

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2022.09.004

配额分配对跨期碳市场有效性的影响研究^①

朱帮助^{1,2}, 黄丽清², 江民星³, 叶顺心²

(1. 广西大学工商管理学院, 南宁 530004; 2. 暨南大学管理学院, 广州 510632;
3. 南京信息工程大学商学院, 南京 210044)

摘要: 构建了考虑市场势力的两期碳市场模型, 揭示了市场势力仅存在碳市场和同时存在碳市场和产品市场两种情形下, 无存贷机制和存贷机制的配额初始分配和跨期贴现对碳价变动及跨期市场有效性的影响。结果表明, 两种市场势力情形下跨期碳市场碳价随边缘企业初始碳配额分配量增加而减小。相比碳配额跨期 1:1 贴现, 跨期碳配额贴现率调整下市场势力会压低碳价。仅碳市场存在市场势力时, 跨期碳市场有效性条件为各期各企业贴现边际碳要素收益相等。双市场均存在市场势力时, 实现跨期碳市场有效性需同时满足各期各企业贴现边际碳要素收益与碳要素收益效应之差相等。在此基础上, 提出了降低市场势力损害跨期碳市场资源有效配置的若干建议, 促使本研究具有重要的理论与实践价值。

关键词: 碳市场; 市场势力; 配额分配; 存储与借贷; 跨期有效性

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2022)09-0052-14

0 引言

全球气候变暖是制约人类可持续发展的重大挑战之一。为了以尽可能低的减排成本应对气候变化, 欧盟、中国、加拿大等纷纷实施碳市场机制。碳减排约束影响资本累积、经济增长及其效率^[1-5]。为了促进跨期碳市场稳定性和有效性^[6,7], 中国碳市场和欧盟碳排放交易体系(Eu-ropean Union Emissions Trading System, EU ETS)实施碳配额跨期存储机制。作为政策性市场, 碳配额分配影响碳市场配额供需平衡、碳价变动和企业边际减排成本, 是决定碳市场运行有效性和企业减排积极性的关键要素。然而, 当碳市场存在市场势力时, 市场势力企业可以通过操纵价格影响碳配额供给与需求, 扭曲碳价并引起更高的减排成本, 最终导致碳市场效率损失^[8,9]。因此, 深入探讨不完全竞争市场下跨期碳配额分配对碳价变

动和碳市场有效性的影响具有重要的学术价值和现实意义。

引起碳价变动的因素十分复杂。从需求角度, 能源价格、股票价格、气温、经济周期等^[10-13]均可引起碳配额需求变动, 进而导致碳价演变。Chevallier 等^[13]运用条件藤关联方法模拟了石油价格、天然气价格、电力价格等与碳价变动的关系, 研究发现碳价与天然气价格呈负相关关系。从供给角度, 碳配额供给主要来源于政府分配, 与减排政策和减排目标密切相关。碳市场管制政策不确定性和碳配额总量调整等均影响碳价变动^[14-16]。因此, 有必要从碳市场配额供需角度深入剖析市场势力和配额分配引起跨期碳市场价格变动的内在机理, 促使碳市场形成有效的价格信号。

完全竞争市场下, 跨期机制如何影响配额交易市场有效性和企业污染排放引起了学界关注^[10,17]。跨期存贷机制允许企业在排放上限内或

① 收稿日期: 2020-09-16; 修订日期: 2021-08-25。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71771105; 71974077; 72074120)。

作者简介: 朱帮助(1979—), 男, 江苏宿迁人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: wpzbz@126.com

早或晚减排,以实现在整个合规期内降低总体减排成本. Jiang 等^[18]考察了技术进步和环境负外部性影响下跨期碳市场实现企业排放遵循碳市场均衡的最优路径. 然而,跨期存储机制可能导致企业减少前期清洁技术投资,并采取次优的减排策略^[19]. 针对跨期存贷机制, Yates 和 Cronshaw^[20]探讨了跨期污染排放许可证贴现率问题,研究发现最优的配额贴现率不一定等于货币贴现率. Kling 和 Rubin^[21]研究发现存贷机制下市场不一定实现最优排放效率,引入配额贴现率动态调整的存储机制能促使企业排放行为满足社会均衡排放路径. 由此可见,配额跨期贴现率调整对市场有效性和减排成本有重要影响.

不完全竞争条件下市场势力如何操纵碳价变动和配额市场有效性条件也得到了学界关注. 针对单期碳市场, Hintermann^[22]研究发现产品市场和碳市场(简称:双市场)均具有市场势力时,市场势力企业会扭曲碳价并使其高于边际减排成本. Tanaka 和 Chen^[23]考察了无存贷机制下双市场同时存在市场势力时,市场势力企业如何通过边缘企业碳配额初始分配量操纵碳价. 针对跨期碳市场, Chen 和 Tanaka^[24]研究发现跨期存储机制下双市场均具有市场势力时,市场势力企业会根据自身买卖碳配额的需求在不同时期压低或抬高碳价. 此外,对于配额市场有效性条件, Liski 和 Montero^[8]讨论了不考虑产品市场情形时,存在市场势力的市场有效性条件. Tanaka^[25]分析了同时考虑双市场均具有市场势力的单期市场有效性条件. Wang 和 Zhou^[26]研究指出市场势力导致的效率损失取决于配额分配. 碳配额分配遵循祖父法或基准法时,如果分配给主导企业的初始碳配额与其二氧化碳排放量越接近,碳市场将越有效. 若碳市场采取拍卖机制,则主导企业倾向于压低配额价格,最终导致效率损失. 碳市场存在市场势力(例如,电力企业和水泥企业^[27]),市场势力直接影响碳市场卖方或买方的市场决策,并创造出非对称的碳配额需求. 因此,有必要探讨有效的碳配额调控机制,以实现减排信息不对称下资源的最优配置.

纵观该领域的研究,现有的文献存在以下局限. 首先, Tanaka 和 Chen^[23]考察了双市场同时存

在市场势力时,单期碳市场配额分配与碳价间的关系,但是没有涉及跨期碳市场分析. 其次, Kling 和 Rubin^[21]探讨了完全竞争条件下跨期配额贴现对污染排放的影响,但缺乏探讨不完全竞争市场下跨期配额贴现与配额价格间的关系. 第三, Tanaka^[25]讨论了存在双市场势力时单期市场配额分配的有效性准则,虽然朱帮助等^[28]分析了跨期碳市场配额分配的有效性条件,但是缺乏考察产品市场和碳市场同时存在市场势力的情形. 因此,构建同时考虑产品市场和碳市场的两期碳市场模型,揭示市场势力仅存在碳市场(market power in carbon market, MPCM) 和同时存在两个市场(market power in both markets, MPBM) 时,存贷机制和无存贷机制下配额分配与市场势力操纵碳价的变动关系,推导出 MPCM 和 MPBM 情形跨期碳市场有效性条件,并分析企业碳生产率和跨期碳配额贴现率调整与碳排放总量的关系. 在此基础上,提出了促进跨期碳市场资源有效配置的若干建议. 研究发现将进一步丰富碳市场有效性理论,为我国碳市场未来制度性选择提供参考依据.

1 模型构建

假设碳市场和产品市场存在企业 $j, j = M, F$, 企业 M 具有市场势力,企业 F 为边缘企业,两类企业生产同质性产品. 为了实现低成本减排,市场规制者在计划期 i 内实施碳交易政策,计划期分为两期,则 $i = 1, 2$. 企业 j 第 i 期产品产量 q_{ij} 与碳排放量 E_{ij} 相关^[29], γ_j 为企业 j 单位碳生产率 $\gamma_j = q_{ij}/E_{ij}$. i 期产品总产量 $Q_i = \sum q_{ij}$. P_i 为 i 期产品价格. S_i 为 i 期碳价. 边缘企业 F 为碳市场和产品市场价格接受者. 若企业 M 在碳市场具有市场势力,则可操纵碳价. 若企业 M 在产品市场具有市场势力,则可操纵产品价格. 当企业 j 均为产品价格接受者,则各期产品价格外生且按市场无风险利率增长,即 $P_1 = \delta P_2 = P$; 若产品价格由企业定价,则产品价格 $P_i = P(Q_i)$ 为 i 期产品反需求函数, $P(Q_i) = A - \beta Q_i$, $A > 0$ 为外生参数.

