

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.12.011

区域间碳交互过程下的策略分析与碳市场影响研究^①

王先甲¹, 薛林昭^{1, 2*}, 王 璨¹, 王琳琳¹

(1. 武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072; 2. 青岛科技大学气候变迁与能源可持续发展研究院, 青岛 266044)

摘要: 针对二氧化碳流动性引发的区域间碳交互问题, 本文于碳市场背景下探讨了分散决策与集中管理两种模式下的区域碳管理策略, 探究出各区域策略的演化趋势与碳减排效果, 并提供区域实现特定碳治理效果的市场条件. 结果表明: 1) 碳市场价格波动对区域内碳存量与管理策略演变产生异质性调控效果, 且影响区域治理效果在两种模式下的占优特性; 2) 分散决策下提高博弈持续时间可明显降低区域碳产出的增长率, 还可管控区域碳吸收的下降趋势. 而且当一方无视当地污染水平时, 另一方在两模式下的碳管理策略将趋于一致; 3) 对于污染影响大的区域, 碳治理与经济增长的双重压力在集中管理模式可得到有效缓解. 本文可为跨界碳交互过程下各区域碳管理策略的制定及区域跨界碳交互的高效治理提供政策启示.

关键词: 跨界碳交互; 碳市场; 分散模式与集中模式; 区域管理策略; 微分博弈

中图分类号: F224.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)12-0152-19

0 引言

二氧化碳受气流影响会产生跨区域流动现象(亦称跨界碳交互), 其中碳交互的规模及其影响通常随着时间动态变化, 受影响区域的碳损害状况共同受制于自身与关联区域的碳管理策略. 由于区域间二氧化碳随着时间的跨界传播与动态累积, 单个区域的碳累积量将与其自身净排放量不相匹配^[1, 2]. 区域们根据自身排放收益决定碳管理策略, 进而形成区域间碳管理行为的动态博弈关系.

考虑到当前面向区域(本质是对区域内企业)实施的碳排放限额政策、碳市场交易与治污技术正在迅速推广, 区域权衡自己的利益来选择碳管理过程策略时, 除了分析其它区域碳排放对本区域影响以外, 必然要权衡碳排放限额、碳交易市场价格和自身减碳技术的综合效益, 这类背景

正是本文所关心的. 本文探究在碳存量演化过程交互影响下, 当多区域为独立决策主体时, 每个区域如何基于自身利益来确定碳产出与吸收策略进而实现博弈的均衡; 其次, 当多区域统一决策时, 如何确定多区域联合行动下的碳产出、吸收策略, 使得多区域联合效益最大.

跨界问题在具有流动性的排放物身上较易出现, 如跨界水污染. 随着跨界污染的持续传播与动态累积, 不同区域之间经过连续的动态博弈来追求自身经济效益的最大化^[3, 4]. 但跨界水污染的研究往往以单向传输为主, 而本文是以区域间碳交互传播为背景, 其包含气体的双向传播特性. 跨界大气污染的普遍性与危害性是推动此类研究的重要原因. 根据中国科学院“大气灰霾溯源”项目的研究结果表明: 京津冀区域内北京空气中PM_{2.5}总量的30%~40%来自本地排放, 20%~30%是源于大气中光化学转化, 30%~40%是区

① 收稿日期: 2023-06-04; 修订日期: 2025-06-29.

基金项目: 国家社会科学基金资助重大项目(20&ZD058); 国家自然科学基金资助重点项目(72031009).

通讯作者: 薛林昭(1996—), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授. Email: Linzhaoxue@whu.edu.cn

域传输导致的^[5]。

其次,已有研究表明跨界碳交互问题严重损害区域的居民健康、社会经济财产和生态环境,而且阻碍区域碳减排目标的实现,减缓周边地区经济的可持续发展^[6-8]。为实现绿色低碳高质量发展,部分区域已经开始关注跨界问题,并尝试探索经济高效的协同治理方案。2021 年 7 月,《重庆市生态环境局成都市生态环境局战略合作协议》在渝签署,川渝两地约定在推进水污染防治合作,强化大气污染防治联动等方面建立务实高效的合作机制,共促环境保护,共建生态文明^[9]。此外《长江三角洲区域生态环境共同保护规划》对长三角区域提出的重要任务之一便是共治跨界环境污染,包括联合开展大气污染综合防治^[10]。本文的跨界碳交互研究将对上述协同防治方案的制订提供指导作用。

为高效率地完成社会碳减排目标,碳交易市场的试点推广在我国引起非常大的关注^[11, 12]。目前我国的碳交易市场规模已居世界第二,即将超越欧盟。因此碳排放市场在跨界污染背景下对各区域的碳减排调控效果研究具备重大现实意义。对此,本文以碳市场机制为出发点,以碳交互过程中两个相互独立的区域为背景,探讨两区域在不同管理决策模式下的碳管理策略;探究出碳市场下各地碳产出和吸收策略的影响因素和演化特征,进而剖析碳市场对各地碳存量演变的影响机理和调控效果。

作为常见的污染治理手段,排放权交易制度通过排放权的市场交易建立横向交易关系来促进不同区域排放权的流动,以此弥补跨区域污染治理中部分区域的减排成本^[13, 14]。基于欧洲的排放权交易机制下,Monica 和 Francesco^[15]研究可碳交易价格对电力行业内企业定价策略的影响。Damien 和 Philippe^[16]在钢铁行业内研究了欧洲碳排放交易机制对企业生产策略与效益的影响。杜少甫等^[17]考虑到排放许可交易机制对高排放企业生产策略的影响,在三种排放权获取渠道下建立的优化模型来研究最优生产策略。Anand 等^[18]在竞争市场下揭露了寡头企业在碳交易和碳税规制政策下的行为策略和收益影响。

相较于上述文献,本文将碳交易市场引入到具有碳交互特性的跨界碳交互问题里,分析碳市

场等因素对碳管理策略、存量演化及其治理模式的影响。

对于跨界污染的治理,学者们除了排放权交易机制外,也从其他角度进行大量的研究^[19]。生态补偿机制能够将公共物品在空间上的外溢性内部化,成为解决跨界污染的重要工具之一^[20]。基于生态补偿角度,黄彬彬等^[21]构建静态贝叶斯博弈模型对比分析了不完备信息下受补偿者与补偿者的占优策略选择。考虑到环保补贴政策的影响, Li 和 Chen^[22]研究了跨国污染博弈中目光短浅和长远情景下不同国家的二氧化碳减排行为策略。在地方政府间跨界污染治理背景下,姜珂等^[23]引入横向生态补偿机制到博弈模型中,寻求提高区域协同减排的积极性来降低污染排放。基于税收角度赵来军^[24]通过流域管理部门和辖区间 Stackelberg 博弈分析,构建水污染转移税协调模型来求解跨流域水污染问题。Petrosjan 和 Zaccour^[25]在涉及多个国家的跨界污染背景下寻求减排成本最小化方案,并运用 Sharpley 方法进一步研究成本分摊。另外从跨界污染与国际贸易的关联视角, Folmer^[26]研究显示加强贸易合作关系、增加商品的国际流动性能显著缓解跨界污染困境。Fernandez^[27]探究美国与墨西哥间跨流域污染冲突问题受贸易自由化的影响,结果表明贸易自由化的升高可促使墨西哥消减污染的排放。在研究方法上,上述学者们主要采用静态模型或离散时间博弈模型来解决跨界污染问题。但二氧化碳的跨区域流动性是一个动态变化的过程,各地区二氧化碳的存量以及地区的行为策略会随时间动态演变,在跨界碳交互过程中形成区域间的动态博弈问题^[28]。为准确的刻画跨界碳交互问题的动态特性,本文构建的是在连续时间的动态博弈模型,其中各区域内碳存量构成多维状态交互演化系统。

微分博弈理论是将传统博弈扩展到连续时间上,通过各博弈方持续相互的博弈来寻求各自目标函数的最优化,因此用来解决跨界问题更为恰当^[29]。就跨界污染微分博弈而言, Li^[30]在传统微分博弈模型基础上引入排放权交易机制,探究了无限期时间范围内区域在非合作和合作博弈下跨界污染控制策略的差异。此外基于供应链的视角,徐春秋等^[31]构建无限时间内上下游联合减排与

低碳宣传的微分博弈模型,研究不同战略下供应链低碳化的管理策略. Bertinelli 等^[32]研究受跨界碳交互影响下无限期限内两国家非合作微分博弈,分析开环和马尔科夫纳什均衡两战略的收益情况. 程粟粟等^[4]在 Bertinelli 的博弈模型基础上考虑碳捕获与碳封存过程的影响,探究两个对称国家在开环、马尔科夫纳什均衡和合作战略下国家碳捕获和碳封存博弈均衡策略及结果. Bencheikroun 和 Martín-Herrán^[33]探究了跨国污染治理中目光短浅与长远国家间博弈收益情况. 在碳排放约束条件下,申成然等^[34]对比研究了强制减排和碳排放权交易下制造商最优决策的差异性. 同样设置碳排放约束, Cachon^[35]研究供应链下游的网络布局策略来实现运营成本最小化目标. 在这些跨界污染的动态博弈模型中,污染状态存量局限于一维,以一个污染物总量对不同区域的伤害差异来反应跨界污染的流动性,和本文建立的动力学演化方程相比具有明显的局限性. 本文的优势是能够分别讨论不同区域的污染物存量单独演化状况及其影响. 张明等^[5]同样建立二维的污染物存量演化系统来描述跨界污染的流动性,但其聚焦于区域间竞争强度对各区域减排策略与污染存量的影响,对交易价格的影响研究不够深入,并没有探究价格对保持碳市场活力、实现碳中和效果的影响,而且模型欠缺对区域极限行动能力的考虑.

本文的主要研究内容如下:一,以各区域污染物存量组成的二维污染存量为系统状态来刻画碳存量演化系统的动态特征,建立状态变量的动力学演化方程,该方程揭示了一个区域污染物存量不仅依赖于各个区域的碳管理过程策略,还侧重其他区域的碳存量交互影响;二,在分散决策模式下,建立了碳存量演化过程下带行动约束的跨界碳交互微分博弈模型. 该模型利用状态演化的动力学方程,构建区域在碳交互影响下的收益泛函. 利用庞特里亚金最大值原理(Pontryagin's Maximum Principle)给出了均衡策略的解析表示,在解析解的帮助下剖析了碳管理策略;三、在集中决策模式下,建立了联合区域碳交互演化过程下的区域跨界碳交互最优控制模型,基于最优控制策略的概念给出了最优碳管理策略的解析表示及碳管理策略的差异性;四、通过仿真实验,分析出不同

因素对产出(吸收)均衡策略、最优控制策略及其碳治理效果的影响.

本文贡献如下:首先设置各区域污染物存量组成的二维污染存量演化系统作为状态约束,构建有限时间内碳交互过程下的区域跨界碳交互模型,其中决策变量具备上下限约束. 该模型可以刻画出不同模式影响下各个区域碳存量的单独演化状况,为剖析不同区域的碳治理效果奠定理论基础;其次,给出所建模型在约束条件下得具体解析解,分析模型解背后的实际含义,进而推动碳管理策略在不同情形的对比分析;最后,在碳市场背景下,揭露市场因素对实现各区域不同碳治理效果的影响. 本文结果不仅探究出碳市场的推广价值,也为跨界污染协同治理提供新的管理视角.

1 模型框架

1.1 问题描述

考虑两个相邻区域 1 和区域 2,它们遭受跨界碳交互问题影响,该影响在一个有限时间范围内按自然规律演化. 区域作为博弈方,代表该区域内所有生产企业的统一体. 设区域的集合为 $N = \{1, 2\}$,考虑有限时间内两个区域的动态博弈,时间区间为 $[0, T]$.

