收敛速度与强势企业群体初始不友好概率收敛速度 $x_{0i}$ 呈正比;当两类群体的初始“不友好”概率较小时,水权交易不影响企业行为的收敛趋势与速度;当初始“不友好”概率均大于(0.50, 0.50)时,弱势企业群体收敛于“友好”行为的速度不变,强势企业群体收敛于“不友好”行为速度变缓。

(3)当 $R_3=180$ 时,计算实验结果如图5所示。

由图5可知, $R_3=180$ ,满足 $R > \frac{\Delta u_a - c_a}{\alpha}$ ,强势与

弱势企业的行为收敛于(友好,友好),与命题2的结论相符:强硬惩罚情境下,弱势企业群体的收敛速

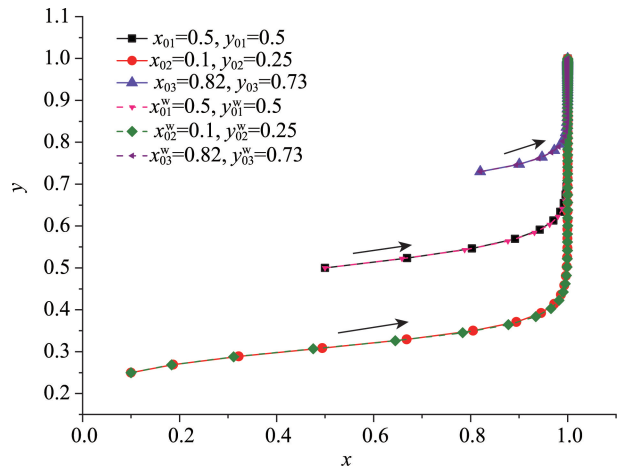


图3  $R_1=0$ ,收敛于 $ESS(1, 1)$ 的演化过程

Figure 3 The evolving process of  $(x, y)$  converging to evolutionary stable strategy  $ESS(1, 1)$  under  $R_1=0$

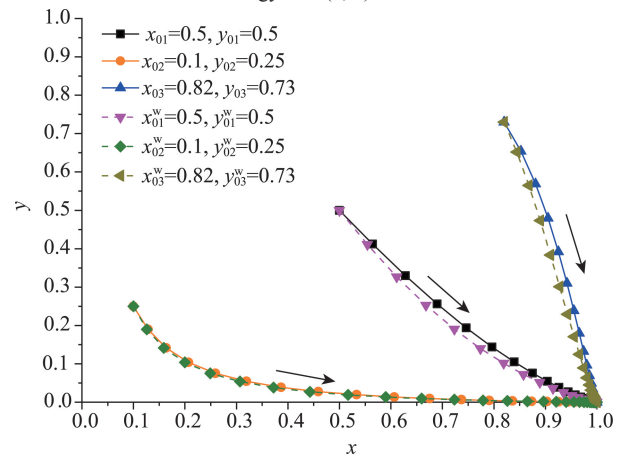


图4  $R_2=90$ , $x, y$ 收敛于 $ESS(1, 0)$ 的演化过程

Figure 4 The evolving process of  $(x, y)$  converging to evolutionary stable strategy  $ESS(1, 0)$  under  $R_2=90$

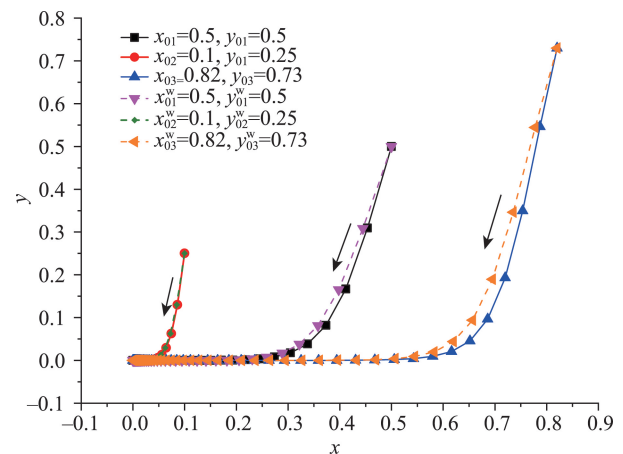


图5  $R_3=180$ , $x, y$ 收敛于 $ESS(0, 0)$ 的演化过程

Figure 5 The evolving process of  $(x, y)$  converging to evolutionary stable strategy  $ESS(0, 0)$  under  $R_3=180$