企业生产经营过程中产生碳排放. 无碳排放规制下 i 期企业 j 碳排放量为 s_{ij} , 即基准情形

(business-as-usual, BAU) 的碳排放量. 规制者根据 i 期企业 j BAU 情形的碳排放量分配初始碳配额 L_{ij} , 且 $s_{ij} > L_{ij}$. 初始碳配额分配不足时, 企业可以通过碳交易购买碳配额, 提升清洁技术、调整能源结构等方式实现碳减排, 产生的碳减排成本记为 $C(E_{ij})$, 如式(1)^[30], 其中 c 为企业单位碳减排成本系数. 参考现有研究文献 [19, 20, 23, 24], 假设减排成本函数是政府和企业的共同知识, 不考虑单位产品的材料、人力和资本等生产成本, 且不考虑企业间由于生产规模引起的产品生产成本差异

$$C(E_{ij}) = \begin{cases} \frac{1}{2}c(s_{ij}-E_{ij})^2 & \text{若 } 0 < E_{ij} < s_{ij} \\ 0 & \text{若 } E_{ij} \geq s_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

存贷机制下企业可跨期存储或借贷碳配额, 计划期期初企业 j 碳配额存贷量 B_0^j 为 0. i 期企业 j 碳配额存贷量为 B_i^j , $B_i^j > 0$ 表示企业跨期存储碳配额, $B_i^j < 0$ 表示企业跨期借贷碳配额. α 为碳配额跨期贴现率 (intertemporal permit discount rate, IPDR), 即: 当企业第一期存储 α 单位碳配额, 则第二期流转获得 1 单位碳配额; 当企业第一期跨期借贷 1 单位碳配额, 则获得 α 单位碳配额. 当 $\alpha = 1$ 时, 碳配额跨期 1:1 贴现. 参考 Kling 和 Rubin^[21] 以及 Yates 和 Cronshaw^[20], IPDR 调整定义为若企业跨期借贷碳配额, 则下一期企业需要偿还比上一期配额借贷量更多的碳配额; 若企业跨期存储碳配额, 则下一期企业获得比上一期配额存储量更多的碳配额, 则 $0 < \alpha < 1$. i 期企业碳配额存贷量如式(2)和式(3), 其中 X_i 为 i 期企业碳配额交易量

$$B_i^F = B_{i-1}^F + \alpha^{i-1}(L_{iF} - X_i - E_{iF}) \quad (2)$$

$$B_i^M = B_{i-1}^M + \alpha^{i-1}(L_{iM} + X_i - E_{iM}) \quad (3)$$

计划期期末碳市场出清, 企业理性策略是期末不留存任何碳配额. 假设第二期期末企业用完持有的配额, 即 $B_2^j = 0$. 令 L_j^i 为计划期内企业 j 碳配额分配贴现总量, 则 $L_j^i = L_{ij} + \alpha L_{2j}$. 令 X_B 为计划期内碳配额交易贴现总量, 则 $X_B = X_1 + \alpha X_2$. 计划期内碳市场出清条件如式(4)和式(5). 由式(4)和式(5)可得, 计划期内企业累计碳排放贴现总量等于规制者碳配额分配贴现总量如式(6)

$$E_{1F} + \alpha E_{2F} = L_{1F} - X_B + \alpha L_{2F} \quad (4)$$

$$E_{1M} + \alpha E_{2M} = L_{1M} + X_B + \alpha L_{2M} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^2 \alpha^{i-1}(E_{iF} + E_{iM}) = L_F + L_M \quad (6)$$

跨期碳市场社会均衡是指计划期内碳配额总量和跨期碳配额贴现约束下, 企业选择各期最优碳排放量以实现计划期内总社会福利最大化. 若企业均为产品价格 P_i 接受者, 则跨期碳市场社会福利 W_R^1 最大化目标函数为^[19, 20, 23, 24]

$$\begin{aligned} \text{Max}_{E_{iM}, E_{iF}} W_R^1 &= \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P_i Q_i - C(E_{iF}) - C(E_{iM})) \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^2 \alpha^{i-1} (E_{iF} + E_{iM}) &= L_F + L_M \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可得最优均衡解满足如下最优化一阶条件

$$\alpha(P_1 \gamma_j + c(s_{ij} - E_{ij})) = \delta(P_2 \gamma_j + c(s_{2j} - E_{2j})) \quad (8)$$

$$P_i \gamma_F + c(s_{iF} - E_{iF}) = P_i \gamma_M + c(s_{iM} - E_{iM}) \quad (9)$$

式(8)和式(9)表明跨期碳市场实现计划期内社会福利最大化与 α 相关. $P_i \gamma_j$ 表示边际产品价值, $c(s_{ij} - E_{ij})$ 为边际减排成本, $P_i \gamma_j + c(s_{ij} - E_{ij})$ 定义为边际碳要素收益. 式(8)表明同一企业第一期碳配额贴现的边际碳要素收益等于第二期利率贴现的边际碳要素收益. 式(9)表明不同企业同一期边际碳要素收益相等. 因此, MPCM 情形下跨期碳市场实现社会均衡需同时满足式(8)和式(9).

假设产品价格由企业定价则产品价格记为 $P_i = P(Q_i)$, 跨期碳市场社会福利 W_R^2 最大化目标函数为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{E_{iM}, E_{iF}} W_R^2 &= \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P(Q_i) q_{iF} + P(Q_i) q_{iM} - \\ &\quad C(E_{iF}) - C(E_{iM})) \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^2 \alpha^{i-1} (E_{iF} + E_{iM}) &= L_F + L_M \end{aligned} \quad (10)$$

同理, 由最优化一阶条件得最优解满足下列条件

$$\begin{aligned} \alpha(P(Q_1) \gamma_M - \beta \gamma_M (q_{1M} + q_{1F}) + c(s_{1M} - E_{1M})) &= \\ \delta(P(Q_2) \gamma_M - \beta \gamma_M (q_{2M} + q_{2F}) + c(s_{2M} - E_{2M})) & \\ \alpha(P(Q_1) \gamma_F - \beta \gamma_F (q_{1M} + q_{1F}) + c(s_{1F} - E_{1F})) &= \\ \delta(P(Q_2) \gamma_F - \beta \gamma_F (q_{2M} + q_{2F}) + c(s_{2F} - E_{2F})) & \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 P(Q_i) \gamma_M - \beta \gamma_M (q_{iM} + q_{iF}) + c(s_{iM} - E_{iM}) &= \\
 P(Q_i) \gamma_F - \beta \gamma_F (q_{iM} + q_{iF}) + c(s_{iF} - E_{iF}) & \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中 $P(Q_i) \gamma_j$ 表示边际产品价值, $\beta \gamma_j (q_{iM} + q_{iF})$ 定义为企业碳要素收益效应, $P(Q_i) \gamma_j + c(s_{ij} - E_{ij})$ 定义为边际碳要素收益. 式(11)表明同一企业第一期碳配额贴现的边际碳要素收益与碳要素收益效应之差, 等于第二期利率贴现的边际碳要素收益与碳要素收益效应之差. 式(12)表明不同企业同一期边际碳要素收益与碳要素收益效应之差相等. 相比单一碳市场存在市场势力的跨期碳市场社会均衡条件, 两市场均存在市场势力的与之不等价. 因此, 企业产品定价影响跨期碳市场社会均衡条件. MPBM 情形下跨期碳市场实现社会均衡与碳要素收益效应相关, 且需同时满足式(11)和式(12).

2 市场势力下企业分散均衡与碳价变动

企业分散均衡指碳排放规制下企业选择最优碳排放量和碳配额交易量, 以实现自身利润最大化. 本小节将探讨存在市场势力时, 无存贷机制和存贷机制下企业如何根据初始碳配额分配实现分散均衡, 以及市场势力如何影响碳价变动. MPCM 和 MPBM 情形下, 市场势力影响碳价变动是否存在差异.