区域 $i \in N$ 在时间区间 $[0, T]$ 内生产市场上需要的产品,生产过程不仅带来经济收益,也产生碳排放,设区域 $i \in N$ 在时刻 $t \in [0, T]$ 内通过生产导致的碳产出量为 $e_i(t)$. 设区域 i 内所有企业的碳排放许可额度为 \bar{E}_i ,假设这里的许可额度由政府事先制定. 如果 $e_i(t) - \bar{E}_i > 0$ 时,区域 i 需要购买额度. 各区域也可使用碳捕获与碳封存技术(CCS)来吸收二氧化碳,降低自身碳净排放量,设区域 i 在 t 时刻利用 CCS 技术引发的二氧化碳吸收量为 $u_i(t)$,此时区域 i 仍需要从碳市场购买或出让碳额度为 $e_i(t) - \bar{E}_i - u_i(t)$.

1.2 碳存量演化的动力学方程

区域在任何时刻 t 的碳损害状况取决于该时刻拥的碳总量,本文称其为碳存量,它是该区域 t 时刻前净排放量的累计量、其它区域碳交换量以及自身净化量的代数和. 区域碳存量设为博弈系统的状态变量. 设区域 i 在时刻 t 的碳存量为

$x_i(t)$, 区域间存在碳交互关系, 其中二氧化碳作为温室气体可以双向流动, 因此区域间的碳存量相互关联.

于是, 设区域 i 向另一方的碳传输比例为 $\varphi_i > 0$, 因此在时刻 t 的传输量为 $\varphi_i x_i(t)$. 除了传播部分外, 它的增量与区域内碳排放量 $e_i(t) - u_i(t)$ 呈正比, 同区域内自然环境的净化量 $\delta_i x_i(t)$ 呈反比. 参考张明^[5]和 Sedakov^[36]的研究, 各区域的碳存量 $x_i(t)$ 服从下面动力系统

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = e_1(t) - u_1(t) - (\delta_1 + \varphi_1) x_1(t) + \varphi_2 x_2(t) \\ \frac{dx_2}{dt} = e_2(t) - u_2(t) - (\delta_2 + \varphi_2) x_2(t) + \varphi_1 x_1(t) \\ x_1(0) = x_0^1 > 0, x_2(0) = x_0^2 > 0 \\ x_1(T), x_2(T) \text{ 是自由的} \end{cases} \quad (1)$$

其中 x_0^i 指区域 i 在初始时刻 $t = 0$ 的初始值, 而在博弈终点 T 处两区域二氧化碳存量是自由的. 另外, 系数 δ_i 表示区域 i 的自然净化率. 式(1)的演化动力系统是两区域产生博弈的关键, 它体现了两区域碳存量的交互传播关系.

1.3 区域效益函数

$e_i(t)$ 是区域 i 在时刻 t 产品生产产生的碳量, 假设碳产出量与产品产量间存在线性关系, 根据 Breton 等^[37]研究获得效应函数的表达式为

$$R_i(t) = \ln(\alpha_i e_i(t)) \quad (2)$$

这里 $R_i(t)$ 为产品生产引起的经济效益, 其中系数 $\alpha_i > 0$. 现实中区域内企业的数量是有限的, 每个企业不论是碳产出还是碳吸收能力都是有上限的, 因此区域碳产出量 $e_i(t)$ 也必然存在极限. 这里设 $e_i(t)$ 满足 $0 < e_i(t) \leq \tilde{e}_i$, 其中 \tilde{e}_i 代表区域 i 的二氧化碳最高产出.

当各区域实际碳产出量大于政府部门给它的碳限额时, 它可利用现有的碳净化技术自己处理, 从而减少碳排放量. 由于主动式除碳能力的需求, 包含碳的捕捉、压缩、运输及储存的碳捕获与碳封存技术 (CCS) 技术逐渐兴起, 尽管该技术所需投入成本较高, 但受规模效应的影响有望得到大幅度削减, 因此具有极大的发展潜力^[32]. 设各区域内企业有能力使用 CCS 技术吸收二氧化碳, 区域

i 在时间 t 下利用 CCS 引起的二氧化碳吸收量为 $u_i(t)$. 借鉴 Bertinelli 等^[32]研究, 区域 i 由该技术在时刻 t 的实施成本 $C_i(t)$ 为

$$C_i(t) = \frac{c_i u_i^2(t)}{2} + b_i u_i(t) \quad (3)$$

系数 c_i 和 b_i 都是非负常数, 其中 c_i 是碳吸收成本系数, b_i 表示现有技术储备下维护成本系数. 同时设置约束条件为 $0 \leq u_i(t) \leq \tilde{u}_i$, \tilde{u}_i 是区域 i 的二氧化碳最高吸收值. 区别于 Xia 等^[38]和 Ma 等^[39]中出现的成本函数, 式(3)不仅涉及了碳吸收操作成本, 而且加入对吸收过程中保养维护等成本的考虑.

当其碳净产出量 $Y_i(t) = e_i(t) - u_i(t)$ 超出额度 \bar{E}_i 时, 区域 i 需要以 t 时刻的市场价格到碳市场交易. 这里假设市场是充分大的, 不仅覆盖所研究的两个区域, 还有其他区域. 所有区域都可以随时且自由的交易, 而且交易都是瞬时发生的, 不存在时延. 根据供求关系, 假设市场价格与区域排放额度呈反比, 而且是关于 t 可导的连续函数. 考虑到排放额度一般是固定的, 而时间是持续变化的, w 用 $p(t)$ 来表示时刻 t 的市场交易价格. 区域 i 在时间 t 的市场效应函数 $T_i(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} T_i(t) &= p(t) [\bar{E}_i - Y_i(t)] \\ &= p(t) [\bar{E}_i - e_i(t) + u_i(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

最后考虑二氧化碳过度排放引发得负面效应, 它包含对生物多样性的威胁和居民健康、财产方面的损失. 假设区域 i 在时刻 t 由碳存量 $x_i(t)$ 产生的损失函数是关于其存量的线性函数, 即

$$D_i(x_i(t)) = \eta_i x_i(t) \quad (5)$$

这里 $\eta_i > 0$ 表示污染物存量对区域收益的损害水平.

基于上述分析, 区域 1 和区域 2 在有限时间区间 $[0, T]$ 内的净效益是由生产过程中产生的碳产出量 $e_i(t)$ 和吸收量 $u_i(t)$ 构成的目标泛函, 可表示为

$$\begin{aligned} \Pi_1(t, x(t), m_1(t), m_2(t)) &= e^{-rt} \{ R_1(t) - C_1(t) + T_1(t) - D_1(x_1(t)) \} = e^{-rt} \{ \ln(\alpha_1 e_1(t)) - \\ &\quad c_1 u_1^2(t)/2 - b_1 u_1(t) + p(t) [\bar{E}_1 - e_1(t) + u_1(t)] - \eta_1 x_1(t) \} \\ \Pi_2(t, x(t), m_1(t), m_2(t)) &= e^{-rt} \{ R_2(t) - C_2(t) + \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_2(t) - D_2(x_2(t))\} = e^{-rt} \{ \ln(\alpha_2 e_2(t)) - c_2 u_2^2(t)/2 - b_2 u_2(t) + p(t)[\tilde{E}_2 - e_2(t) + u_2(t)] - \eta_2 x_2(t) \} \quad (7)$$

这里 $m_i(\cdot) = (e_i(\cdot), u_i(\cdot))$ 称为区域 i 的决策变量, 其中 $e_i(\cdot): [0, T] \mapsto [0, \tilde{e}_i]$, $u_i(\cdot): [0, T] \mapsto [0, \tilde{u}_i]$. 系统状态变量 $x(\cdot) = (x_1(\cdot), x_2(\cdot))$. $\Pi_1(\cdot)$ 表示区域 i 在指定区间内的折现净收益, 它是关于变量 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$ 的泛函. Π_1 的右边不直接显示 $m_2(\cdot)$, 但 $x(\cdot)$ 同时被 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$ 决定. $\Pi_2(\cdot)$ 也类似, 它的右边隐式受 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$ 的共同影响. 系数 $r > 0$ 表示两区域的共同折现率.

式(6)和式(7)清晰地反映出, 每个区域的综合折现效益不仅依赖于自己的决策, 还依赖于另一个区域的决策, 从而构成两个区域间的博弈关系.

为了后面表述的方便, 这里对区域的决策变量可行范围给出详细描述. 具体结果见定义 1.

定义 1 令

$$E_i = \{e_i(\cdot) \mid e_i(\cdot): [0, T] \mapsto R, e_i(\cdot) \text{ 在 } [0, T]$$

上分段连续, $0 \leq e_i(t) \leq \tilde{e}_i, t \in [0, T]\}$,

$$U_i = \{u_i(\cdot) \mid u_i(\cdot): [0, T] \mapsto R, u_i(\cdot) \text{ 在 } [0, T]$$

上分段连续, $0 \leq u_i(t) \leq \tilde{u}_i, t \in [0, T]\}$, $M_i = E_i \times U_i, i = 1, 2$, 这里 M_1 和 M_2 分别称为区域 1 和区域 2 的策略空间, 其中 E_1 和 E_2 分别称为区域 1 和区域 2 的碳产出策略空间, U_1 和 U_2 分别称为区域 1 和区域 2 的碳吸收策略空间. E_i 和 U_i 分别包含了约束条件下区域 i 所有的可行碳产出策略与碳吸收策略. 每个区域为实现自身折现净收益 $\Pi_i(\cdot)$ 的最大化, 将同时从中选择最为恰当的策略构成策略组合 $m_i(\cdot) \in M_i$.

2 分散决策模式下区域碳产出(吸收)均衡策略分析

假设两区域都是理性的决策主体, 它们在博弈期间同时且独立地进行决策, 每个博弈方的目标是在有限时间 $[0, T]$ 内根据自身能力寻求各自二氧化碳均衡产出和吸收策略使得净收益折现流最大化并满足在跨界碳交互背景下双方碳存量 $x_1(t)$ 和

$x_2(t)$ 交互影响的动力学系统约束. 综合来看, 碳交互影响下区域关于碳产出和吸收过程的跨界碳交互微分博弈表示如下

$$\begin{aligned} & \max_{m_1(\cdot) \in M_1} \int_0^T e^{-rt} \{ \ln(\alpha_1 e_1(t)) - \frac{c_1 u_1^2(t)}{2} - b_1 u_1(t) + p(t)[\tilde{E}_1 - e_1(t) + u_1(t)] - \eta_1 x_1(t) \} dt \\ & \max_{m_2(\cdot) \in M_2} \int_0^T e^{-rt} \{ \ln(\alpha_2 e_2(t)) - \frac{c_2 u_2^2(t)}{2} - b_2 u_2(t) + p(t)[\tilde{E}_2 - e_2(t) + u_2(t)] - \eta_2 x_2(t) \} dt \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = e_1(t) - u_1(t) - (\delta_1 + \varphi_1) x_1(t) + \varphi_2 x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = e_2(t) - u_2(t) - (\delta_2 + \varphi_2) x_2(t) + \varphi_1 x_1(t) \\ x_i(0) = x_0^i > 0, x_i(T) \text{ 是自由的} \\ 0 \leq e_i(t) \leq \tilde{e}_i, 0 \leq u_i(t) \leq \tilde{u}_i, i = 1, 2 \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)提供了在碳交互过程下两区域关于策略 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$ 的微分博弈模型, 其状态变量为 $x_1(\cdot)$ 和 $x_2(\cdot)$. 下面利用纳什均衡策略概念给出该微分博弈模型的解概念.