度快于强势企业群体,两类群体的初始“不友好”概率对该趋势无影响;另外,当两类群体初始“不友好”概率较低时,水权交易对收敛于“不友好”行为无影响;当两类群体初始“不友好”概率均高于0.50时,额外水成本加快了强势企业的收敛于“友好”行为,但是对弱势企业无影响。由此可知,弱势企业对加大惩罚响应程度高,是“友好”行为的跟随者。

分析计算实验结果可知:①惩罚规制决定了异质涉煤生产企业行为选择;②两类企业群体初始“不友好”概率不影响群体行为的演化趋势;③水权交易对群体行为的选择趋势没有影响,但是在适中和强硬惩罚情景下,水权交易产生的额外用水成本将影响行为收敛速率;④由于对惩罚的担心,弱势企业群体是“不友好”行为的跟随者,而强势企业群体则是“友好”行为的跟随者。

#### 4.3 仿真:惩罚规制与水权交易市场共同作用下异质涉煤生产企业的收益演化趋势

在不同惩罚情景下,仿真两类企业不同行为的期望效用差异的演化过程,有助于理解规制改变期望效用,进而驱动企业行为选择的过程。由于学习

机制的存在,企业均依据上一期行为的结果反馈调整当期的行为,因此,采用存在反馈环节的系统动力学(System Dynamics, SD)仿真企业的策略行为及其对应期望效用变化。仿真过程中遵循以下假设:

①若需水量超过配额,企业选择“不友好”行为,即通过水权交易市场购买1/2的超额用水的,1/2通过非法取水获得且监管成功概率为50%。

②两类企业主体均可获知前一阶段同类、异类企业的收益情况。

③两类企业依据当期期望效用差(期望效用差=“友好”行为所获期望效用-“不友好”行为所获期望效用),如果期望效用差小于0,则下一阶段采取“友好”行为,反之采取“不友好”行为。

随机配对竞争的两个企业行为互动的仿真流程图如图6所示。图6中,辅助变量监管成功概率、生产成本、水成本的赋值与计算实验一致。分别取初始不合作概率为(0.94, 0.13)、(0.15, 0.92)、(0.50, 0.50)、(1.00, 1.00)和(0, 0),对应期望效用差值曲线编号为1-5。