2.1 无存贷机制

无存贷机制下, 企业不允许跨期存贷碳配额且各期期末碳市场出清. 因此, 理性企业将用完各期持有的碳配额. 无存贷机制企业 j 市场出清条件为

$$E_{iF} = L_{iF} - X_i \quad (13)$$

$$E_{iM} = L_{iM} + X_i \quad (14)$$

边缘企业 F 为各期产品价格 P_i 和碳价 S_i 的接受者. i 期碳排放约束下企业选择最优碳排放量和碳配额交易量, 以实现无存贷机制下 i 期利润 Π_{iF}^1 最大化

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^2 \text{Max}_{E_{iF}, X_i} \Pi_{iF}^1 &= \delta^{i-1} (P_i q_{iF} - C(E_{iF}) + S_i X_i) \\
 \text{s. t. } E_{iF} &= L_{iF} - X_i \quad (15)
 \end{aligned}$$

由最优化一阶条件可得

$$S_i = P_i \gamma_F + c(s_{iF} - E_{iF}) \quad (16)$$

由式(16)可知, 无存贷机制下企业 F 根据各期碳排放约束调整各期碳排放量, 使得各期边际碳要素收益等于碳价. 当产品价格外生时, 联立式(13)和式(16)得 MPCM 情形的均衡碳配额交易量

$$X_i^* = \frac{(S_i - P_i \gamma_F)}{c} - s_{iF} + L_{iF} \quad (17)$$

若配额市场和产品市场均具有市场势力, 联立 $P(Q_i)$ 和式(16)可得边缘企业 i 期均衡碳排放量

$$E_{iF}^{**} = \frac{1}{c + \beta \gamma_F^2} (\gamma_F A - \beta \gamma_F \gamma_M E_{iM} + c s_{iF} - S_i) \quad (18)$$

类似地, 由式(13)和式(18)可得 MPBM 情形各期企业的均衡碳配额交易量

$$X_i^{**} = L_{iF} - \frac{1}{c + \beta \gamma_F^2} (\gamma_F A - \beta \gamma_F \gamma_M E_{iM} + c s_{iF} - S_i) \quad (19)$$

式(17)和式(19)表明无存贷机制下, 若各期企业 F 为配额净卖者, 则 X_i^* 和 X_i^{**} 均为正, 企业 F 碳配额出售量随初始碳配额分配量增加而递增, 随碳价增加而递增. 可能的原因是当碳配额分配量增加, 则企业碳配额充足. 由于无存贷机制下期末碳配额清零, 企业倾向于售出剩余碳配额. 若碳价越高, 则企业出售碳配额获得的收益越高, 企业售出配额越多. 若企业 F 为配额净买者, 则 X_i^* 和 X_i^{**} 均为负, 其碳配额购买量随初始碳配额分配量增加而递减, 随碳价增加而递减. 这是由于若碳配额供给充足, 则企业购买碳配额的需求降低; 相反若碳价较高, 则企业购买配额的成本增加, 则配额购买量减少. MPBM 情形下, 企业 F 碳配额出售量随企业 M 碳排放量增加而递增, 其碳配额购买量随企业 M 碳排放量增加而递减. 可能的原因是若市场势力企业碳排放量增加, 则企业 M 碳配额需求增加. 为了降低碳减排成本, 企业 M 可通过操纵产品价格影响边缘企业产品产量, 进而影响边缘企业碳配额需求.

基于边缘企业的均衡解, 通过逆向归纳法求解企业 M 的最优分散均衡问题. 企业 M 在 i 期碳排放约束下选择各期最优碳排放量和碳价, 以实现该期利润 Π_{iM}^1 最大化

$$\sum_{i=1}^2 \text{Max}_{E_{iM}, S_i} \Pi_{iM}^1 = \delta^{i-1} (P_i q_{iM} - C(E_{iM}) - S_i X_i) \quad (20)$$

s. t. $E_{iM} = L_{iM} + X_i$

若市场势力仅存在碳市场,由最优化一阶条件可得

$$S_i + cX_i^* = P_i \gamma_M + c(s_{iM} - E_{iM}) \quad (21)$$

由式(21)可知,若仅碳市场存在市场势力,则 $X_i^* = 0$ 时市场势力企业边际碳要素收益等于该期碳价.对比式(16)可知,市场势力企业边际碳要素收益与边缘企业的相等,则无存贷机制下各期企业间碳配额分配有效.这意味着当市场势力企业碳配额交易量为零时,该期碳市场资源配置实现跨主体分配有效.

类似地,若企业 M 能通过市场势力操纵产品价格,企业 M 利润最大化目标函数为

$$\sum_{i=1}^2 \text{Max}_{E_{iM}, S_i} \Pi_{iM}^1 = \delta^{i-1} (P(Q_i) q_{iM} - C(E_{iM}) - S_i X_i) \quad (22)$$

s. t. $E_{iM} = L_{iM} + X_i$

因此,根据式(18)和式(22)可得企业 M 最优解满足

$$S_i + G_1 = \gamma_M P(Q_i) + \gamma_M E_{iM} \left(\frac{\gamma_M \gamma_i^2 \beta^2}{c + \beta \gamma_F^2} - \beta \gamma_M \right) + c(s_{iM} - E_{iM}) \quad (23)$$

$$\text{其中 } G_1 = \left(1 - \frac{\beta \gamma_M \gamma_F}{c + \beta \gamma_F^2} \right) (c + \beta \gamma_F^2) X_i^{**} - \beta \gamma_M \gamma_F E_{iM}.$$

由式(22)和式(23)可知,企业 M 仅在碳市场具有市场势力和在两个市场均具有市场势力的最优均衡解不相等.这表明无存贷机制且同一碳排放约束下,产品市场势力影响企业最优分散均衡.相比式(11)和式(12)可知,MPBM情形下若企业碳配额交易量为零时,各期企业间边际碳要素收益与碳要素收益效应之差相等,即不能使各期企业间碳配额分配有效.

2.2 存贷机制

存贷机制下,企业可跨期存贷碳配额.碳减排约束下企业 F 通过调整各期碳排放量和碳配额交易量,以实现计划期内利润 Π_F^2 最大化

$$\text{Max}_{E_{iF}, X_i} \Pi_F^2 = \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P_i q_{iF} - C(E_{iF}) + S_i X_i) \quad (24)$$

s. t. $E_{1F} + \alpha E_{2F} = L_{1F} - X_B + \alpha L_{2F}$

由最优化一阶条件可得

$$\alpha S_1 = \delta S_2 = S' \quad (25)$$

$$S' = \alpha^{2-i} \delta^{i-1} (P_i \gamma_F + c(s_{iF} - E_{iF}))$$

由式(25)可知,计划期内碳价 S' 与跨期碳配额贴现率有关.边缘企业根据计划期内跨期碳配额贴现率、产品价格和碳价调整各期碳排放量,使得贴现边际碳要素收益等于碳价 S' .

联立式(4)和式(25)可得 MPCM 情形计划期内均衡碳配额交易贴现总量 X_B^*

$$X_B^* = L_F - \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\alpha^{i-1}}{\delta^{i-1} c} (P_i \gamma_F + \delta^{i-1} c s_{iF} - \frac{S'}{\alpha^{2-i}}) \right) \quad (26)$$

若企业 M 在碳市场和产品市场均具有市场势力,则市场势力能操纵产品价格.联立 $P(Q_i)$ 和式(25)可得两市场均存在市场势力时,企业 F 均衡碳排放量为

$$E_{iF}^{***} = \frac{\psi}{c + \beta \gamma_F^2} \quad (27)$$

其中 $\psi = \gamma_F A - \gamma_F \gamma_M \beta E_{iM} + c s_{iF} - \delta^{1-i} \alpha^{i-2} S'$.

联立式(4)和式(27)可得 MPBM 情形计划期内均衡碳配额交易贴现总量为

$$X_B^{**} = L_F - \sum_{i=1}^2 \alpha^{i-1} \left(\frac{\psi}{c + \beta \gamma_F^2} \right) \quad (28)$$

式(26)和式(28)表明计划期内若企业 F 为碳配额净卖者,则 X_B^* 和 X_B^{**} 均为正,其碳配额出售量随初始碳配额分配量 L_{iF} 增加而递增,随碳价增加而递增.若企业 F 为配额净买者,则 X_B^* 和 X_B^{**} 均为负,其碳配额购买量随初始碳配额分配量 L_{iF} 增加而递减,随 S' 增加而递减.这意味着虽然存贷机制允许企业或早或晚减排,但是碳配额初始分配和碳价水平仍是影响企业减排决策的重要因素.若企业初始碳配额分配充足且碳价较高时,企业倾向于通过碳交易出售剩余配额以获得收益.值得注意的是,当企业 M 在产品市场具有市场势力时,企业 F 碳配额出售量随企业 M 碳排放量增加而增加,反之其碳配额购买量随企业 M 碳排放量增加而递减.相比无存贷机制,结果表明存贷机制下市场势力企业碳排放决策仍影响边缘企业碳配额交易决策.