定义 2 称 $(m_1^*(\cdot), m_2^*(\cdot))$ 为微分博弈问题(8)的开环纳什均衡解, 如果存在函数 $\chi_i(t): [0, T] \rightarrow R^2$, 对于任意 $t \in [0, T]$ 和 $i \in \{1, 2\}$ 有

$$\begin{aligned} a_i^*(t) &= \arg \max_{a_i \in E_i} \left\{ \Pi_i(t, x^*(t), a_i(t), a_{-i}^*(t)) + \chi_i(t) g(x^*(t), a_i(t), a_{-i}^*(t)) \right\} \\ \dot{\chi}_i(t) &= -\frac{\partial}{\partial x^*} \left\{ \Pi_i(t, x^*(t), a_i^*(t), a_{-i}^*(t)) + \chi_i(t) g(x^*(t), a_i^*(t), a_{-i}^*(t)) \right\} \end{aligned}$$

且 $\chi_i(T) = 0, \dot{x}^*(t) = g(x^*(t), a_i^*(t), a_{-i}^*(t))$, $x^*(T) = (x_0^1, x_0^2)$, 向量 $g(\cdot) = (g_1(\cdot), g_2(\cdot))$ 其中 $g_i(\cdot) = e_i(\cdot) - u_i(\cdot) - (\delta_i + \varphi_i) x_i(\cdot) + \varphi_{-i} \times x_{-i}(\cdot)$. 如果策略组合 $(m_1^*(\cdot), m_2^*(\cdot))$ 为微分博弈问题(8)的开环纳什均衡解, 根据前面设定 $m_i^*(\cdot) = (e_i^*(\cdot), u_i^*(\cdot))$, 称 $e_i^*(\cdot)$ 为区域 i 的碳产出均衡策略, 称 $u_i^*(\cdot)$ 为区域 i 的碳吸收均衡

策略.

从上述纳什均衡解的定义可知, 博弈的纳什均衡是两个区域可行策略组合, 并且当对方策略选择策略组合内的策略时, 该策略组合中己方的策略正是自己的最优策略, 或者说这个策略组合对两个区域来说都是最优策略(或互为最优反应策略). 本节的目的是探讨这个解概念的解析表示及其特性.

定理 1 在分散决策博弈情景下, 令 $M_1(t) = \gamma_1(1 - e^{(\lambda_1+r)(t-T)}) + \gamma_2(1 - e^{(\lambda_2+r)(t-T)})$, 区域 1 二氧化碳产出和吸收的纳什均衡策略分别为

$$e_1^* = \begin{cases} \tilde{e}_1, & p(t) < 1/\tilde{e}_1 + M_1(t), \\ 1/[p(t) - M_1(t)], & p(t) \geq 1/\tilde{e}_1 + M_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$u_1^* = \begin{cases} 0, & p(t) < b_1 + M_1(t), \\ \tilde{u}_1, & p(t) > b_1 + M_1(t) + c_1 \tilde{u}_1, \\ (1/c_1)[p(t) - b_1 - M_1(t)], & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

令 $M_2(t) = \xi_1(1 - e^{(\lambda_1+r)(t-T)}) + \xi_2(1 - e^{(\lambda_2+r)(t-T)})$, 区域 2 二氧化碳产出和吸收的纳什均衡策略分别为

$$e_2^* = \begin{cases} \tilde{e}_2, & p(t) < 1/\tilde{e}_2 + M_2(t), \\ 1/[p(t) - M_2(t)], & p(t) \geq 1/\tilde{e}_2 + M_2(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$u_2^* = \begin{cases} \tilde{u}_2, & p(t) > b_2 + \tilde{u}_2 c_2 + M_2(t), \\ 0, & p(t) < b_2 + M_2(t), \\ (1/c_2)[p(t) - b_2 - M_2(t)], & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\mu_l = \delta_l + \varphi_l$, $\lambda_1 = (\mu_1 + \mu_2 + \sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2})/2$, $\lambda_2 = (\mu_1 + \mu_2 - \sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2})/2$, $\xi_1 = (\mu_1 - \lambda_1)\eta_2/[(\lambda_1 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)]$, $\xi_2 = (\mu_1 - \lambda_2)\eta_2/[(\lambda_2 + r)(\lambda_2 - \lambda_1)]$, $\gamma_1 = (\mu_1 - \lambda_2)\eta_1/[(\lambda_1 + r)(\lambda_2 - \lambda_1)]$, $\gamma_2 = (\mu_1 - \lambda_1)\eta_1/[(\lambda_2 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)]$, $l \in \{1, 2\}$.

证明过程略^②, 下同.

根据定理 1 中博弈的解析解, 可知两区域的均衡策略可视为关于 p 值的分段函数. 具体地, 就碳产出策略而言, 每个区域都存在一个价格阈值条件 $1/\tilde{e}_i + M_i(t)$ 对应于自身碳产出的上限 \tilde{e}_i , 该条件是关于时间 t 的连续函数. 当 t 时刻价格低于此时的阈值条件时, 区域对二氧化碳的产出量

会达到能力范围内的最高值, 即此刻区域内企业将尽最大努力开展生产活动. 另一边, 针对碳吸收策略, 两区域对应自身碳吸收能力上下限(即 \tilde{u}_i 和 0)表露出两个关于 t 的价格阈值条件, 他们分别是 $b_i + \tilde{u}_i c_i + M_i(t)$, $b_i + M_i(t)$. 如果价格处于这两个条件之间, 区域 i 会开展 $(1/c_i)[p(t) - b_i - M_i(t)]$ 的碳吸收工作. 这两阈值条件的差值是常数项 $\tilde{u}_i c_i$, 其表示区域 i 的碳吸收策略对于碳交易价格的敏感区间. 因此当 \tilde{u}_i 和 c_i 越高时, 该区域碳吸收策略关于价格的敏感区间就越大.

注意到 $M_i(t)$ 在阈值条件和均衡策略中都扮演着重要角色, 该值的变化不仅可以降低阈值条件, 还会直接改变碳吸收 $u_i^*(t)$ 与产出 $E_i^*(t)$ 策略. 定理 1 中 $M_i(t)$ 的具体形式显示出其是受多种复杂因素影响的连续函数, 主要由博弈环境以及博弈个体性质决定并随时间演化. 本文将它看作外生的, 不受任何博弈方本身控制, 但是能够被外部力量所影响, 如环境管理部门、辖区归属政府等权威机构. 它的具体影响是本文接下来研究关注的重心. 首先, 在非极限情景(即区域的策略不超出自身的上下限)下, 均衡策略受相关因素的影响结果被总结在下面推论 1 中.

推论 1 这里有: 1) 当条件满足 $b_i + M_i(t) \leq p(t) \leq b_i + M_i(t) + c_i \tilde{u}_i$ 时, 区域的二氧化碳吸收均衡策略 u_i^* 与 p 呈严格的正比例关系, 但与维护系数 b_i 、吸收成本系数 c_i 、各区域排放额度 \bar{E}_i 和 \bar{E}_{-i} 呈反比例关系, 其相关的边际效应分别为 $\partial u_i^*/\partial p = 1/c_i$, $\partial u_i^*/\partial b_i = -1/c_i$, $\partial u_i^*/\partial c_i = -[p(t) - b_i - M_i(t)]/c_i^2$, $\partial u_i^*/\partial \bar{E}_l = (\partial p/\partial \bar{E}_l)/c_i$, $l = 1, 2$; 2) 当条件满足 $p(t) \geq 1/\tilde{e}_i + M_i(t)$ 时, 两区域的二氧化碳产出均衡策略 e_i^* 与 p 呈反比, 与各区域排放额度呈正比. 这里对应策略的边际效应分别为 $\partial e_i^*/\partial p = -1/[p(t) - M_i(t)]^2$, $\partial e_i^*/\partial \bar{E}_l = -(\partial p/\partial \bar{E}_l)/[p(t) - M_i(t)]^2$; 3) 区域碳产出均衡策略 e_i^* 关于时间的变化率为 $[M_i'(t) - p'(t)]/[p(t) - M_i(t)]^2$, 碳吸收均衡策略 u_i^* 的变化率为 $-M_i'(t)/c_i$.

② 如需要者可向作者索要.

通过推论 1,发现在非极端情景中,价格的升高对区域内二氧化碳的减排治理产生明显的积极作用,它不仅能降低两区域的二氧化碳产出量,还能提高对二氧化碳的吸收量,这实质上加强了区域碳减排行为的积极性.相反,借助价格这个中介变量,区域碳排放额度的增加将显著降低各区域碳减排的积极性.结论与本文已有认知是一致的.此外 u_i^* 关于 p 的边际效应和其关于 b_i 的边际效应的绝对值是相等的,只不过两者的作用效果是相反的,因此维护成本的增加将等比抵消价格对吸收策略的激励效果.另一边,排放额度对碳吸收和产出均衡策略的边际贡献是受价格关于排放额度的边际效应的约束.价格的边际效应越强,额度的边际贡献强度(边际贡献的绝对值)就越大.推论 1 从理论方面验证且量化了建立碳市场产生的减排效应,也揭露了交易价格、排放额度、相关成本等因素对区域碳减排行动的影响强度.

在推论 1 中的 3),两区域的均衡策略关于时间 t 的变化率与 $M_i'(t)$ 有关.且 $M_1(t) = \gamma_1(1 - e^{(\lambda_1+r)(t-T)}) + \gamma_2(1 - e^{(\lambda_2+r)(t-T)})$ 关于时间的一阶导数为 $M_1'(t) = -\gamma_1(\lambda_1 + r)e^{(\lambda_1+r)(t-T)} - \gamma_2(\lambda_2 + r)e^{(\lambda_2+r)(t-T)}$.基于前面的参数设置,这里 $\lambda_i > 0$ 且 $e^{(\lambda_i+r)(t-T)} > 0$,因此 $M_1(t)$ 的变化率是正还是负是由参数 γ_1 和 γ_2 共同决定.把 λ_1 和 λ_2 代入到 γ_1 和 γ_2 的关键部位中,可得两者的表达式为

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}/2 + (\mu_1 - \mu_2)/2)\eta_1}{-(\lambda_1 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \\ \gamma_2 &= \frac{-((\mu_2 - \mu_1)/2 + \sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}/2)\eta_1}{(\lambda_2 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \end{aligned} \quad (13)$$

回顾前面的参数设置,发现 γ_1 和 γ_2 都是恒小于零,即 $\gamma_1, \gamma_2 < 0$.此时得到在 $t \in [0, T]$ 上 $M_1(t) < 0$ 且 $M_1'(t) > 0$.同样可知 $M_2(t)$ 的变化率表示为 $M_2'(t) = -\xi_1(\lambda_1 + r)e^{(\lambda_1+r)(t-T)} - \xi_2(\lambda_2 + r)e^{(\lambda_2+r)(t-T)}$,其正负符号仍然是依靠 ξ_1 和 ξ_2 ,它们的具体形式是

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{-((\mu_2 - \mu_1)/2 + \sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}/2)\eta_2}{(\lambda_1 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \\ \xi_2 &= \frac{(\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}/2 + (\mu_2 - \mu_1)/2)\eta_2}{-(\lambda_2 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \end{aligned} \quad (14)$$