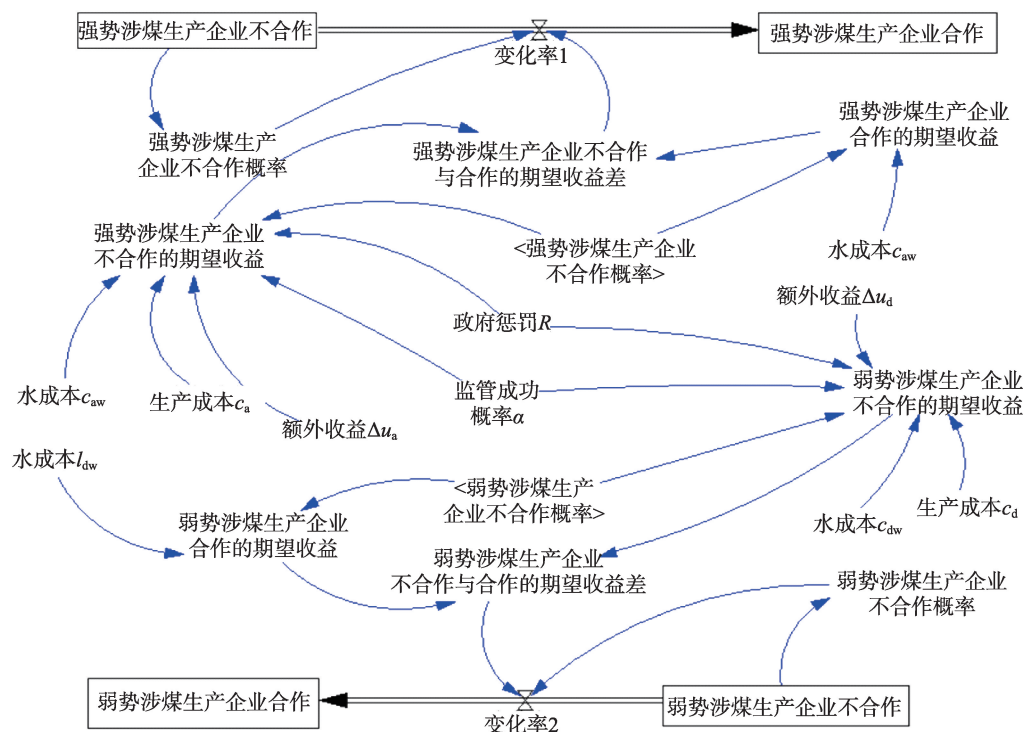


图6 异质涉煤生产企业行为演化仿真流程图

Figure 6 Flowchart of heterogeneous coal-based enterprises' behavior change simulation



2021年11月

(1)情景仿真1: $R_1=0$ 时,强势与弱势企业“友好”与“不友好”所获得的期望效用差值的变化情况如图7所示。

由图7可知:当无惩罚规制时,两类企业选择“不友好”行为的期望效用均大于选择“友好”行为的收益;以群体“不友好”初始概率(0, 0)、(1.00, 1.00)所对应的期望效用差曲线4、5为界限,图7a中的曲线2、3、1与图7b中的曲线1、3、2表明,随着群体中“不友好”初始概率的减小,期望效用差值的绝对值增大,因此,两类涉煤企业更倾向选择“不友好”;另外,对比两类企业期望效用差值的下降速率可知,弱势企业作为“不友好”行为的跟随者,一旦发现存在“不友好”行为将跟进,与计算实验中弱势企业的行为演化特征相符。

(2)情景仿真2: $R_2=90$ 时,强势与弱势企业“友好”与“不友好”所获得的期望效用的差值变化情况如图8所示。

由图8可知: $R_2=90$ 时,强势企业倾向于选择“不友好”策略;同时,弱势企业倾向于选择“友好”策

略;另外,对比两图中曲线的演化速度可知,强势企业演化为“不友好”的速率与弱势企业群体初始选择“不友好”的概率呈正向关系;同时,弱势企业群体收敛于“友好”行为的速率与强势企业群体初期的“不友好”概率成正向关系;可见,适中惩罚下,弱势企业不是“不友好”行为的跟随者,而且“不友好”强势企业越多,弱势企业更倾向于选择“友好”。

(3)情景仿真3: $R_3=180$ 时,强势与弱势企业“友好”与“不友好”所获得的期望效用的差值变化情况如图9所示。

由图9可知:在强硬惩罚机制下,两类企业选择“友好”行为的期望效用大于选择“不友好”行为的期望效用,因此均选择“友好”作为均衡策略行为;值得注意的是,两类企业向“友好”行为演化的速率分别与另一类涉煤企业群体的初始“不友好”概率呈正向变化,即弱势企业初始“不友好”概率越高,强势企业群体向“友好”行为演化所需时间越短;同时,强势企业初始“不友好”概率越高,弱势企业群

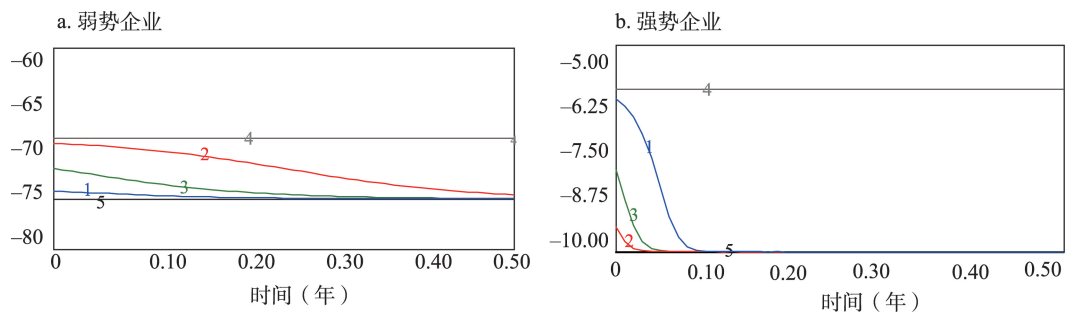


图7  $R_1=0$ 时,异质企业的期望效用差的演化

Figure 7 Change of expected utilities' difference of heterogeneous coal-based enterprises under  $R_1=0$