同理,企业 M 的最优化目标为通过调整各期碳排放量和选择最优碳价,在碳排放约束下实现计划期内利润 Π_M^2 最大化,目标函数如式(29)

$$\text{Max}_{E_{iM}, S_i} \Pi_M^2 = \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P_i q_{iM} - C(E_{iM}) - S_i X_i) \quad (29)$$

s. t. $E_{1M} + \alpha E_{2M} = L_{1M} + X_B + \alpha L_{2M}$

根据计划期内均衡碳价的约束条件,式(29)等

价于

$$\begin{aligned} \text{Max}_{E_{iM}, S'} \Pi_M^2 &= \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P_i q_{iM} - C(E_{iM})) - \frac{S'}{\alpha} X_B \\ \text{s. t. } E_{1M} + \alpha E_{2M} &= L_{1M} + X_B + \alpha L_{2M} \end{aligned} \quad (30)$$

当产品价格外生时,由最优化一阶条件可得企业 M 最优解满足

$$\frac{\alpha \delta c}{\delta + \alpha^2} X_B^* + S' = \alpha^{2-i} (P_i \gamma_M + \delta^{i-1} c(s_{iM} - E_{iM})) \quad (31)$$

根据式(10)、式(25)和式(31)可知,当且仅当 $X_B^* = 0$ 时,等号右边项等于 S' ,从而实现不同企业同一期边际碳要素收益相等.这意味着,市场势力企业计划期内碳配额交易总量为零时,MPCM 情形下企业分散均衡实现跨期碳市场最优.

类似地,若企业 M 能通过市场势力操纵产品价格,企业 M 利润最大化目标函数为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{E_{iM}, S'} \Pi_M^2 &= \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (P(Q_i) q_{iM} - C(E_{iM})) - \frac{S'}{\alpha} X_B \\ \text{s. t. } E_{1M} + \alpha E_{2M} &= L_{1M} + X_B + \alpha L_{2M} \end{aligned} \quad (32)$$

由式(27)、式(28)和式(32)可知当企业 M 在两个市场均具有市场势力时,其最优解满足

$$\begin{aligned} S' + G_2 &= (\alpha^{2-i} \delta^{i-1}) \left(\gamma_M P(Q_i) + \right. \\ &\left. c(s_{iM} - E_{iM}) + \gamma_M E_{iM} \left(\frac{\gamma_M \gamma_F^2 \beta^2}{c + \beta \gamma_F^2} - \beta \gamma_M \right) \right) \end{aligned} \quad (33)$$

其中

$$\begin{aligned} G_2 &= \frac{\alpha \delta (c + \beta \gamma_F^2)}{\delta + \alpha^2} G_3 \left(X_B^{**} - \sum_{i=1}^2 \left(\alpha^{i-2} \frac{\alpha \beta E_{iM} \gamma_M \gamma_F}{c + \gamma_F^2 \beta} \right) \right), \\ G_3 &= \left(1 - \frac{\beta \gamma_M \gamma_F}{c + \beta \gamma_F^2} \right). \end{aligned}$$

然而,由式(12)、式(25)和式(33)可知, $X_B^{**} = 0$ 时,MPBM 情形下未能实现不同企业同一期边际碳要素收益与碳要素收益效应之差相等.因此,当企业 M 计划期内碳交易总量为零时,企业分散均衡未能实现跨期碳市场有效.结果表明,第一,跨期碳配额贴现率影响企业分散均衡实现跨期碳市场有效性.第二,对比 MPCM 和 MPBM 情形,企业实现跨期碳市场有效性条件存在差异.存贷机制下企业初始碳配额分配实现跨期碳市场社会最优的条件将在命题3中论述.

根据上述结果可进一步分析不同碳交易机制下市场势力对碳价变动的影响.命题证明过程均见附录.

命题1 考虑市场势力且各期碳配额分配总量不变时,市场势力仅存在碳市场或同时存在两个市场下,无存贷机制和存贷机制的碳价与各期边缘企业碳配额初始分配量呈反比例关系.

命题1描述了无存贷机制和存贷机制下,市场势力如何根据边缘企业初始碳配额分配量操纵碳价.无存贷机制下,无论产品市场是否存在市场势力,碳价均随边缘企业初始碳配额分配量增加而递减,研究结论与 Tanaka 和 Chen^[23]的一致.可能的原因是无存贷机制下,第一期和第二期碳市场完全分割,市场势力企业无法通过跨期借贷实现配额需求.因此,边缘企业初始碳配额分配越多,企业 M 将通过市场势力压低碳价以调整减排成本.存贷机制下随 L_{iF} 增加碳价递减.这是因为存贷机制虽然实现了计划期内企业碳减排灵活性,但是边缘企业初始碳配额分配量递增意味着企业 M 碳配额分配量递减,则企业 M 碳配额需求递增.若仅碳市场存在市场势力,为了降低生产成本,企业 M 可通过市场势力压低碳价.若产品市场和碳市场均具有势力,企业 M 可通过操纵产品价格影响边缘企业产品产量,进而降低企业 F 碳配额需求,从而压低碳价.

命题2 跨期碳配额贴现率调整下,存在市场势力压低碳价.

(I) 若市场势力仅存在碳市场且 $\delta > \alpha^2$ 时,碳价随跨期碳配额贴现率减小而减小.

(II) 若产品市场和碳市场均存在市场势力且企业碳生产率相同,则当 $\delta > \alpha^2$ 且 $A > \beta \gamma (L_{2F} + L_{2M})$ 时,碳价随跨期碳配额贴现率减小而减小.

命题2表明存在市场势力时,存在碳价随跨期碳配额贴现率递减而递减的情形.这是由于存贷机制下,碳价高低与市场碳配额流通总量密切相关.碳配额贴现率调整实现两期企业生产减排灵活性的同时影响计划期内碳市场配额的供给和需求.然而,存贷机制下碳配额贴现率调整提高了企业碳超额排放和碳价过低的风险:第一,碳配额

贴现率调整为企业减少第一期生产而流转更多碳配额至第二期提供动机。相比跨期碳配额 1:1 兑换,若企业跨期存储配额且 $0 < \alpha < 1$,则碳配额 1: α 兑换使得企业第二期获得更多碳配额,可能造成市场碳排放总量超额,从而导致市场碳减排约束无效。同时,碳配额供给越充足,企业碳配额需求下降,碳价越低。第二,IPDR 调整虽然加剧了第一期碳配额超额排放惩罚,但是存在市场势力时,市场势力企业可根据自身生产决策和配额需求量操纵碳价,扭曲碳价信号,从而压低碳价。第三,IPDR 调整可能造成两期市场经济效率不能达到最优。若企业第一期集中生产,企业可能大规模缩减生产,以避免第二期碳超额排放惩罚。若企业为了第二期获得更多碳配额,而减少第一期产量并第二期加大产量,这将造成两期市场经济未能可持续发展。因此,存贷机制下是否实施 IPDR 调整,应充分考虑碳市场和产品市场的市场势力情况以及碳配额存量,以提高碳减排约束力度,避免碳市场无效。

3 跨期碳市场有效性

碳减排规制下,市场势力企业为实现自身利润最大化而扭曲碳价,会严重导致企业分散均衡不能实现碳市场社会均衡路径。本节将讨论 MPCM 和 MPBM 情形的跨期碳市场碳配额分配有效性条件。

令 s_j 为计划期内企业 j BAU 情形的碳排放贴现总量,则 $s_j = s_{1j} + \alpha s_{2j}$ 。由式(26)和式(31)可得 MPCM 情形的均衡碳配额交易量

$$X_B^* = \frac{1}{3} \left(s_M^* + \frac{\alpha + \delta}{\delta c} (P\gamma_M - P\gamma_F) + L_F^* - s_F^* - L_M^* \right) \quad (34)$$

同理,由式(28)和式(33)可得 MPBM 情形的均衡碳配额交易量

$$X_B^{**} = \frac{1}{H_1} [cH_2 + H_3(- (1 + \alpha) A + \beta(\gamma_F L_F^* + 2\gamma_M L_M^*))] \quad (35)$$