同样不难推理出这里的 ξ_1 和 ξ_2 也恒小于零,即 $\xi_1, \xi_2 < 0$.由于 ξ_1 和 ξ_2 符号同向且皆为负,因此在此 $t \in [0, T]$ 上有 $M_2(t) < 0$ 且 $M_2'(t) > 0$.借助这些特征,进一步推演博弈模型中区域均衡策略的相关性质.在推论 1 的基础上可以得到,区域 i 的碳产出均衡策略 $e_i^*(t)$ 与碳吸收均衡策略 $u_i^*(t)$ 的增长率分别是

$$\begin{cases} \frac{de_i^*(t)}{dt} / e_i^*(t) = \frac{M_i'(t) - p'(t)}{p(t) - M_i(t)} \\ \frac{du_i^*(t)}{dt} / u_i^*(t) = \frac{-M_i'(t)}{[p(t) - b_i - M_i(t)]} \end{cases} \quad (15)$$

上式表明在非极限情景下如果想要 $e_i^*(t)$ 的增长率在时刻 t 开始负增长,需要满足的条件是 $M_i'(t) < p'(t)$,即 $M_i(t)$ 的变化率小于价格的波动率;而实现 $u_i^*(t)$ 在时刻 t 出现正增长的条件则是 $M_i'(t) < 0$,但是这与 $M_i'(t) > 0$ 矛盾.于是,降低 $M_i'(t)$ 的值是有效降低碳产出,缩减碳吸收下降力度的可靠途径.影响 $M_i'(t)$ 大小的因素有 $\delta_i, \varphi_i, \eta_i, r, \varphi_i$ 和 T .这些元素可划分为可控和不可控因素,其中参数 η_i 和 T 是可利用一定手段进行调控,称为可控因素.例如城市医疗水平,环保技术的发展与实际应用,环境自我防范意识可改变系数 η_i ;政策持续时间与关注力度可调控博弈时间 T .因此,针对 $M_i(t)$ 的二阶偏导数分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_1}{\partial t \partial \eta_1} &= -\eta_1^{-1} [\gamma_1(\lambda_1 + r)e^{(\lambda_1+r)(t-T)} + \gamma_2(\lambda_2 + r)e^{(\lambda_2+r)(t-T)}] > 0 \\ \frac{\partial^2 M_1}{\partial t \partial T} &= \gamma_1(\lambda_1 + r)^2 e^{(\lambda_1+r)(t-T)} + \gamma_2(\lambda_2 + r)^2 e^{(\lambda_2+r)(t-T)} < 0 \\ \frac{\partial^2 M_2}{\partial t \partial \eta_2} &= -\eta_2^{-1} [\xi_1(\lambda_1 + r)e^{(\lambda_1+r)(t-T)} + \xi_2(\lambda_2 + r)e^{(\lambda_2+r)(t-T)}] > 0 \\ \frac{\partial^2 M_2}{\partial t \partial T} &= \xi_1(\lambda_1 + r)^2 e^{(\lambda_1+r)(t-T)} + \xi_2(\lambda_2 + r)^2 e^{(\lambda_2+r)(t-T)} < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $\partial M_i / \partial T < 0, \partial M_i / \partial \eta_i < 0$,结合上述分析和式(16)的正负,得出推论 2.

推论 2 在分散决策模式下,环境损害系数

η_i 的增加有提升区域 i 碳产出均衡策略 $e_i^*(t)$, 降低碳吸收均衡策略 $u_i^*(t)$ 的增长率的风险; 然而, 提高博弈持续时间 T 必然降低区域 i 碳产出均衡策略 $e_i^*(t)$ 的增长率, 同时提高区域 i 碳吸收均衡策略 $u_i^*(t)$ 的增长率。

推论 2 表明在各区域分散且独立的决策模式下, 污染物存量对区域破坏水平的上升并不一定会降低其增加碳产出量、减少自身的碳吸收水平, 反而可能引发区域的碳净排放量的上升。背后的原因归结为, 尽管污染物存量上升对区域净收益的负面影响加大, 但边际效应是常数, 区域通过提高生产增加的收益来覆盖环境损失可能更有利的。于是区域自身碳减排的积极性被进一步消减。但是随着科技的进步以及居民自身环保意识的增强, 区域内同等污染物的存量对个体与环境的损害能够借助科技技术的进步和个体的谨慎防范所削弱。此外, 推论 2 也明确地给出了提高区域减排积极性的方法。延长博弈终止时间可以提高区域的碳吸收水平, 同时降低碳产出。但这需要相应的环境管理机构延长政策持续时间并保持监管力度, 同时关注企业的盈利与生存能力, 避免企业区域性破产引发博弈关系的终结。

鉴于价格对碳产出和吸收行动的影响是异向的, 价格的变化可以反应出各区域的碳减排水平。在分散决策模式下, 本文接下来探究其实现区域特定碳治理效果的具体条件。根据定理 1 和推论 1, 区域 i 的均衡策略随着价格变化的相图可以统一刻画于图 1 和图 2。

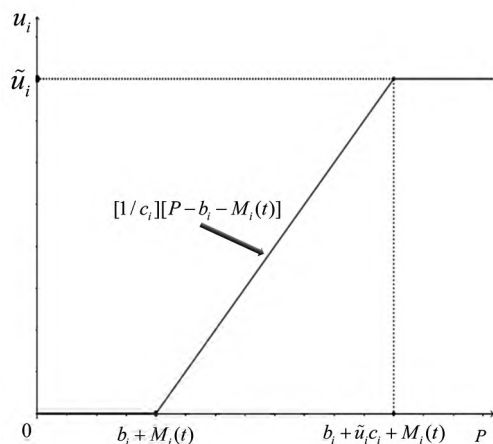


图 1 区域 i 的二氧化碳吸收量

Fig. 1 CO₂ uptake of region i

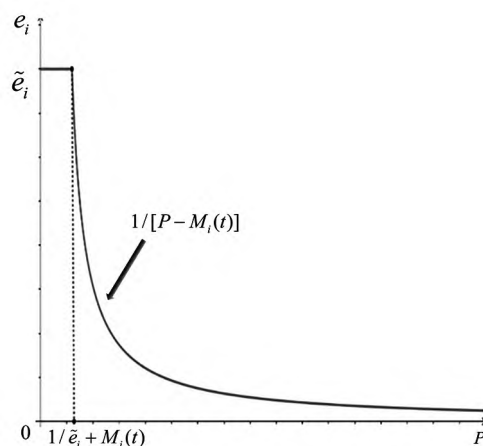


图 2 区域 i 的二氧化碳产出量

Fig. 2 CO₂ output of region i

从图 1 和图 2 可以看出, 随着价格的提高, 二氧化碳吸收与产出演化曲线必有一个交点。其次, 当价格 P 较低时, 区域自身对二氧化碳的吸收量为零, 而且产量为最高值。此时各地区没有任何实质性的减排行动, 碳交易市场出现“失活”现象。借此本文得到下面的推论 3。

推论 3 在分散决策情景下, 碳市场机制在区域 $i \in N$ 内避免“失活”的条件是碳市场交易价格 p 满足

$$p(t) > \min\{b_i, 1/\tilde{e}_i\} + M_i(t) \quad (17)$$

通过推论 3, 了解到在跨界碳污染动态博弈中双方进行分散决策时, 价格存在致使碳交易市场丧失激励作用的阈值条件。当价格低于阈值 $\min\{b_i, 1/\tilde{e}_i\} + M_i(t)$ 时, 碳交易市场引发的减排经济效益过低使得地区没有动力去实施碳减排措施(包括降低碳产出或者提高碳吸收)。式(17)表明当 b_i 和 $1/\tilde{e}_i$ 间最小值出现降低才能够减少碳市场“失活”的可能性。因为 $M_i(t)$ 是单调递增的, “失活”的阈值条件是逐渐上升的, 降低破坏系数 η_i 和提高 T 可延缓此过程。从另一个角度来看, 当阈值条件难以降低时, 尽管价格由市场供给影响, 但价格持续低于阈值时, 相关部门可以借助推论 3 适当提高碳交易价格, 发挥市场调控职能, 增强碳市场的市场活力。

近年来, 碳治理过程的一个重要目标是碳中和。碳中和指区域或者企业在特定时间内通过不同的形式吸收生产过程中产生的二氧化碳, 从而抵消自身产生的二氧化碳排放, 实现“零排放”。

绘制图 1 和图 2 中区域两均衡策略的演化曲线于图 3 中,发现均衡策略们的交叉点,标记为 A 点.

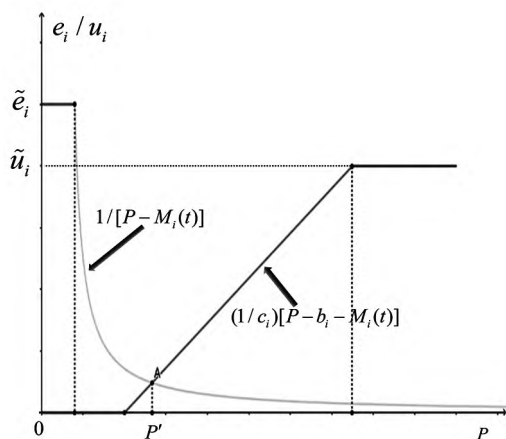


图 3 二氧化碳排放、吸收策略相图

Fig. 3 Phase diagram of regional CO₂ emission and absorption strategies

区域实现碳中和的途径由两种^[40-44]:一种是自身时刻处于碳排放与吸收均衡状态. 另一种是部分时期碳排放为主,其他时期以碳吸收为主,两者交替进行最终实现等值抵消. A 点正是区域自身碳吸收与碳产出量的等值点,与前面两种情况息息相关的. 这里称 A 点的价格是区域实现碳中和目标的转折点.

推论 4 在分散决策情景下,区域 i 实现碳中和目标关于碳市场交易价格的转折点 p' 是

$$p'(t) = \frac{b_i}{2} + \sqrt{\frac{b_i^2}{4} + c_i + M_i(t)} \quad (18)$$

当价格位于转折点处,区域内二氧化碳的产出量和吸收量恰好相等,是实现区域碳中和治理效果的重要节点. 推论 4 表明维护成本系数 b_i 和吸收成本系数 c_i 的下降会减少转折点 p' 的值,降低区域实现碳中和的市场条件. 考虑到 $M_i(t)$ 的存在,转折点是随时间而逐渐增大. 借助推论 4,区域可通过降低维护成本和碳吸收成本来推动碳中和目标的完成,另一方面第三方机构也可观察实际价格在转折点的波动情况来推测区域碳中和的完成情况.

3 集中决策模式下区域最优碳产出(吸收)策略分析

本节假设两个区域形成一个统一决策的联合

体,合称为联合区域. 它是以两区域折现收益之和最大化为决策目标,统一制定两区域的最优碳产出与吸收过程策略,该模式称为集中管理模式. 本节将建立集中管理模式下联合区域的最优控制模型,提供各个区域的最优碳产出和吸收过程策略,最终分析碳交互过程下集中管理模式的碳治理效果.

此时,联合区域在区间 $[0, T]$ 内的折现净效益是由区域 1 的碳产出与吸收策略, $e_1(t)$ 和 $u_1(t)$, 与区域 2 的碳产出与吸收策略, $e_2(t)$ 和 $u_2(t)$, 构成的目标泛函,结果如下所示

$$\begin{aligned} \Pi^c(t, x(t), \varphi(t)) = & e^{-rt} \{ \ln(\alpha_1 e_1(t)) + \\ & \ln(\alpha_2 e_2(t)) - \frac{c_1 u_1^2(t)}{2} - b_1 u_1(t) - \\ & \frac{c_2 u_2^2(t)}{2} - b_2 u_2(t) + p(\bar{E}_1 - e_1(t) + \\ & u_1(t)) + p(\bar{E}_2 - e_2(t) + u_2(t)) - \\ & \eta_1 x_1(t) - \eta_2 x_2(t) \} \quad (19) \end{aligned}$$

这里 $\Pi^c(\cdot)$ 是由两区域的折现收益之和所组成的联合区域收益函数,其中 $\varphi(\cdot) = (e_1(\cdot), u_1(\cdot), e_2(\cdot), u_2(\cdot))$. 类似地,为方便后续定义最优控制策略,这里对联合区域的决策变量可行范围给予具体形式.