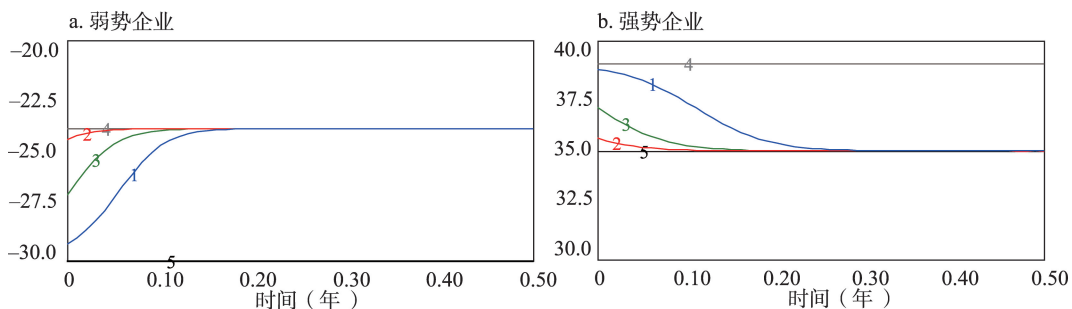


图8  $R_2=90$ 时,异质企业的期望效用差的演化

Figure 8 Change of expected utilities' difference of heterogeneous coal-based enterprises under  $R_2=90$

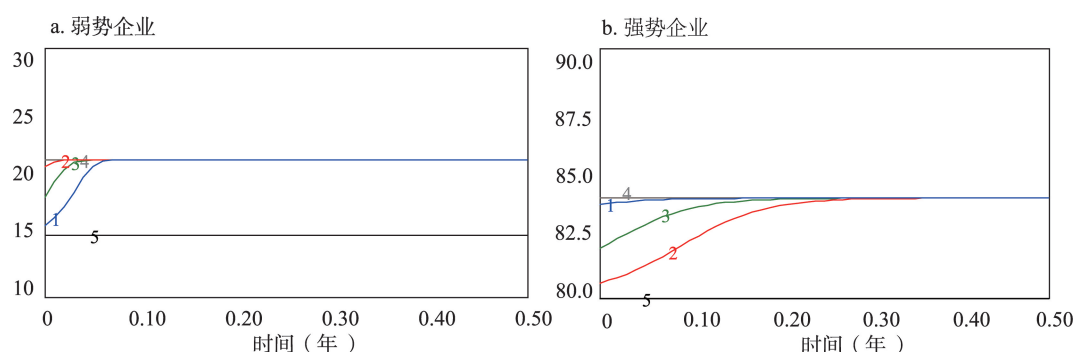


图9  $R_3=180$ 时,异质企业的期望效用差的演化

Figure 9 Change of expected utilities' difference of heterogeneous coal-based enterprises under  $R_3=180$

体向“友好”行为演化所需时间越短。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

在制度环境给定的前提下,市场主体旨在将各类交易与各类治理结构匹配,以促进规划效果的实现<sup>[38]</sup>。因此,在进行治理机制设计时,需要深入考察各市场主体的策略行为形成过程。以往缓解水资源约束的规制机制设计采取自上而下的分析模式,使得实施效果有所折扣。造成这一现象的根本原因在于缺少对涉煤生产企业行为的分析。本文基于非对称演化博弈模型和计算实验,对水资源约束下的异质涉煤生产企业行为进行建模与仿真。主要结论如下:

(1)行政惩罚和水权市场交易的双重规制下,涉煤企业的行为演化趋势由惩罚程度主导。不同惩罚程度下,期望效用差值导致两类企业行为策略的分化,弱势企业对惩罚和水成本更敏感,是“不友好”行为的跟随者,强势企业是“友好”行为的先行者。

(2)同一惩罚程度下,弱势企业效用变差的概率高于强势企业,弱势企业倾向选择“友好”,强势企业的“不友好”将有助于其扩大市场份额,提升讨价还价能力;在一定的惩罚范围内,水权交易产生的额外水成本仅影响强势企业群体的行为收敛速率。