其中 $H_1 = 3c + 2\beta(\gamma_F - \gamma_M)^2$, $H_2 = L_F^* - L_M^* - s_F^* + s_M^*$, $H_3 = \gamma_F - \gamma_M$ 。由计划期内均衡碳配额交易量可推导出命题 3。

命题 3 假设存在市场势力企业和边缘企业,市场势力企业可操纵碳价。

(I) 若企业均为产品价格接受者,则企业初始碳配额分配满足 $s_M^* + \frac{\alpha + \delta}{\delta c} P(\gamma_M - \gamma_F) + L_F^* = s_F^* + L_M^*$ 时,企业分散均衡可实现跨期碳市场有效性。

(II) 若产品市场和配额市场均存在市场势力且两企业碳生产率相等时,则企业初始碳配额分配满足 $(\alpha^2)^{i-1} \delta^{2-i} U_1 + c\beta\delta\gamma^2 s_M^* + (-1)^{2-i} U_2 = 2^{2-i} - (U_3)^{i-1} - 1$,则企业分散均衡可实现跨期碳市场有效性。

其中

$$\begin{aligned} U_1 &= c^2(L_F^* - L_M^* - s_F^* + s_M^*) + 3\beta^2\gamma^4(L_F^* - L_M^*) + 4c\beta\gamma^2(L_F^* - L_M^* - s_F^*); \\ U_2 &= 3\beta\gamma^3\alpha(\delta - \alpha)A + 3\beta^2\gamma^4(\alpha^2 + \delta) \times (s_{1F} - s_{1M}) - 3c\beta\gamma^2(\alpha^2 + \delta)s_{1M}; \\ U_3 &= 2c\beta\gamma^2 s_M^*(\delta + 2\alpha^2) + 3\beta^2\gamma^4(\alpha^2 + \delta) \times (s_M^* - s_F^*); \end{aligned}$$

命题 3 阐述了存在市场势力时,计划期内企业分散均衡实现跨期碳市场有效性条件。Liski 和 Montero^[8] 研究指出若不考虑产品市场,实现跨期碳市场有效性需满足各企业边际减排成本相等。然而,命题 3 表明忽略产品市场而仅考虑企业边际减排成本将导致碳配额初始分配扭曲。此外,对比命题 3(I) 和命题 3(II) 发现:若 $\gamma_F = \gamma_M = \gamma$ 时,MPCM 和 MPBM 情形的企业分散均衡实现跨期碳市场有效性条件不等价。结果表明,产品市场是否存在市场势力影响碳配额分配的跨期碳市场有效性条件。相比 MPCM 情形,MPBM 情形实现跨期碳市场社会均衡条件与碳要素收益效应相关。因此,市场规制者忽略碳配额作为生产投入要素或市场势力企业操纵产品价格,而仅考虑企业在碳市场的市场势力将导致碳配额初始分配难以

实现跨期碳市场最优资源配置.

4 数值分析

为了更清楚地描述存在市场势力时,碳配额初始分配和跨期贴现调整对碳价演变、社会福利以及碳排放总量的影响,进行数值模拟分析.假设 $c = 0.24$, $\beta = 1$ [31]. 参考 Fell 等 [32], 令 $\delta = 0.95$, 各期免费碳配额分配量在第一期基础上递减 3.4%, $s_{iF} = 5.5$ million tons (Mt), $s_{iM} = 6$ Mt 且假设企业基准碳排放量满足 $s_{iF} < s_{iM}$, $s_{1j} = s_{2j}$. 假设一单位碳配额对应一单位碳排放量且第一期企业允许排放量在 BAU 基础上减少 10% [23], 则 $L_{1M} = 5.4$ Mt, $L_{1F} = 4.95$ Mt, $L_{2M} = 5.22$ Mt, $L_{2F} = 4.78$ Mt. 此外, 参考 Tanaka 和 Chen [23], 假设 $\gamma_F = 2.481$, $\gamma_M = 2.3$. 参考 Niu 等 [31] 和 Yang 和 Chen [33] 关于产品市场规模设置范围并根据上述参数设置, 为了保持 $E_{ij} > 0$, 令 $A = 40$, $P_1 = 3.2$.

上述理论分析阐述了 MPBM 情形企业碳生产率相同时的结论. 然而相比边缘企业, 现实中市场势力企业存在不同规模报酬情形. 因此, 通过数值分析验证不同规模报酬情形的结论. 假

定相比边缘企业, 若市场势力企业规模报酬不变, 则 $\gamma_F = \gamma_M = 2.481$; 若市场势力企业规模报酬递减, 则 $\gamma_F = 2.481$, $\gamma_M = 2.3$; 若市场势力企业规模报酬递增, 则 $\gamma_F = 2.3$, $\gamma_M = 2.481$. 通过分析不同规模报酬情形, 有助于剖析控排企业碳生产率与碳配额初始分配和跨期贴现政策对减排治理的协同效果. 进而有助于市场规制者根据现阶段碳价和不同控排企业碳生产率水平, 有的放矢地制定减排技术激励和监管政策, 旨在为实现碳市场有效运行和减排目标保驾护航.

4.1 边缘企业碳配额初始分配

令 L_i 为 i 期免费碳配额分配总量, 则 $L_i = L_{iF} + L_{iM}$. 令 θ 为碳配额调整比例, 则假设将 i 期 θL_i 单位碳配额分配至边缘企业, θL_i 需满足 $L_{iF} + \theta L_i < s_{iF}$. 为了保持 $E_{ij} > 0$, 令 $\theta \in [1\%, 5\%]$, 则若调整企业第一期初始碳配额分配量, 第一期边缘企业增加 $\theta L_1 \in [0.104, 0.518]$ 单位配额. 若第一期碳配额基于 BAU 按比例分配至各企业, 调整第二期初始碳配额分配量, 则将第二期期初市场势力企业 θL_2 单位配额被分配至边缘企业.

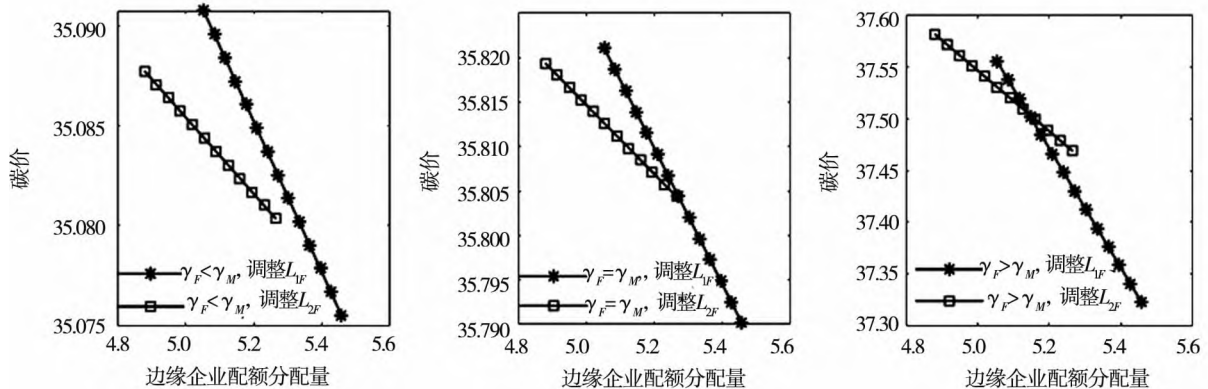


图1 不同碳生产率情形的碳价与碳配额初始分配

Fig. 1 The relationship between carbon price and permit allocation under different carbon productivity

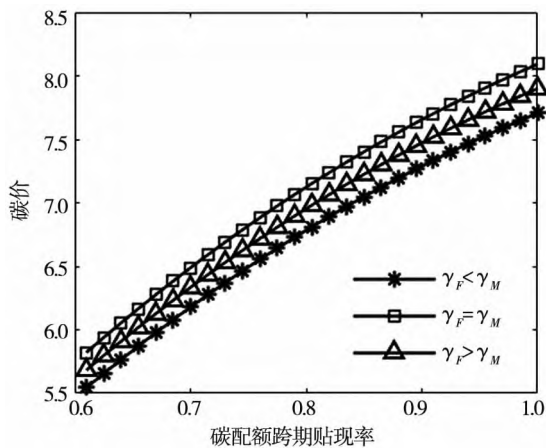
图1描述了MPBM情形且各期碳配额分配总量固定时, 各期碳配额分配调整对均衡碳价的影响. 不同碳生产率情形下, 若增加边缘企业第一期或第二期初始碳配额分配量, 碳价均随边缘企业初始碳配额分配量增加而递减, 与命题1结论相符. 相比边缘企业, 若市场势力企业规模报酬递