定义 3 令

$$E_i = \{e_i(\cdot) \mid e_i(\cdot): [0, T] \mapsto \mathbb{R}, e_i(\cdot) \text{ 在 } [0, T] \text{ 上分段连续}, 0 \leq e_i(t) \leq \tilde{e}_i, t \in [0, T]\}$$

$$U_i = \{u_i(\cdot) \mid u_i(\cdot): [0, T] \mapsto \mathbb{R}, u_i(\cdot) \text{ 在 } [0, T] \text{ 上分段连续}, 0 \leq u_i(t) \leq \tilde{u}_i, t \in [0, T]\}, \\ i = 1, 2. \quad M^c = E_1 \times U_1 \times E_2 \times U_2, \quad M^c \text{ 称为联合区域的策略空间.}$$

定义 3 提供了联合区域的所有可行策略组成的集合,它需要从中寻找最优的策略使得联合区域效益函数最大化. 在定义 3 的基础上,集中管理情景下跨界碳交互控制模型也将就此建立.

联合区域的目标是在给定时间 $[0, T]$ 内寻求区域 1 和区域 2 的二氧化碳最优产出和吸收策略,使得两区域折现净收益之和最大化并满足碳跨界碳交互背景下双方碳存量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 交互影响的动力学方程约束. 因此集中管理模式下跨界碳交互最优控制模型表示为

$$\begin{aligned}
& \max_{\varphi \in M^c} \int_0^T e^{-rt} \{ \ln(\alpha_1 e_1(t)) + \ln(\alpha_2 e_2(t)) - \\
& \quad \frac{c_1 u_1^2(t)}{2} - b_1 u_1(t) - \frac{c_2 u_2^2(t)}{2} - b_2 u_2(t) + \\
& \quad p(\tilde{E}_1 - e_1(t) + u_1(t)) + p(\tilde{E}_2 - e_2(t) + \\
& \quad u_2(t)) - \eta_1 x_1(t) - \eta_2 x_2(t) \} dt \quad (20a) \\
& \text{s. t. } \begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = e_1(t) - u_1(t) - (\delta_1 + \varphi_1) x_1(t) + \\ \quad \varphi_2 x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = e_2(t) - u_2(t) - (\delta_2 + \varphi_2) x_2(t) + \\ \quad \varphi_1 x_1(t) \\ x_i(0) = x_0^i > 0, x_i(T) \text{ 是自由的} \\ 0 \leq e_i(t) \leq \tilde{e}_i, 0 \leq u_i(t) \leq \tilde{u}_i, i = 1, 2 \end{cases} \quad (20b)
\end{aligned}$$

上式的参数设定和式(8)是一致的. 根据最优控制理论, 接下来给出控制模型(20)的解概念以及具体解析表示. 其中包含区域 1 和区域 2 的最优碳产出和吸收策略, 分别标记为 $e_i^c(\cdot)$, $u_i^c(\cdot)$, $e_2^c(\cdot)$ 和 $u_2^c(\cdot)$, 即为 $\phi^* = (e_1^c(\cdot), u_1^c(\cdot), e_2^c(\cdot), u_2^c(\cdot))$. 在集中管理模式联合区域的最优控制策略被定义为

定义 4 称 $\phi^*(\cdot) = (e_1^c(\cdot), u_1^c(\cdot), e_2^c(\cdot), u_2^c(\cdot))$ 为控制问题(20)的最优控制策略, 如果这里存在函数 $\chi^c(t): [0, T] \rightarrow R^2$, 对于任意 $t \in [0, T]$ 满足

$$\begin{aligned}
\phi^*(t) &= \arg \max_{\phi \in M^c} \{ \Pi^c(t, x^*(t), \phi(t)) + \\
& \quad \chi^c(t) g(x^*(t), \phi(t)) \} \\
\dot{\chi}^c(t) &= - \frac{\partial}{\partial x^*} \{ \Pi^c(t, x^*(t), \phi^*(t)) + \\
& \quad \chi^c(t) g(x^*(t), \phi^*(t)) \}
\end{aligned}$$

且 $\chi^c(T) = 0$, 其中 $\dot{x}^*(t) = g(x^*(t), \phi^*(t))$, $x^*(T) = (x_0^1, x_0^2)$. 由定义 4 可知, 联合区域的最优控制策略是两区域可行策略组合中使得综合收益最高的方案. 基于当前概念, 求解出模型(20)中最优解的具体形式.

定理 2 在集中管理情景下令 $M_i^c(t) = \theta_1(1 - e^{(\lambda_1+r)(t-T)}) + \theta_2(1 - e^{(\lambda_2+r)(t-T)})$, 区域 1 和区域 2 的最优二氧化碳产出和吸收策略分别为

$$u_1^c = \begin{cases} \tilde{u}_1, p(t) > b_1 + \tilde{u}_1 c_1 + M_1^c(t), \\ 0, p(t) < b_1 + M_1^c(t), \\ (1/c_1)[p(t) - b_1 - M_1^c(t)], \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

$$e_1^c = \begin{cases} \tilde{e}_1, p(t) < 1/\tilde{e}_1 + M_1^c(t), \\ 1/[p(t) - M_1^c(t)], p(t) \geq 1/\tilde{e}_1 + M_1^c(t) \end{cases} \quad (22)$$

令 $M_2^c(t) = (\mu_1 - \lambda_1)\theta_1(1 - e^{(\lambda_1+r)(t-T)}) + (\mu_1 - \lambda_2) \times \theta_2(1 - e^{(\lambda_2+r)(t-T)})$, 有

$$u_2^c(t) = \begin{cases} \tilde{u}_2, p(t) > b_2 + \tilde{u}_2 c_2 + M_2^c(t), \\ 0, p(t) < b_2 + M_2^c(t), \\ (1/c_2)[p(t) - b_2 - M_2^c(t)], \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

$$e_2^c = \begin{cases} \tilde{e}_2, p(t) < 1/\tilde{e}_2 + M_2^c(t), \\ 1/[p(t) - M_2^c(t)], p(t) \geq 1/\tilde{e}_2 + M_2^c(t) \end{cases} \quad (24)$$

其中 $\theta_1 = [-\eta_1(\mu_1 - \lambda_2) + \eta_2 \varphi_1] / [(\lambda_1 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)]$, $\theta_2 = [\eta_1(\mu_1 - \lambda_1) - \eta_2 \varphi_1] / [(\lambda_2 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)]$.

定理 2 展示了集中管理情景下两区域的最优控制策略关于 p 的变化情况. 对比定理 1 和定理 2, 不难发现同一区域在不同模式下行动策略间的主要差异是 $M_i(t) \neq M_i^c(t)$, 其他性质类似. 针对非极限情景, 类似第二节, 本文有如下推论:

推论 5 在集中管理下: 1) 当 $b_i + M_i^c(t) \leq$

$p(t) \leq b_i + M_i^c(t) + c_i \tilde{u}_i$ 时, 两区域的二氧化碳最优吸收均衡策略 u_i^c 与 p 呈正比, 但与吸收成本系数 c_i 、维护成本系数 b_i 、各区域排放额度 \bar{E}_i 和 \bar{E}_{-i} 呈反比, 其中 $\partial u_i^c / \partial p = 1/c_i$, $\partial u_i^c / \partial b_i = -1/c_i$, $\partial u_i^c / \partial c_i = -[p(t) - b_i - M_i^c(t)]/c_i^2$, $\partial u_i^c / \partial \bar{E}_i = (\partial p / \partial \bar{E}_i) / c_i$; 2) 当 $p(t) \geq 1/\tilde{e}_i + M_i^c(t)$ 时, 区域的二氧化碳产出均衡策略 e_i^c 与价格成反比, 与各区域排放额度呈正比. 其中 $\partial e_i^c / \partial p = -1/[p(t) - M_i^c(t)]^2$, $\partial e_i^c / \partial \bar{E}_i = -(\partial p / \partial \bar{E}_i) / [p(t) - M_i^c(t)]^2$; 3) 区域 i 的碳产出均衡策略 e_i^c 关于时间 t 的变化率为 $[M_i^c(t) - p'(t)] / [p(t) - M_i^c(t)]^2$, 而碳吸收均衡策略 u_i^c 的变化率为 $-M_i^c(t) / c_i$.

对比推论 5 与推论 1 可知,如果从分散决策转为集中管理,碳市场价格、各区域排放额度和维护成本对 u_i^c 的边际影响不会被改变,但是吸收成本对 u_i^c 的边际影响、价格和排放额度对 e_i^c 的边际影响都将会随着 $M_i^c(t)$ 发生变化。

可见在跨界碳交互动态博弈中价格与排放额度对不同管理情景下区域的碳产出行为产生异质性影响.而且正如之前提到过的,如果对比同一区域在不同模式下行为策略的差异性,针对 $M_i^c(t)$ 的分析是十分重要的. $M_i^c(t)$ 关于时间的变化率为 $-\theta_1(\lambda_1 + r)e^{(\lambda_1+r)(t-T)} - \theta_2(\lambda_2 + r)e^{(\lambda_2+r)(t-T)}$,其中

$$\theta_1 = \frac{\eta_1(\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2/2} + (\mu_1 - \mu_2)/2) - \eta_2\varphi_1}{(\lambda_1 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}}$$

$$\theta_2 = \frac{\eta_1((\mu_1 - \mu_2)/2 - \sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2/2}) - \eta_2\varphi_1}{(\lambda_2 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \frac{(\mu_1 - \lambda_1)}{\varphi_1}\theta_1 = \frac{-(\mu_1 - \lambda_1)\eta_1(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1(\lambda_1 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{\eta_2(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)} \\ \frac{(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1}\theta_2 = \frac{\eta_1(\mu_1 - \lambda_1)(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1(\lambda_2 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{\eta_2(\mu_1 - \lambda_2)}{(\lambda_2 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)} \end{cases} \quad (26)$$

回顾第二节的条件,参数 θ_1 和参数 θ_2 的正负明显受 η_i 和 φ_i 之间的关系所影响, $i = 1, 2$. 这也是它与第二节中相关参数的不同之处.特别地,根据定理 1 和定理 2 的结果,同一区域在两种模式下碳产出和吸收策略的大小关系是由 $M_i^c(t)$ 和 $M_1(t)$, $M_2^c(t)$ 和 $M_2(t)$ 决定的.它们间的大小关系取决于下面系数之间的比较

$$\theta_1 - \gamma_1 = \frac{\eta_2\varphi_1}{(\lambda_1 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}}$$

$$\theta_2 - \gamma_2 = \frac{-\eta_2\varphi_1}{(\lambda_2 + r)\sqrt{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 4\varphi_1\varphi_2}} \quad (27)$$

$$\frac{(\mu_1 - \lambda_1)}{\varphi_1}\theta_1 - \xi_1 = \frac{-(\mu_1 - \lambda_1)\eta_1(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1(\lambda_1 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

$$\frac{(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1}\theta_2 - \xi_2 = \frac{\eta_1(\mu_1 - \lambda_1)(\mu_1 - \lambda_2)}{\varphi_1(\lambda_2 + r)(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

于是,对于 $\forall t \in [0, T]$ 有

$$\lim_{\eta_2 \rightarrow 0} (M_1(t) - M_1^c(t)) = 0, \lim_{\eta_1 \rightarrow 0} (M_2(t) - M_2^c(t)) = 0$$

因此得出下列推论:

推论 6 1) 当区域 2 的污染损害系数趋于零时,区域 1 在分散决策模式下的均衡策略与集中管理模式下的最优控制策略是等价的;而当区域 1 的污染损害系数趋于零时,区域 2 在分散决策模式下的均衡策略与集中管理模式下的最优控制策略是等价的.即

$$\lim_{\eta_2 \rightarrow 0} (e_1^*(t) - e_1^c(t)) = 0, \lim_{\eta_2 \rightarrow 0} (u_1^*(t) - u_1^c(t)) = 0,$$

$$\lim_{\eta_1 \rightarrow 0} (e_2^*(t) - e_2^c(t)) = 0, \lim_{\eta_1 \rightarrow 0} (u_2^*(t) - u_2^c(t)) = 0.$$

2) 当两区域的污染损害系数都不趋于零时,对于所有 $i = 1, 2$, 若 $\gamma_i > \theta_i$ 时,有 $e_i^* > e_i^c$ 且 $u_i^* < u_i^c$; 若 $\gamma_i \leq \theta_i$ 时,有 $e_i^* \leq e_i^c$ 且 $u_i^* \geq u_i^c$; 若 $\xi_i > (\mu_1 - \lambda_i)\theta_i$ 时,有 $e_i^* > e_i^c$ 且 $u_i^* < u_i^c$; 若 $\xi_i \leq (\mu_1 - \lambda_i)\theta_i$ 时,有 $e_i^* \leq e_i^c$ 且 $u_i^* \geq u_i^c$.