(3)在适中或强硬的惩罚背景下,由于异质企业群体间相互学习的存在,某企业向ESS演化的速率分别与另一类企业群体的初始“不友好”概率呈

正向关系。

### 5.2 建议

中国水资源与煤炭资源空间分布不平衡,随着富煤地区涉煤产业的增长,水资源可持续发展受到威胁。推动“把水资源作为最大的刚性约束”,亟需系统谋划,抓紧建立健全相关制度体系<sup>[39]</sup>。根据本文的研究结论,结合当前水资源管理现状,提出富煤地区的水资源规制设计建议如下:

(1)中国水资源治理正处于现代化转型的关键时期,对市场化水资源配置机制、制度安排及具体管理手段仍处于探索阶段,因此行政规制将主导现阶段的富煤地区水资源管理。根据研究结论:行政惩罚有助于引导企业选择产量约束、节水等“友好”行为,因此应重视超额取水的行政惩罚机制设计。

(2)因时因地开展以水权交易为基础的市场化水资源管理,目前中国探索水权交易的地区主要局限于黄河、西北内陆河等水资源短缺地区,确权水量与实际需水量差距较大,确权落实过程中存在阻力,水权惜售现象普遍,水权交易市场不活跃<sup>[39]</sup>。因此,在富煤地区应该摸底涉煤生产企业采取“不友好”行为意向,如果两类涉煤生产企业的产量扩张意图强烈,则应抓紧开展确权,明确水权交易规制,配合行政规制,提高规制效率。

(3)正视涉煤生产企业的内生差异,引导市场健康发展。在同一惩罚力度下,弱势企业处于劣势,其选择“友好”行为的概率高于强势企业。因此,为了保持市场活力,重视涉煤企业的内生差异,设计差异化惩罚,研究建立工业水价阶梯奖惩机

2021年11月

制,强化对异质企业激励功能,改善弱势企业所处市场环境。

富煤地区的水资源规制设计、落实涉及到规制者、涉煤生产企业、公众等多个利益相关主体,本文仅完成对规制约束下涉煤生产企业的策略行为研究。今后的研究重点包括考虑引入阶梯水权定价机制、优化对异质涉煤生产企业的水资源确权方案;另外,将进一步结合富煤区域现实规制的实施效果,开展涉煤生产企业“水友好”行为的实证研究。

### 参考文献(References):

- [1] 国家发展和改革委员会. 能源发展“十三五规划”[EB/OL]. (2017-05-17) [2020-08-13]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjj-zxgh/201705/t20170517\\_1196766.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjj-zxgh/201705/t20170517_1196766.html). [National Development and Reform Commission. The “Thirteen-Fifth” Planning of Energy Development[EB/OL]. (2017-05-17) [2020-08-13]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjj-zxgh/201705/t20170517\\_1196766.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjj-zxgh/201705/t20170517_1196766.html).]
- [2] 陈亚林, 桂旺胜, 董前进, 等. 涉煤生产对区域水资源承载系统的影响仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4700-4777. [Chen Y L, Gui W S, Dong Q J, et al. Simulation of influence of coal-based industry on water resources bearing system[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4700-4777.]
- [3] 管恩宏, 高娟, 王小军, 等. 强化大型煤电基地规划水资源论证工作的思考[J]. 中国水利, 2014, (13): 19-22. [Guan E H, Gao J, Wang X J, et al. Strengthening water resources appraisal in planning of large coal and electricity based[J]. China Water Resources, 2014, (13): 19-22.]
- [4] 国务院. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL]. (2012-01-12) [2020-08-13]. [[http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content\\_2878992.htm](http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm)]. State Council. Opinions of the State Council on Implementing the Strictest Water Resources Management System[EB/OL]. (2012-01-12) [2020-08-13]. [http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content\\_2878992.htm](http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm).]
- [5] 国务院. 关于印发水污染防治行动计划的通知水污染防治行动计划[EB/OL]. (2015-04-02) [2020-08-13]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm). [State Council. Notice on Printing and Distributing Water Pollution Prevention and Control Action Plan[EB/OL]. (2015-04-02) [2020-08-13]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm).]
- [6] 陈雷. 全面实施水资源消耗总量和强度双控行动着力保障经济社会持续健康发展[J]. 中国水利, 2016, (23): 21-24. [Chen L. Fully implement the double control action of amount and intensity of water resources consumption to ensure the sustainable and healthy development of economy and society[J]. China Water Resources, 2016, (23): 21-24.]
- [7] Wang X J, Elmahdi A, Zhang J Y, et al. Water use and demand forecasting model for coal-fired power generation plant in China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2019, 21: 1675-1693.
- [8] Jaramillo P, Nazemi A. Assessing urban water security under changing climate: Challenges and ways forward[J]. Sustainable Cities & Society, 2017, 41: 907-918.
- [9] 邵利敏, 高雅琪, 王森. 环境规制与资源型企业绿色行为选择: “倒逼转型”还是“规制俘获”[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(6): 62-68. [Shao L M, Gao Y Q, Wang S. Environmental regulation and green behavior choice from resource-based enterprises: “reverse transformation” or “regulation capture” [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2018, 20(6): 62-68.]
- [10] Fan X S, Chen Y J, Zhou J J. Social benefits of government investment in enterprises[J]. SSRN Electronic Journal, 2020, DOI: 10.2139/ssrn.3514295.
- [11] 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 813-820. [Hou E K, Che X Y, Feng J, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 813-820.]
- [12] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术 with 战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221. [Peng S P, Bi Y L. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.]
- [13] 张军, 任相坤. 煤化工项目循环水冷却系统工艺对比及技术经济分析研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(11): 29-32. [Zhang J, Ren X K. Technological comparison and tech-economic analysis of cooling water system for coal chemical projects[J]. Coal Engineering, 2018, 50(11): 29-32.]
- [14] 孙魁, 范立民, 夏玉成, 等. 基于保水采煤理念的地质环境承载力研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 831-840. [Sun K, Fan L M, Xia Y C, et al. Research on carrying capacity of geological environment based on the concept of water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 831-840.]
- [15] Cremades R, Rothausen S G S A, Conway D, et al. Co-benefits and trade-offs in the water-energy nexus of irrigation modernization in China[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(5): 054007.
- [16] Qin Y, Curmi E, Kopec G M, et al. China’s energy-water nexus as-