增或不变, 即 $\gamma_F \leq \gamma_M$, 则同一碳配额分配量下, 调整第一期边缘企业初始碳配额分配的碳价相比调整第二期的高. 相比边缘企业, 若市场势力企业规模报酬递减, 即 $\gamma_F > \gamma_M$, 则同一碳配额分配量下, 当 $L_{iF} < 5.16$ 时调整第一期边缘企业初始碳配额分配的碳价相比调整第二期的高, 反之当

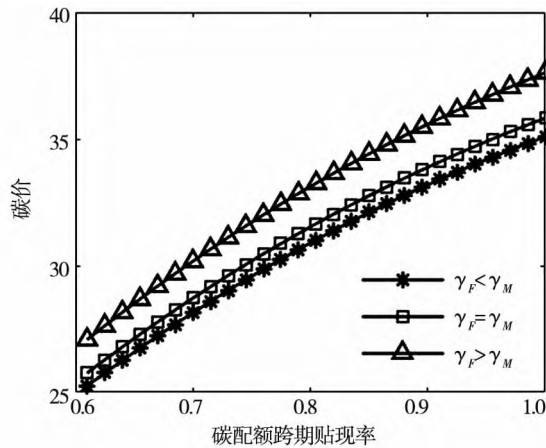
$L_{if} > 5.16$ 时调整第二期边缘企业初始碳配额分配的碳价较高. 结果表明当产品市场和碳市场均存在市场势力时, 碳配额分配量调整对碳价变动的的影响与边缘企业和市场势力企业碳生产率大小相关.

4.2 碳配额跨期贴现率调整

图2描述了MPCM和MPBM情形下, 碳价与碳配额跨期贴现率的变动关系. 相比 $\alpha = 1$ 情形, MPCM情形的碳价随碳配额跨期贴现率递减而递减, 验证了命题2(I). 同一碳配额跨期贴现率下, 两企业碳生产率相等时碳价最高, 边缘企业碳生产率较大时次之, 市场势力企业碳生产率较大时最低. MPBM情形的碳价随碳配额跨期贴现率递减而递减. 相比市场势力企业, 同一碳配额跨期贴现率下边缘企业碳生产率越高的碳价越高.



(a) 仅碳市场存在市场势力

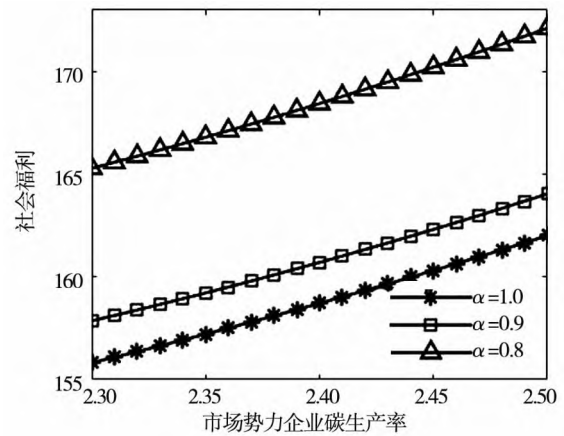


(b) 双市场均存在市场势力

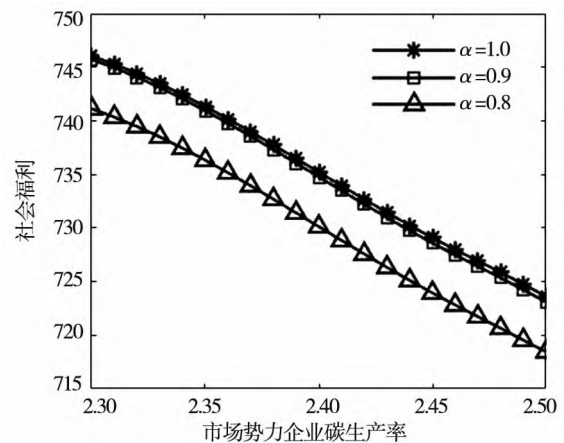
图2 不同碳生产率情形的碳价与跨期碳配额贴现

Fig.2 The relationship between carbon price and IPDR

图3展示了不同跨期碳配额贴现率情形下, 市场势力企业碳生产率与社会福利间的关系. MPCM情形下, 社会福利随市场势力企业碳生产率增加而增加. 相比 $\alpha = 1$ 情形, 同一碳生产率下 $\alpha = 0.8$ 的社会福利最高, $\alpha = 0.9$ 的次之. 然而, MPBM情形下, 社会福利随市场势力企业碳生产率增加而减少. 相比 $\alpha = 1$ 情形, $\alpha = 0.9$ 和 $\alpha = 0.8$ 的社会福利较低.



(a) 仅碳市场存在市场势力



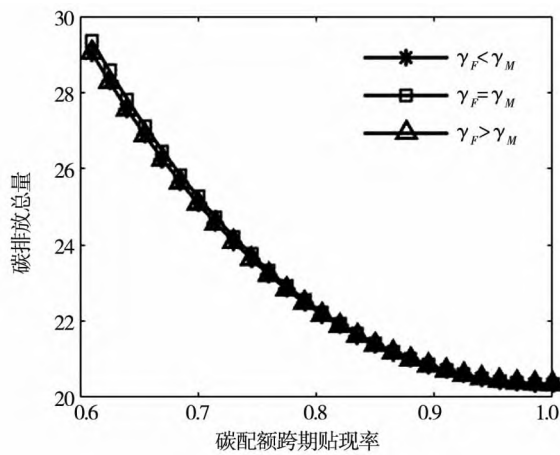
(b) 双市场均存在市场势力

图3 碳生产率与社会福利

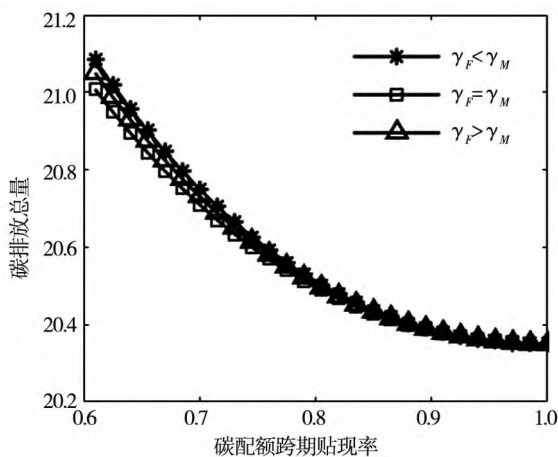
Fig.3 The relationship between carbon productivity and welfare

图4描述了IPDR调整对计划期内碳排放总量的影响. 两种市场势力情形下, 计划期内碳排放总量随跨期碳配额贴现率递减而递增, 且不同碳生产率情形下碳排放总量差距较小. MPCM情形下当 $\alpha < 0.7$ 时相比 $\gamma_F \neq \gamma_M$ 情形, $\gamma_F = \gamma_M$ 时碳排放总量较高. 然而, MPBM情形且同一跨期碳配额贴现率下, 当 $\alpha > 0.7$ 时不同碳生产率情形下

碳排放总量差距较小; 当 $\alpha < 0.7$ 时相比边缘企业碳生产率, 市场势力企业碳生产率较高的碳排放总量最高, 市场势力企业碳生产率较低的次之. 相比跨期碳配额 1:1 兑换, 碳配额 1: α 兑换且 $\alpha \neq 1$ 时计划期内碳排放总量均超过免费碳配额分配量 ($> 20.35 \text{ Mt}$). 该结论是对 Kling 和 Rubin^[23] 研究的拓展. 结果表明存在市场势力时, 引入配额贴现率动态调整的存储机制会导致减排约束无效, 未能使企业排放行为满足社会均衡排放路径.