推论 6 中的 1) 表明,当一方几乎不受环境恶化的影响或者一方被认为不在乎环境损失时,那么另一方将会在分散决策下采用与集中管理模式一致的行为策略(包含碳产出和碳吸收策略).此时尽管在分散决策中是以自身收益最大化为目标的,但是结果与整体收益最大化是一样的.该结论的背后是因为特定条件下, $M_i(t) = M_i^c(t)$. 当 η_1 趋近于零时, $M_1(t)$ 的值等价于 $M_1^c(t)$; 当 η_2 趋向于零时, $M_2(t)$ 的值等价于 $M_2^c(t)$. 当两区域都对污染损害敏感时,推论 6 中的 2) 纵向对比了同一区域在不同模式下碳产出或吸收策略的大小关系,提供不同模式间碳产出与吸收策略的占优条件.在集中管理模式下,接下来继续探究实现区域特定碳治理效果的价格阈值条件.

推论 7 在集中管理模式,碳交易市场在区域 i 内避免“失活”的条件是碳交易价格 p 满足

$$p(t) > \min\{b_i, 1/\tilde{e}_i\} + M_i^c(t) \quad (28)$$

推论 8 在集中管理模式,区域 i 内实现碳中和目标关于碳排放交易价格的转折点 p' 是

$$p'(t) = \frac{b_i}{2} + \sqrt{\frac{b_i^2}{4} + c_i + M_i^c(t)} \quad (29)$$

推论 7 和推论 8 给出了集中管理模式下避免市场失活的条件与转折点.该结果与分散决策下的

结论差异在于 $M_i^c(t) \neq M_i(t)$. 背后的启示与推论 3 和推论 4 是类似的. 因此推论 7 和推论 8 可帮助管理部门在集中管理情景下发挥碳市场调控作用, 借助交易价格来观察和改善各区域碳减排效果.

4 区域管理策略与碳存量的演化分析

为研究各区域的二氧化碳产出、吸收过程策略和碳存量在不同模式的具体演变情况, 验证交易价格对区域二氧化碳存量的实质影响, 针对模型所得的过程策略和碳存量的演变动力系统进行了数值实验.

4.1 参数赋值

本文所需模型参数按照如下. 考虑到不同区域间的异质性因素, 假设区域 1 为受跨界污染影响经济损失较大的一方, 区域 2 属于经济损失较小的一方. 具体为 $\eta_1 = 0.15$, $\eta_2 = 0.1$, $\varphi_1 = 0.2$, $\varphi_2 = 0.3$, $c_1 = 0.7$, $c_2 = 0.4$, $b_1 = 0.8$, $b_2 = 1$, $r = 0.07$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 3$, $\delta_1 = 0.025$, $\delta_2 = 0.02$, $p = 0.3$, $x_1^0 = 30$, $x_2^0 = 30$, $\tilde{e}_1 = 5$, $\tilde{e}_2 = 20$, $\tilde{u}_1 = 4$, $\tilde{u}_2 = 10$, $T = 70$.

4.2 两区域的碳管理策略演化分析

将上述参数代入到分散决策和集中管理情境下获得的定理 1 和定理 2 中, 可以模拟出两区域的二氧化碳最优产出、吸收量随时间的演化路径, 演化结果见图 4 ~ 图 7.

图 4 和图 5 显示在集中管理和分散决策情景下, 两区域的瞬时产出量在前中期都是保持稳定, 后期迅速升高. 不同之处是在图 4 的前中期, 区域 1 在集中管理情景中二氧化碳瞬时产出量比分散决策情景中的产出量要高一些. 这表明集中管理情景会缓和其碳减排的压力, 允许受跨界污染影响大的区域提高二氧化碳产出量.

图 5 反映区域 2 在集中管理情景下的产出量都远小于其在分散决策下的产出量. 这表明集中管理情景推动受跨界污染影响小的一方大幅降低二氧化碳的产出量, 让其承担更高的减排任务. 通过图 4 和图 5 的变化幅度来看, 相较于分散决策,

在集中管理下两区域的综合碳排放是减少的. 由此可见跨界污染影响小的区域始终是污染主要排放方, 但集中管理模式会加大该地的减排要求, 减轻另一方的减排压力, 且综合治理效果更好.

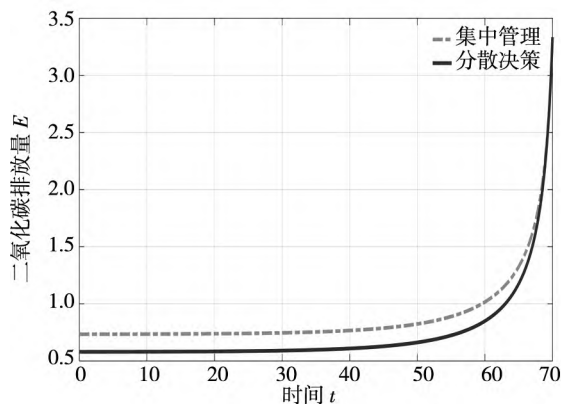


图 4 区域 1 的二氧化碳产出量

Fig. 4 CO₂ output of region 1

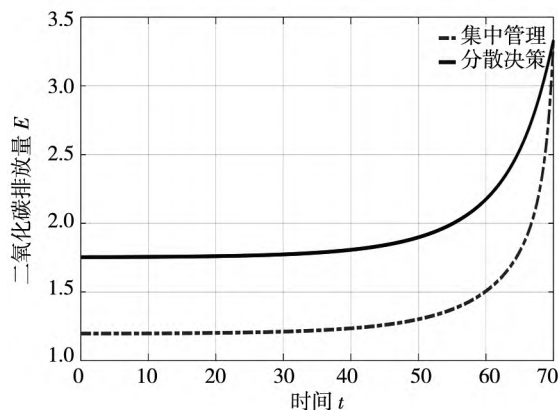


图 5 区域 2 的二氧化碳产出量

Fig. 5 CO₂ output of region 2

图 6 所示, 区域 1 的吸收量在演化前期以缓慢的速度下降, 在后期迅速下降至零. 当对比集中管理和分散决策情景下碳瞬时吸收策略时, 本文发现前者的吸收量是低于后者的. 这表明集中管理场景下受跨界污染影响大的区域将减少对区域内二氧化碳的吸收任务. 在图 7 中, 无论是在集中管理还是分散决策情景, 区域 2 的二氧化碳吸收量都为零. 这表示在当前价格下并没有足够动力来驱使受跨界污染影响小的区域采取二氧化碳吸收行动. 因此集中管理情景会降低受跨界碳损害影响小的区域的碳吸收要求, 但并不一定会改善受污染影响大的区域对碳吸收的行动态度.

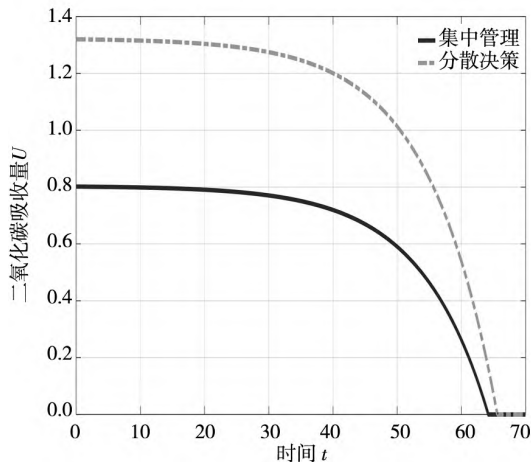


图 6 区域 1 的二氧化碳吸收量
Fig. 6 CO₂ uptake of region 1

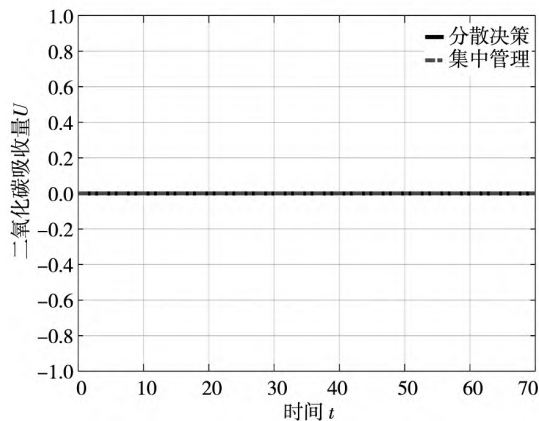


图 7 区域 2 的二氧化碳吸收量
Fig. 7 CO₂ uptake of region 2

4.3 两区域碳存量的演化分析

针对式(5)采用数值迭代方法,两区域的污染物存量的数值逼近形式符合下式

$$\begin{cases} x_1(t + \Delta t) = x_1(t) + [e_1(t) - u_1(t) - (\delta_1 + \phi_1)x_1 + \phi_2x_2]\Delta t \\ x_2(t + \Delta t) = x_2(t) + [e_2(t) - u_2(t) - (\delta_2 + \phi_2)x_2 + \phi_1x_1]\Delta t \\ x_1(0) = x_0^1 > 0, \\ x_2(0) = x_0^2 > 0 \end{cases} \quad (30)$$

其中 Δt 代表时间间隔,设 $\Delta t = 0.001$.

为模拟外界随机因素对两区域内污染存量的干扰,本文另外在迭代式的右端分别加入了随机扰动项: $\sigma_i \sqrt{x_i} \sqrt{\Delta t} \zeta_i(t)$. 参数 σ_i 表示区域 i 的扰动因子,设 $\sigma_1 = 3, \sigma_2 = 4$. $\zeta_i(t)$ 代表标准正态分布,且 $\zeta_1(t)$ 和 $\zeta_2(t)$ 是互相独立的.

为探究价格对各区域在不同情景下二氧化碳存量演化轨迹的影响,这里将 p 分别设置在 0.3, 0.5, 0.7 和 0.9 下进行仿真. 结果见图 8 和图 9.

图 8(a) 显示碳市场交易价格 $p = 0.3$ 时,两曲线在演化前中期内二氧化碳瞬时存量值保持相对稳定状态,到博弈后期迅速升高. 在分散决策模式下二氧化碳的瞬时存量在前中期比集中管理下的数值要高,但后期两者上升趋于一致.