- essment of the energy sector's compliance with the "3 Red Lines" industrial water policy[J]. *Energy Policy*, 2015, 82: 131–143.
- [17] Sun W J, Qiang W, Liu H L, et al. Prediction and assessment of the disturbances of the coal mining in Kailuan to Karst groundwater system[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2015, 89: 136–144.
- [18] Morley M, Savi D. Water resource systems analysis for water scarcity management: The thames water case study[J]. *Water*, 2020, DOI: 10.3390/w12061761.
- [19] Sun J, Wang J N, Wei Y Q, et al. The haze nightmare following the economic boom in China: Dilemma and tradeoffs[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2016, DOI: 10.3390/ijerph13040402.
- [20] Li Y, Chen Y Y. Variable precondition S-type cloud algorithm: Theory and application on water resources carrying capacity assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107209.
- [21] Du J G, Wang M, Chen X Y, et al. Study on evolution of enterprise's environmental behavior under public participation[J]. *Operations Research and Management Science*, 2013, (1): 244–251.
- [22] Li Y B. Enterprise environmental strategy formation mechanism: An analysis framework from the micro-dynamic perspective[J]. *Chinese Journal of Management*, 2012, 9(8): 1233–1238.
- [23] Martín A M, Hernández B, Alonso I. Pro-environmental motivation and regulation to respect environmental laws as predictors of illegal anti-environmental behaviour[J]. *Psychology*, 2017, 8(1): 33–74.
- [24] 张艳芳. 矿产资源开发收益合理共享机制研究: 基于Shapley值修正算法的分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 645–653. [Zhang Y F. Reasonable revenue distribution mechanism of mineral resource development based on modified Shapley values[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 645–653.]
- [25] 李冬冬, 吕宏军, 李品, 等. 基于双重信息非对称的排污权交易机制与最优环境政策设计[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(11): 219–230. [Li D D, Lv H J, Li P, et al. Emission trading mechanism and environmental policy design under information asymmetry of abatement cost and pollution[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(11): 219–230.]
- [26] 金帅, 张洋, 杜建国. 动态惩罚机制下企业环境行为分析与规制策略研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(S1): 637–644. [Jin S, Zhang Y, Du J G. Corporate environmental behavior and regulatory choice under dynamic punishment[J]. *China Journal of Management Science*, 2015, 23(S1): 637–644.]
- [27] 陈真玲, 王文举. 环境税制下政府与污染企业演化博弈分析[J]. *管理评论*, 2017, 29(5): 226–236. [Chen Z L, Wang W J. Evolutionary game analysis of governments and polluting firms considering environmental tax regulation[J]. *Management Review*, 2017, 29(5): 226–236.]
- [28] Xu R, Wang Y R, Wang W B, et al. Evolutionary game analysis for third-party governance of environmental pollution[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2018, (5): 3143–3154.
- [29] Ye L, Fang Y. Evolutionary game analysis on firms and banks' behavioral strategies: Impact of environmental governance on interest rate setting[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106501.
- [30] Yeaple S R. Firm heterogeneity and the structure of U. S. multinational activity[J]. *Journal of International Economics*, 2009, 78(2): 206–215.
- [31] Bernard A B, Jensen J B, Redding S J, et al. The empirics of firm heterogeneity and international trade[J]. *Annual Review of Economics*, 2011, DOI: 10.2139/ssrn.2201804.
- [32] Greenaway D, Kneller R. Firm heterogeneity, exporting and foreign direct investment: A survey[J]. *The Economic Journal*, 2010, 117: 134–161.
- [33] Duanmu J L. Firm heterogeneity and location choice of Chinese Multinational Enterprises (MNEs)[J]. *Journal of World Business*, 2012, 47(1): 64–72.
- [34] Markus G, Magnus N. Knowledge externalities and firm heterogeneity: Effects on high and low growth firms[J]. *Papers in Regional Science*, 2019, 98(1): 93–114.
- [35] 王先甲, 刘佳. 具有外部性的友好博弈问题中的稳定的联盟结构[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(5): 1173–1182. [Wang X J, Liu J. Stable coalition structures in cooperative game with externalities[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2018, 38(5): 1173–1182.]
- [36] 陆启韶, 彭临平, 杨卓琴. 常微分方程与动力系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. [Lu Q S, Peng L P, Yang Z Q. Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010.]
- [37] Zanjani H, Abdolabadi H, Niksokhan M H, et al. Influential third party on water right conflict: A game theory approach to achieve the desired equilibrium (case study: Ilam dam, Iran)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 214: 283–294.
- [38] Teece D J. Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of sustainable enterprise performance[J]. *Strategic Management Journal*, 2010, 28(13): 1319–1350.
- [39] 陈茂山, 陈金木. 把水资源作为最大的刚性约束如何破题[J]. *水利发展研究*, 2020, 20(10): 15–19. [Chen M S, Chen J M. How to solve the problem of taking water resources as the biggest rigid constraint[J]. *Water Resources Development Research*, 2020, 20(10): 15–19.]