(a) 仅碳市场存在市场势力



(b) 双市场均存在市场势力

图 4 不同碳生产率情形的碳排放总量与跨期碳配额贴现

Fig. 4 The relationship between total emissions and IPDR under different carbon productivity

5 结束语

研究构建不完全竞争条件下的两期碳市场模

型, 揭示了存在市场势力时碳配额初始分配和跨期贴现对碳价的影响, 推导出 MPCM 和 MPBM 情形的跨期碳市场有效性条件, 研究结果拓展了市场势力情形下碳价变动和跨期碳市场有效性的相关结论. 研究发现, MPCM 和 MPBM 情形下碳价随各期边缘企业初始碳配额分配量增加而递减. 其次, 相比跨期碳配额 1:1 贴现, 若调整碳配额跨期贴现率, 则存在市场势力压低碳价的情形. 第三, MPCM 情形企业分散均衡实现跨期碳市场有效性需满足各企业各期贴现边际碳要素收益相等; MPBM 情形实现跨期碳市场有效性需满足各企业各期贴现边际碳要素收益与碳要素收益效应之差相等. 基于上述研究结论, 提出如下政策启示.

首先, 同一行业中企业间初始碳配额有效分配需考虑是否存在产品市场势力. 碳减排规制下, 碳配额已成为企业生产决策的关键影响因素之一. 仅基于企业边际减排成本的碳配额初始分配将导致跨期碳市场效率损失. 由于市场势力仅存在产品市场和同时存在两个市场的跨期碳市场有效性条件不等价, 因此有必要衡量该行业产品价格是否内生且产品市场是否存在市场势力, 进而有的放矢地实行初始碳配额分配.

其次, 合理分配碳配额的同时实施碳价上下限等价格稳定措施. 碳交易机制有助于实现企业低成本减排已经成为共识, 然而无存贷机制和存贷机制下, 市场势力企业均可根据边缘企业初始碳配额分配量压低或抬高碳价, 可能引起更高的减排成本甚至导致碳市场无效. 市场规制者与控排企业存在碳配额供需信息不对称, 且不确定因素干扰引起企业碳配额需求变动. 运用碳价上下限约束政策有助于防止市场势力过度扭曲碳价, 避免碳价信号无效.

第三, 碳配额跨期贴现率调整下市场势力可能导致碳减排约束无效. 虽然跨期碳配额贴现率调整潜在加强了高排企业碳减排约束, 但是存在市场势力时计划期内碳排放总量可能超出碳总量控制目标, 且市场势力企业可能压低碳价, 不利于实现碳排放总量控制和碳减排有效约束. 因此, 存

贷机制下市场规制者在碳市场建立初期,应慎重运用碳配额跨期贴现率调整。

第四,促进控排企业提高碳生产率。若市场势力仅存在碳市场,同一碳配额跨期贴现率下,两企业碳生产率相等时碳价最高。若双市场均存在市场势力,同一碳配额跨期贴现率下碳价随边缘企业碳生产率递增。因此,市场规制者通过碳减排技术补贴、培养消费者环保意识等激励企业提高碳生产率有助于提高碳价。

研究未考虑技术进步对企业生产决策的影响,且仅局限于探讨确定性环境下企业在碳市场和产品市场中的最优决策,未将经济不确定性、季节变化、碳减排政策冲击等随机因素纳入模型。此外,企业间研发合作有助于削弱主导企业的市场势力^[34]。因此,后续研究可将企业技术进步和研发合作纳入模型。鉴于现实中控排企业碳减排决策面临不确定因素冲击,未来将探讨外部不确定因素影响下碳配额初始分配和跨期贴现与碳价间的关系。

参 考 文 献:

- [1] Meng S, Siriwardana M, McNeill J, et al. The impact of an ETS on the Australian energy sector: An integrated CGE and electricity modelling approach [J]. *Energy Economics*, 2018, (69): 213 – 224.
- [2] Borissov K, Brausmann A, Bretschger L. Carbon pricing, technology transition, and skill-based development [J]. *European Economic Review*, 2019, (118): 252 – 269.
- [3] 王明喜, 李明, 郭冬梅, 等. 碳排放权的非对称拍卖模型及其配置效率 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(7): 34 – 51.
Wang Mingxi, Li Ming, Guo Dongmei, et al. An asymmetric auction model of carbon emission rights and its allocation efficiency [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(7): 34 – 51. (in Chinese)
- [4] 杨子晖, 陈里璇, 罗彤. 边际减排成本与区域差异性研究 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(2): 1 – 21.
Yang Zihui, Chen Lixuan, Luo Tong. Marginal cost of emission reduction and regional differences [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(2): 1 – 21. (in Chinese)
- [5] 方芳, 杨岚, 周亚虹. 环境规制, 企业演化与城市制造业生产率 [J]. *管理科学学报*, 2020, 23(4): 22 – 37.
Fang Fang, Yang Lan, Zhou Yahong. Environmental regulation, firm dynamics and city manufacturing productivity [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(4): 22 – 37. (in Chinese)
- [6] 楼高翔, 张洁琼, 范体军, 等. 非对称信息下供应链减排投资策略及激励机制 [J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 42 – 52.
Lou Gaoxiang, Zhang Jieqiong, Fan Tijun, et al. Supply chain's investment strategy of emission reducing and incentive mechanism design under asymmetric information [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 42 – 52. (in Chinese)
- [7] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究 [J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 31 – 41.
Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 31 – 41. (in Chinese)
- [8] Liski M, Montero J P. Market power in an exhaustible resource market: The case of storable pollution permits [J]. *The Economic Journal*, 2011, 121(551): 116 – 144.
- [9] 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]. *管理科学学报*, 2020, 23(12): 1 – 11.
Wang Mei, Zhou Peng. Assessing the impact of emission permit allocation on the cost effectiveness of carbon market [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(12): 1 – 11. (in Chinese)
- [10] Lintunen J, Kuusela O P. Business cycles and emission trading with banking [J]. *European Economic Review*, 2018, (101): 397 – 417.
- [11] Keppler J H, Mansanet-Bataller M. Causalities between CO₂, electricity, and other energy variables during phase I and

- phase II of the EU ETS [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3329–3341.
- [12] Jiménez-Rodríguez R. What happens to the relationship between EU allowances prices and stock market indices in Europe? [J]. *Energy Economics*, 2019, (81): 13–24.
- [13] Chevallier J, Nguyen D K, Reboredo J C. A conditional dependence approach to CO₂-energy price relationships [J]. *Energy Economics*, 2019, (81): 812–821.
- [14] Koch N, Grosjean G, Fuss S, et al. Politics matters: Regulatory events as catalysts for price formation under cap-and-trade [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, (78): 121–139.
- [15] Lin B, Jia Z. What are the main factors affecting carbon price in emission trading scheme? A case study in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, (654): 525–534.
- [16] Hamaguchi Y. Does the trade of aviation emission permits lead to tourism-led growth and sustainable tourism? [J]. *Transport Policy*, 2021, (105): 181–192.
- [17] Kollenberg S, Taschini L. Dynamic supply adjustment and banking under uncertainty in an emission trading scheme: The market stability reserve [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, (118): 213–226.
- [18] Jiang M, Zhu B, Wei Y M, et al. An intertemporal carbon emissions trading system with cap adjustment and path control [J]. *Energy Policy*, 2018, (122): 152–161.
- [19] Slechten A. Intertemporal links in cap-and-trade schemes [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013, 66(2): 319–336.
- [20] Yates A J, Cronshaw M B. Pollution permit markets with intertemporal trading and asymmetric information [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2001, 42(1): 104–118.
- [21] Kling C, Rubin J. Bankable permits for the control of environmental pollution [J]. *Journal of Public Economics*, 1997, 64(1): 101–115.
- [22] Hintermann B. Market power, permit allocation and efficiency in emission permit markets [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 49(3): 327–349.
- [23] Tanaka M, Chen Y. Market power in emissions trading: Strategically manipulating permit price through fringe firms [J]. *Applied Energy*, 2012, (96): 203–211.
- [24] Chen Y H, Tanaka M. Permit banking in emission trading: Competition, arbitrage and linkage [J]. *Energy Economics*, 2018, (71): 70–82.
- [25] Tanaka M. Multi-sector model of tradable emission permits [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 51(1): 61–77.
- [26] Wang M, Zhou P. Impact of permit allocation on cap-and-trade system performance under market power [J]. *The Energy Journal*, 2020, 41(6): 215–232.
- [27] Dickson A, Mackenzie I A. Strategic trade in pollution permits [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, (87): 94–113.
- [28] 朱帮助, 江民星, 袁胜军, 等. 配额初始分配对跨期碳市场效率的影响研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(11): 2802–2811.
Zhu Bangzhu, Jiang Minxing, Yuan Shengjun, et al. Exploring the impacts of initial permits allocation on the efficiency of intertemporal carbon market [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(11): 2802–2811. (in Chinese)
- [29] Wen W, Zhou P, Zhang F. Carbon emissions abatement: Emissions trading vs consumer awareness [J]. *Energy Economics*, 2018, (76): 34–47.
- [30] Hitzemann S, Uhrig-Homburg M. Equilibrium price dynamics of emission permits [J]. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 2018, 53(4): 1653–1678.
- [31] Niu B, Mu Z, Chen L, et al. Coordinate the economic and environmental sustainability via procurement outsourcing in a co-opetitive supply chain [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, (146): 17–27.