在图 8(b) 中,当价格升高 0.2 后,集中管理和分散决策模式下碳存量演变趋势都呈现出 U 型特征,即在初期开始下降,在中期到达最低点后逐渐上升. 相比图 8(a),同一情景下价格升高后区域 1 的二氧化碳瞬时存量明显是更低的. 此外在集中管理下区域 1 的二氧化碳瞬时存量恒高于分散决策下的瞬时存量.

当把价格再次调高 0.2 时,如图 8(c) 所示,区域 1 的二氧化碳的瞬时存量相较前两者更小. 值得注意的是在集中管理下区域 1 的二氧化碳存量在博弈中后期时间内低于分散管理的存量. 当 $p = 0.9$ 时,图 8(d) 显示区域 1 内二氧化碳存量的下降趋势更为直接,在最低点到达零且持续了一段时间. 根据图 8,不难看出价格的升高是可以明显降低区域 1 的二氧化碳瞬时存量. 此外价格也影响分散决策和集中管理情景对区域碳治理效果的占优情况. 具体表现为当交易价格较低时它在集中管理下的碳治理效果好,但价格较高后则是分散决策下的碳治理效果更好.

图 9(a) 表示在 $p = 0.3$ 时,整个演化时间内区域 2 在集中管理情景下二氧化碳的存量接近于分散决策下的存量. 当价格提高至 $p = 0.5$ 后,图 9(b) 显示在任意时刻,二氧化碳的瞬时存量变得更低. 演化前期,区域 2 的二氧化碳瞬时存量在两种情景下差别不大,但在中后期集中管理下的二氧化碳瞬时存量会更低. 图 9(c) 展现了 $p = 0.7$ 处,区域 2 在两场景下的瞬时二氧化碳存量更低,而且区域 2 在分散决策下二氧化碳存量相比集中管理是更低的. 当交易价格升高至 $p = 0.9$,图 9(d) 再次显示出与图 9(c) 相似的结论. 如果价格继续升高后,区域 2 在分散决策下二氧化碳存量最先达到零值.

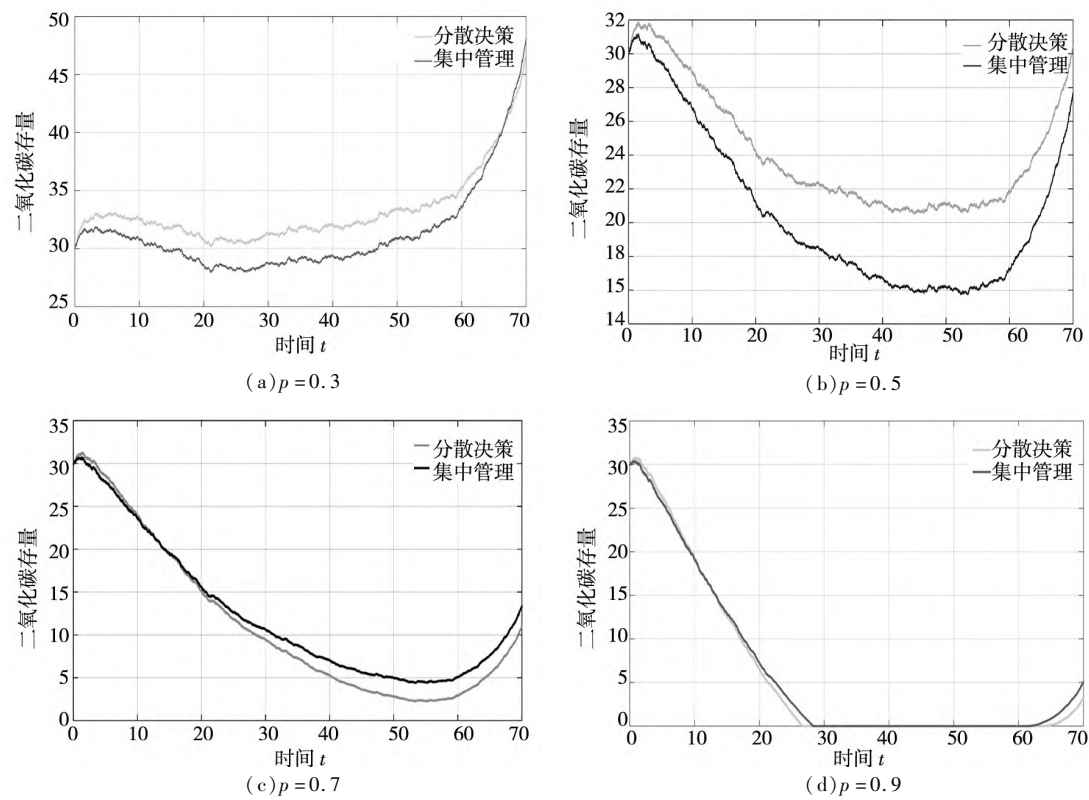


图 8 不同价格下区域 1 的二氧化碳存量演化路径

Fig. 8 Evolutionary paths of CO₂ stock of region 1 at different prices

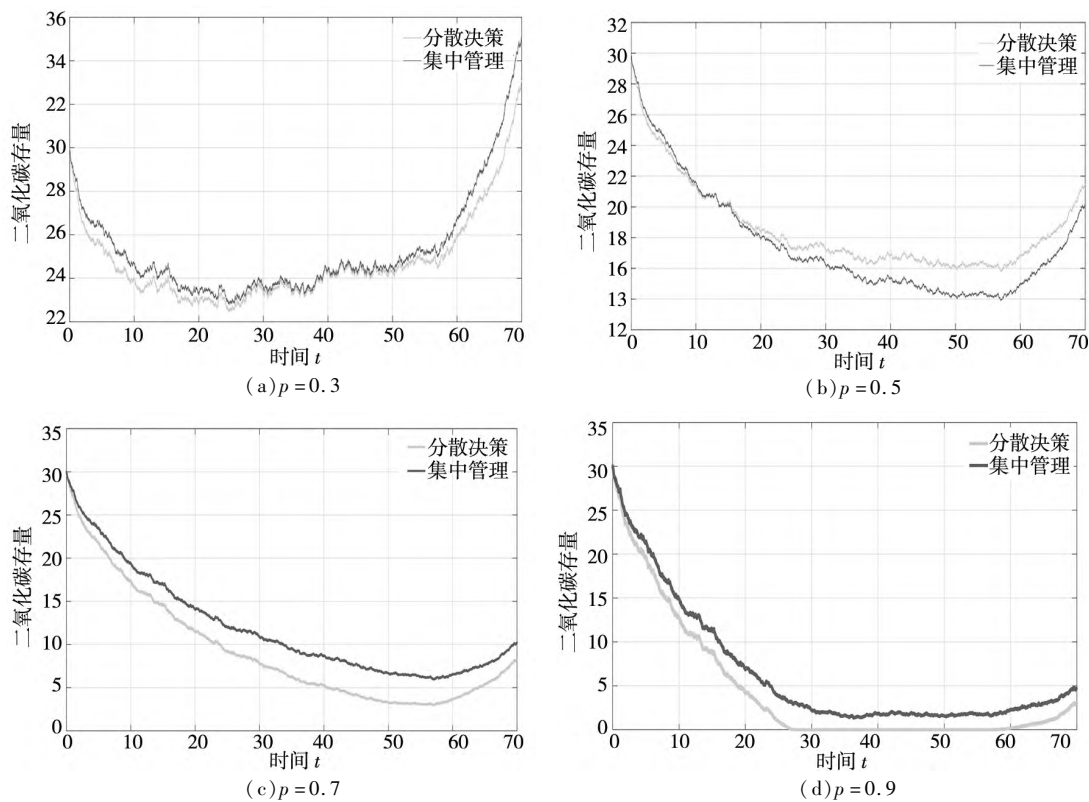


图 9 不同价格下区域 2 的二氧化碳存量演化轨迹

Fig. 9 Evolutionary paths of CO₂ stock of region 2 at different prices

图9同样表明了随着交易价格的升高,区域2的二氧化碳存量在两种模式下都会明显降低.其次该地的价格存在一个临界点,价格较低时,集中管理情景下区域2的碳治理效果最好;当价格较高则结论正好与之相反.

5 结束语

基于区域间的跨界碳交互动态演化过程,本文在碳市场背景下构建了分散决策模式下的两区域碳减排微分博弈模型,以及集中管理模式下的区域碳减排最优控制模型.模型的决策变量是具有限制性约束条件的碳产出与吸收策略,状态约束则是由两区域的碳存量演化系统构建而成.本文探究了在碳市场机制下两区域的碳产出与吸收策略的特性、影响因素及其增长机制,随后确定了各区域维护碳市场活力和促进碳中和实现的价格阈值条件.最后借助数值实验刻画了各个区域内不同策略及其碳存量在市场价格条件下随时间的演化情况,从而分析出碳市场影响下异质性区域在碳管理策略和碳治理效果的差异性.

研究表明:第一,理论与实验方面双重验证了市场交易价格能够调控跨界碳交互过程中各个区域的减排积极性,显著影响着区域内碳存有量.值得注意的是价格呈现出在不同模式下改变区域减排效果占优的能力.具体地,当交易价格较低时,集中管理情景下区域内二氧化碳的瞬时存量是最低的,即集中管理模式的区域减排效果较好;但当交易价格较高时,分散决策情景下二氧化碳的瞬时存量反而更低,此时分散决策反而更利于各地二氧化碳的减排治理;第二,在分散决策模式下,碳存量破坏水平的升高在碳减排效果上并不是完全积极的.但提高博弈持续时间能够降低区域碳产出策略的增长率,且弱化石吸收策略的衰减力度.当对方的污染物破坏能力趋于零时,该方

在分散决策和集中管理模式的行为策略是一致的.此时可以认为当另一方几乎不关心污染物的损害时,此时该区域独立采取的碳减排策略与集中管理模式是一样的;第三,相比分散决策,集中管理会缓解受跨界碳损害影响大的区域的减排压力,并部分转移至影响小的区域.前者可以适当增加碳产出,减少碳吸收来提高收益.后者则需要降低碳产出从而减少自身的净排放量.

本文凭借理论和实验两个角度来分析了不同区域在跨界碳交互过程中的策略倾向及其特性.环境管理与决策部门能够根据所得推论结果,利用碳交易价格的变化来预测各地碳减排实施效果,为区域跨界碳交互下减排和碳中和效果的实现提供管理时机.本文建议:1)根据碳市场价格调整跨界碳交互管理模式.基于碳交易价格的高低,部门也可有方向地推动更有效的区域碳减排的管理模式,即当价格长期处于低位时,推动集中管理模式的形成可以形成更高效的减排效果,反之则分散决策模式是更优;2)在社会层面,应适当提高公众环境防范意识、家庭对污染的自处理与检测能力.在企业层面,提升环保政策持续时间,保持污染规制行为的长期关注.这些措施能够降低各区域的碳产出的增长率,缩小企业碳吸收的下降幅度,进而提高区域实际碳减排效果;3)当污染下游等受跨界污染影响较大的区域面临着难以承担的经济增长与减排双重压力时,可以选择集中管理模式来缓解其窘迫.集中管理模式可以明显提高上游的治理行动,缩小跨界污染传输部分,使得下游区域减排压力变小并适当倾向当地经济发展.

局限与可能发展:文中仅涉及两个区域组成跨界碳交互微分博弈问题;何种措施或者因素可以在一般条件下保持低成本的同时也能促使分散决策模式下区域碳治理效果趋向集中决策模式下的效果是值得进一步研究的问题.