# Strategic behavior of heterogeneous coal-based enterprises under dual regulations

CHEN Yalin<sup>1</sup>, LIU Jiaojiao<sup>1</sup>, WANG Xianjia<sup>2</sup>, YU Rong<sup>1,3</sup>

(1. School of Management Science, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China; 2. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Under the institutional framework of administrative regulation and water rights transaction, analyzing the different strategic behaviors of high-water consuming, coal-based enterprises is the basis for improving the efficiency of water resource governance. This article describes the interaction of the behaviors of endogenous coal-based enterprises by using the replication dynamic equation, which establishes an asymmetric evolutionary game model, and examines the change of behavior of enterprises. The theoretical analysis presents that there are three local asymptotically stable points in the behavioral change, which shows the following characteristics: when the punishment degree shifts from weak to strong, the behaviors of coal-based enterprises evolve from non-cooperation to cooperation; when punishment is between the extra income of coal-based enterprises from two different groups, different strategic behaviors occur. The calculation experiments and scenario simulation were designed based on different scenarios classified by the degree of punishment, which reveal that the change of expected utilities' difference drives the differentiation of behavior; the degree of punishment drives the heterogeneous coal-based producers' behavior to converge to different evolutionary stable strategy (*ESS*). If the initial probabilities of non-cooperation are beyond (0.50, 0.50), water rights transaction affects behavioral convergence rate and lacks effect on the trend of change. The results have some implications for water resources regulation in coal-rich areas: given the heterogeneities among coal-based producers, optimizing the punishment regulation is required, which contributes to a reasonable market concentration; within certain punishment range, regulation efficiency can be improved by adjusting the initial probability of non-cooperation and the cost caused by water rights transaction.

**Key words:** water resource regulation; coal-based enterprises; asymmetric evolutionary game; replication dynamic equation; computational experiment; simulation