- [32] Fell H, MacKenzie I A, Pizer W A. Prices versus quantities versus bankable quantities [J]. Resource and Energy Economics, 2012, 34(4): 607–623.
- [33] Yang H, Chen W. Retailer-driven carbon emission abatement with consumer environmental awareness and carbon tax: Revenue-sharing versus cost-sharing [J]. Omega, 2018, (78): 179–191.
- [34] 周晓晗, 张江华, 徐进. 基于序贯博弈的企业研发合作动机研究 [J]. 管理科学学报, 2021, 24(2): 111–126.
Zhou Xiaohan, Zhang Jianghua, Xu Jin. Research on the motivation for R&D cooperation between firms based on sequential game [J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(2): 111–126. (in Chinese)

The impact of permit allocation on intertemporal carbon market efficiency

ZHU Bang-zhu^{1,2}, HUANG Li-qing², JIANG Min-xing³, YE Shun-xin²

1. School of Business Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. School of Management, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
3. School of Business, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: This paper develops a two-period carbon market model in the context of imperfect competition, considering market power only in carbon market (MPCM) and market power in both carbon and product markets (MPBM). The effects of permit initial allocation and intertemporal discount on carbon price in carbon markets either with or without banking and borrowing are explored. The results show that carbon price decreases with the initial permit allocation of the fringe firm. Compared with the case of an intertemporal permit discount rate equal to 1, carbon price will be depressed by market power with IPDR adjustment. The permit allocation solutions for intertemporal carbon market efficiency are derived. In the case of MPCM, the intertemporal carbon market efficiency requires an equal discounted marginal carbon factor revenue for each firm in each period. While in the case of MPBM, it requires the difference between the discounted marginal carbon factor revenue and carbon revenue effect to be equal for each firm in each period. Several suggestions are put forward in order to reduce the damage of market power to carbon market efficiency.

Key words: carbon market; market power; permit allocation; banking and borrowing; intertemporal market efficiency

附录

命题 1 的证明:

无存贷机制下 MPCM 情形,由式(14)、式(17)和式(21)可得

$$S_i = c(X_i^* + s_{if} - L_{if}) + P_i \gamma_F \quad (A1)$$

$$\frac{\partial S_i}{\partial L_{if}} = -\frac{2c}{3} \quad (A2)$$

无存贷机制下 MPBM 情形,由式(14)、式(19)和式(23)可得

$$\frac{\partial S_i}{\partial L_{if}} = \frac{-2c^2 - \beta^2 \gamma_F^2 (\gamma_F - \gamma_M)^2 + c\beta(-3\gamma_F^2 + 2\gamma_F \gamma_M - 2\gamma_M^2)}{3c + 2\beta(\gamma_F - \gamma_M)^2} \quad (A3)$$

存贷机制下 MPCM 情形,由式(26)和式(34)可得

$$\frac{\partial S_i}{\partial L_{1F}} = -\frac{2c\alpha\delta}{3(\delta + \alpha^2)}, \quad \frac{\partial S_i}{\partial L_{2F}} = -\frac{2c\alpha^2\delta}{3(\delta + \alpha^2)} \quad (A4)$$

存贷机制下 MPBM 情形,由式(28)和式(35)得

$$\frac{\partial S'}{\partial L_{iF}} = -\frac{\alpha^i \delta (2c^2 + \beta^2 \gamma_F^2 (\gamma_F - \gamma_M)^2 + c\beta(3\gamma_F^2 - 2\gamma_F\gamma_M + 2\gamma_M^2))}{(\delta + \alpha^2)(3c + 2\beta(\gamma_F - \gamma_M)^2)} \quad (A5)$$

因此,无存贷机制下 $\frac{\partial S'_i}{\partial L_{iF}} < 0$. 存贷机制下 $\frac{\partial S'}{\partial L_{iF}} < 0$,命题 1 得证. 证毕.

命题 2 的证明:

命题 2(I) 的证明 MPCM 情形下,由式(26)和式(34)可得

$$\frac{\partial S'}{\partial \alpha} = \frac{\delta(P(\delta + 2\alpha - \alpha^2)(2\gamma_F + \gamma_M) + (c\delta - c\alpha^2)(2s_{1F} - 2L_{1F} + s_{1M} - L_{1M}) + 2\alpha\delta(2s_{2F} - 2L_{2F} + s_{2M} - L_{2M}))}{3(\delta + \alpha^2)^2} \quad (A6)$$

因此,当 $\delta - \alpha^2 > 0$ 时,则 $\frac{\partial S'}{\partial \alpha} > 0$.

命题 2(II) 的证明 MPBM 情形下,由式(28)和式(35)可知

$$\frac{\partial S'}{\partial \alpha} = \frac{(\delta - \alpha^2)}{\alpha(\delta + \alpha^2)} S' + \frac{\alpha\delta}{\delta + \alpha^2} \left(c \left(s_{2F} - L_{2F} + \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) + \gamma_F A - \gamma_F^2 \beta \left(L_{2F} - \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) - \gamma_F \gamma_M \beta \left(L_{2M} + \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) \right) \quad (A7)$$

当 $\gamma_M = \gamma_F = \gamma$ 时

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha\delta}{\delta + \alpha^2} \left(c \left(s_{2F} - L_{2F} + \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) + \gamma A - \gamma^2 \beta \left(L_{2F} - \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) - \gamma^2 \beta \left(L_{2M} + \frac{\partial X_B^{**}}{\partial \alpha} \right) \right) \\ &= \frac{\alpha\delta(c(2s_{2F} + s_{2M} - 2L_{2F} - L_{2M}) + 3\gamma(A - \beta\gamma(L_{2F} + L_{2M})))}{3(\delta + \alpha^2)} \end{aligned} \quad (A8)$$

因此,当 $\gamma_M = \gamma_F = \gamma$, $\delta > \alpha^2$ 且 $A > \beta\gamma(L_{2F} + L_{2M})$ 时, $\frac{\partial S'}{\partial \alpha} > 0$. 证毕.

命题 3 的证明:

命题 3(I) 的证明, MPCM 情形下跨期市场有效性需要满足

$$\frac{\alpha\delta c}{\delta + \alpha^2} X_B^* + S' = S' \quad (A9)$$

因此,由式(34)可得

$$s_{1M} + \alpha s_{2M} + \frac{\alpha + \delta}{\delta c} P\gamma_M + L_{1F} + \alpha L_{2F} - \frac{\alpha + \delta}{\delta c} P\gamma_F - (s_{1F} + \alpha s_{2F}) - L_{1M} - \alpha L_{2M} = 0 \quad (A10)$$

化简整理可得命题 3(I).

命题 3(II) 的证明,当两个市场均存在市场势力时,由式(12)和式(33)可得跨期市场有效性需要满足

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha^{i-1} \delta^{2-i} (c + \beta\gamma_F^2)}{\delta + \alpha^2} \left(1 - \frac{\beta\gamma_M\gamma_F}{c + \beta\gamma_F^2} \right) \left(X_B^{**} - \sum_{i=1}^2 \left(\alpha^{i-2} \frac{\alpha\beta E_{iM}\gamma_M\gamma_F}{c + \gamma_F^2\beta} \right) \right) + \beta\gamma_F(q_{iM} + q_{iF}) = \\ & \gamma_M E_{iM} \frac{\gamma_M\gamma_F^2\beta^2}{c + \beta\gamma_F^2} + q_{iF}\beta\gamma_M \end{aligned} \quad (A11)$$

因此,根据 MPBM 情形企业 j 均衡碳排放量和碳配额交易量简化整理得命题 3(II). 证毕.