参 考 文 献:

- [1] Wang Yongpeng, Yan Qing, Yang Jieru, et al. Can inter-provincial transmission reduce regional carbon emissions? Evidence

- from China[J]. Energy Policy, 2024, (184): 113915.
- [2] 王 斌, 傅 强. 电网拓扑结构引致二氧化碳减排的空间溢出机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 77–85.
- Wang Bin, Fu Qiang. The spatial spillover mechanism of carbon dioxide emission reduction caused by electric power grid topology construction[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 77–85. (in Chinese)
- [3] 陶 然, 陆 曦, 苏福兵, 等. 地区竞争格局演变下的中国转轨财政激励和发展模式反思[J]. 经济研究, 2009, 44(7): 21–33.
- Tao Ran, Lu Xi, Su Fubing, et al. China's transition and development model under evolving regional competition patterns[J]. Economic Research Journal, 2009, 44(7): 21–33. (in Chinese)
- [4] 程粟粟, 易永锡, 李寿德. 碳捕获与碳封存机制下跨界污染控制微分博弈[J]. 系统管理学报, 2019, 28(5): 864–872.
- Cheng Susu, Ying Yongxi, Li Shoude. A differential game of transboundary pollution for carbon capture and storage[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(5): 864–872. (in Chinese)
- [5] 张 明, 薛林昭, 王文文. 排放权交易与竞争机制下跨界污染控制策略研究[EB/OL]. 中国管理科学: 1–24[2023–10–29]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0960>.
- Zhang Ming, Xue Linzhao, Wang Wenwen. Study on transboundary pollution control strategy under emission trading and competition mechanism[EB/OL]. Chinese Journal of Management Science: 1–24[2023–10–29]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0960>. (in Chinese)
- [6] 李 丁, 张 艳, 马 双, 等. 大气污染的劳动力区域再配置效应和存量效应[J]. 经济研究, 2021, 56(5): 127–141.
- Li Ding, Zhang Yan, Ma Shuang, et al. The regional relocation effect and the stock effect on labors of air pollution[J]. Economic Research Journal, 2021, 56(5): 127–141. (in Chinese)
- [7] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010, 45(8): 66–78.
- Lin Boqiang, Liu Xiyang. China's carbon dioxide emissions under the urbanization process: Influence factors and abatement policies[J]. Economic Research Journal, 2010, 45(8): 66–78. (in Chinese)
- [8] 赵 阳, 沈洪涛, 刘 乾. 中国的边界污染治理—基于环保督察中心试点和微观企业排放的经验证据[J]. 经济研究, 2021, 56(7): 113–126.
- Zhao Yang, Shen Hongtao, Liu Qian. Border pollution governance in China: Evidence from the pilot project of environmental protection supervision center and establishment emission data[J]. Economic Research Journal, 2021, 56(7): 113–126. (in Chinese)
- [9] 中国政府网. 共治跨界污染共答“双碳”命题——成渝地区生态共建环境共保的破题思路[EB/OL]. (2021–11–30)[2023–10–28]. http://www.cq.gov.cn/zt/cydcscjjq/chscjihjjq/202111/t20211130_10056096.html.
- China Government Website. Jointly controlling transboundary pollution and jointly answering the proposition of “double carbon”—the breakthrough idea of ecological co-construction and environmental co-protection in Chengdu-Chongqing area[EB/OL]. (2021–11–30)[2023–10–28]. http://www.cq.gov.cn/zt/cydcscjjq/chscjihjjq/202111/t20211130_10056096.html. (in Chinese)
- [10] 人民网. 推动环境协同治理共同建设绿色美丽长江三角洲——解读《长江三角洲区域生态环境共同保护规划》[EB/OL]. (2021–1–15)[2023–10–28]. <http://env.people.com.cn/n1/2021/0115/c1010-32001120.html>.
- People's Website. Promoting coordinated environmental governance and jointly building a green and beautiful Yangtze River Delta: Interpretation of the Yangtze River Delta Regional Ecological Environment Protection Plan[EB/OL]. (2021–1–15)[2023–10–28]. <http://env.people.com.cn/n1/2021/0115/c1010-32001120.html>. (in Chinese)
- [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)
- [12] 朱帮助, 黄丽清, 江民星, 等. 配额分配对跨期碳市场有效性的影响研究[J]. 管理科学学报, 2022, 25(9): 52–65.
- Zhu Bangzhu, Huang Liqing, Jiang Minxing, et al. The impact of permit allocation on intertemporal carbon market efficiency[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(9): 52–65. (in Chinese)
- [13] Jiang M X, Yang D X, Chen Z Y, et al. Market power in auction and efficiency in emission permits allocation[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 183(3): 576–584.
- [14] 涂正革, 谌仁俊. 排污权交易机制在中国能否实现波特效应? [J]. 经济研究, 2015, 50(7): 160–173.
- Tu Zhengge, Shen Renjun. Can a cap-and-trade scheme achieve Porter Effect in China? [J]. Economic Research Journal, 2015, 50(7): 160–173. (in Chinese)
- [15] Monica B, Frabcesco G. Electricity pricing under “carbon emissions trading”: A dominant firm with competitive fringe model[J]. Energy Policy, 2007, 35(8): 4200–4220.
- [16] Damien D, Philippe Q. European emission trading scheme and competitiveness: A case study on the iron and steel industry [J]. Energy Economics, 2007, 30(4): 9–27.
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] Anand K S, Giraud-Carrier F C. Pollution regulation of competitive markets[J]. Management Science, 2020, (66): 1–31.
- [19] Boucekkin R, Fabbri G, Federico S, et al. From firm to global-level pollution control: The case of transboundary pollution [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 190(1): 331–345.
- [20] Chen Y, Dou S D X. The effectiveness of eco-compensation in environmental protection-A hybrid of the government and market[J]. Journal of Environmental Management, 2021, (280): 1–11.
- [21] 黄彬彬, 王先甲, 桂发亮, 等. 不完备信息下生态补偿中主客体的两阶段动态博弈[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2419–2424.
- Huang Binbin, Wang Xianjia, Gui Faliang, et al. The two-stage dynamic game of subject and object in ecological compensation under incomplete information[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(12): 2419–2424. (in Chinese)
- [22] Li L, Chen W. The impact of subsidies in a transboundary pollution game with myopic players[J]. Omega, 2021, (103): 1–10.
- [23] 姜 珂, 游达明. 基于区域生态补偿的跨界污染治理微分对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 19(1): 135–143.
- Jiang Ke, You Daming. Study on differential game of transboundary pollution control under regional ecological compensation [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 19(1): 135–143. (in Chinese)
- [24] 赵来军. 湖泊流域跨界水污染转移税协调模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 364–370.
- Zhao Laijun. Harmonizing model with transfer tax on the transboundary pollution of air[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(2): 364–370. (in Chinese)
- [25] Petrosjan L, Zaccour G. Time-consistent shapley value allocation of pollution cost reduction[J]. Journal of Economic Dynamic & Control, 2003, 27(3): 381–398.
- [26] Folmer H. The need for cooperation on international environmental problems[J]. Environmental and Resource Economics, 1993, 3(4): 313–335.

- [27] Fernandez L. Trade's dynamic solutions to transboundary pollution[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2002, (43): 386–411.
- [28] 陈 龙. 基于排放权交易的流域跨界污染控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Chen Long. Research on the Transboundary Pollution Control Strategy under the Emission Trading System[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [29] Atar R, Cohen A. A differential game for a multiclass queueing model in the moderate-deviation heavy-traffic regime[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2016, 41(4): 1354–1380.
- [30] Li S. A differential game of transboundary industrial pollution with emission permits trading[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2014, 163(2): 642–659.
- [31] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 53–65.
Xu ChunQiu, Zhao Daozhi, Yuan Baiyun, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 53–65. (in Chinese)
- [32] Bertinelli L, Camacho C, Zou B. Carbon capture and storage and transboundary pollution: A differential game approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(2): 721–728.
- [33] Bencheikroun H, Martín-Herrón G. The impact of foresight in a transboundary pollution game[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 300–309.
- [34] 申成然, 熊中楷. 碳排放约束下制造商再制造决策研究[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(4): 537–549.
Shen Chengran, Xiong Zhongkai. Production decisions of the manufacturing under carbon emission constraint[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(4): 537–549. (in Chinese)
- [35] Cachon G P. Retail store density and the cost of greenhouse gas emission[J]. *Management Science*, 2014, 60(8): 1907–1925.
- [36] Sedakov A, Qiao H, Wang S. A model of river pollution as a dynamic game with network externalities[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(3): 1136–1153.
- [37] Breton M, Sokri A, Zaccour G. Incentive equilibrium in an overlapping generations environmental game[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(2): 687–699.
- [38] Xia L, Bai Y, Ghose S, et al. Differential game analysis of carbon emissions reduction and promotion in a sustainable supply chain considering social preferences[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, (310): 1–36.
- [39] Ma X, Zhao Y, Luo Q, et al. Preservation technology investment and carbon abatement strategies in a supplier-retailer cold chain based on a differential game[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, (172): 108540.
- [40] Li S, Jia N, Chen Z, et al. Multi-objective optimization of environmental tax for mitigating air pollution and greenhouse gas[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2022, 7(3): 473–488.
- [41] Lin B, Liu Z. Could coal-fired power plants with CCS be an effective way for carbon neutrality in China? [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2024, 9(4): 461–473.
- [42] 石 平, 韩 坤, 后 锐. 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担契约[J]. *管理科学学报*, 2024, 27(12): 57–81.
Shi Ping, Han Kun, Hou Rui. Co-op advertising and carbon emission reduction cost-sharing contracts in coordinating supply chain with reciprocal behavior under cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(12): 57–81. (in Chinese)
- [43] 杜兴强, 张心舒, 谢裕慧, 等. 碳排放权交易能否促进企业节能减排? ——基于碳排放权交易试点政策的一项准自然实验[J]. *管理科学学报*, 2025, 28(7): 22–38.
Du Xingqiang, Zhang Xinshu, Xie Yuhui, et al. Does carbon emission trading promote corporate energy conservation and emission reduction?: Evidence from a quasi-natural experiment based on the pilot policy of carbon emission trading[J].

Journal of Management Sciences in China, 2025, 28(7): 22–38. (in Chinese)

[44] 陈诗一, 王 畅, 郭 越. 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择[J]. 管理科学学报, 2024, 27(4): 1–20.

Chen Shiyi, Wang Chang, Guo Yue. Strategic measures and pathway towards China's industrial carbon neutrality[J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, 27(4): 1–20.

Strategy analysis and carbon market influence under the interregional carbon interaction process

WANG Xian-jia¹, XUE Lin-zhao^{1, 2*}, WANG Can¹, WANG Lin-lin¹

1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Climate and Energy Sustainable Development, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266044, China

Abstract: The fluidity of carbon dioxide leads to cross-border carbon exchange. This paper explores decentralized decision-making and centralized management modes for regional carbon managing strategy under carbon market mechanisms. The evolutionary trends and impact of management strategies on each region are explored, and market conditions for achieving specific carbon governance effects in regions are analyzed. The results demonstrate that 1) carbon market price fluctuations have a significant regulatory effect on regional carbon stocks and emission reduction behavior, and can affect the dominant characteristics of regional emission reduction effects under the two modes. 2) Increasing the duration of the game can significantly reduce the growth rate of regional carbon production and control the downward trend of regional carbon absorption. Moreover, when one party almost ignores the local pollution level, the carbon management strategies of the other party are consistent under the two modes. 3) The dual pressures faced by downstream regions regarding carbon emission reduction and economic growth can be effectively alleviated under the centralized management mode. The conclusion of this paper provides policy suggestions for regions to formulate emission management strategies and to guide efficient governance of interactive carbon pollution in cross-border carbon pollution processes.

Key words: transboundary carbon interaction; carbon market; decentralized decision-making and centralized management models; regional management strategy; differential game