

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.09.008

多效应下全球气候联盟稳定性的博弈分析^①

张中祥¹, 张钟毓^{2*}

(1. 天津大学马寅初经济学院, 天津 300072; 2. 天津财经大学金融学院, 天津 300222)

摘要: 如何建立一个广泛参与、稳定的、减排效果显著的全球气候联盟一直是国际社会急需解决的问题。本研究将气候联盟模型分解为外部效应、时间效应和成本效应, 分别在对称和非对称条件下, 对比研究了不合作、完全合作、库诺特联盟两阶段静态博弈和斯坦克尔伯格联盟三阶段动态博弈的减排结果, 并通过模拟确定了稳定的联盟规模。研究发现: 联盟的外部效应的正向作用和时间效应的负向作用在一定情况下会相互抵消或占优。当成本收益比接近0时, 联盟的净收益会较小, 此时时间效应占优, 领导者会减少自身减排量, 诱导追随者增加减排量, 如此会吸引更多的参与者, 最终形成稳定的大联盟, 从而解释了“合作悖论”。成本效应源于不对称国家的出现, 使外部效应不再是严格的正向作用, 并产生了交易转让的需求。对于高收益且低成本的国家, 时间效应的影响最大; 对于高收益且高成本的国家, 成本效应的影响最大。通过模拟发现, 当成本和收益呈现负协方差的偏态分布时, 非对称性越明显越有利于联盟的稳定和减排效果。

关键词: 气候联盟; 稳定性; 非对称; 动态博弈

中图分类号: F114.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)09-0124-21

0 引言

全球气候变化正在给世界各国带来严重的损失,《2022年全球风险报告》将“气候行动失败”列为世界头号长期威胁和未来十年影响最严重的风险^[1]。渐进式减排的时间窗口已经错过,联合国环境规划署(UNEP)最新发布的《2022年排放差距报告》指出,为了到2030年将全球温升控制在2℃以下,需要在当前的政策情境下实现30%的温室气体减排,各国要在8年内完成经济和社会的快速转型,不然将导致本世纪末至少升温2.8℃^[2]。

当前日趋复杂的国际气候变化谈判格局,以及在公平性和约束力等方面仍然存在缺陷的全球气候治理体系是导致各国减排行动进展缓慢的原

因之一。即便各方力量已经进行了30多年漫长而艰难的国际气候谈判^[3],但事实证明,无论是按照《京都议定书》“自上而下”的强制减排模式,还是按照《巴黎协定》“自下而上”的自主贡献模式,都无法有效提高全球减排量^[4-6]。

不仅如此,某些缔约国还多次出尔反尔宣布退出全球气候协定,反观其它一些双边或多边的小型联盟却更加稳定。这种现象最早被Barrett Scott^[7]定义为“合作悖论”：“要么自我执行的国际环境协定规模较大,但与不合作相比,合作增加的收益较小;要么规模较小,无法取得多大成果”。因此,从理论角度改进“合作悖论”存在很大的现实意义和政策价值,迫切需要建立一个兼具稳定、成员多、减排收益高、减排效果显著的全球气候联盟。

① 收稿日期: 2021-07-01; 修订日期: 2023-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(71690243)。

通讯作者: 张钟毓(1991—), 女, 山东临沂人, 博士, 讲师。Email: zhangzhongyu@tjufe.edu.cn

通过国际合作应对全球气候变化有其扎实的经济理论基础。由于气候资源或者温室气体排放空间具有“全球公共物品”的属性,无度的使用和消耗会引发“公地悲剧”。这种过度排放带来的外部性,不仅没有使责任人对后果付出相应的代价,也没有使治理人因节约和保护而获得相应的回报,从而引起个体利益与集体利益发生冲突。每个个体都不想自愿采取行动去实现集团共同利益,只想“搭便车”和不劳而获,进而导致集体行动陷入困境。此时,各国市场和政府在应对全球气候变化时同时失灵^[8],更大范围的国际合作与全球气候治理^[9]机构和体系应运而生,其中有效的措施就是进行选择性的激励。发展至今,全球气候治理已经成为人类发展的重要议题和凝聚国际合作的关键领域,被称为“全球治理的一面镜子”,也是国家治理体系和治理能力现代化中的新兴主题。

为研究这种新的经济现象和问题,博弈论方法有其独有的优势和特点。作为研究冲突情况下理性行为的有效分析工具,博弈论基于对参与者偏好的行为假设来研究参与者之间相互作用,并运用各种均衡概念来预测这些相互作用的结果;与实证研究不同,它更注重从逻辑性方面找出最佳的规则和较优的程序,回答了“应该怎样”的问题。Zhang 和 Liang^[10]采用文献计量分析法,借助 Web of Science 数据库,收集了截至 2020 年前的 694 篇关于减缓气候变化合作有效文献,发现最常用的研究方法是博弈论模型、综合评估模型(IAM)和可计算一般均衡模型(CGE)。

关于联盟稳定性的博弈研究,早期的假设通常是从相同(对称)参与者开始,这导致对加强国际环境问题合作的自我执行协议的评估往往很悲观。Carraro 和 Siniscalco^[11]在他们开创性的论文中发现,稳定的联盟通常规模较小。之后在 Barrett^[7]的模型中证明,稳定的联盟可以很大,但只有在合作的收益很小的情况下才成立。随后 Finus^[12]、Eyckmans^[13]、Benckroun 和 Long^[14]等一些研究都尝试提出解决这一困境的方法。

近期研究在加入了非对称特征之后发现,由于各国存在减排收益和成本的巨大差异,一旦收益低于公平分配时的水平,那么这类国家就会有动机离开联盟,这就意味着,在没有转移的情况

下,非对称的联盟更小^[15],被称为“联盟的民间定理”(coalition folk-theorem)。Pavlova 和 de Zeeuw^[16]通过设定两种类型的国家,得出非对称可以促进边际效益相对较高、边际环境损害相对较低的国家组成稳定的大型联盟,但这种稳定联盟几乎不会增加共同收益,因此作者建议,与无关紧要的国家建立一个大型的稳定联盟,不如与重要的国家建立一个稳定的小联盟。最近 Finus 通过综述对比^[17]认为 Nash-Cournot 假设下的稳定联盟往往较小,但在 Stackelberg 假设下稳定的联盟可以更大,合作的收益与收益和成本参数的比率有关。

本研究对这一民间定理的一般有效性提出了改进。通过设定国家存在任何类型和程度的不对称发现,如果收益和成本负相关,且它们的分布非常倾斜,那么可以实现大联盟的稳定,并且能够证明合作的收益是非常大的。其次,加入转移支付后,证明即便在收益和成本正相关的情况下,大联盟也能同时实现稳定性和高收益。总之,非对称性不一定会构成合作的障碍,甚至还提供了形成大联盟的可能性。当存在交易转让时^[18,19],本研究拓展了相关的研究结果^[20-22],在“非对称可以获得比对称参与者更大的联盟”结果的基础上,详细描述非对称类型和程度如何影响稳定联盟的规模和收益。当不再基于校准模拟或两种到四种类型参与者的限制性假设后,可以获得更多有趣的规律和结论。

因此,本研究的边际贡献,一是,将气候联盟博弈模型分解为外部效应、时间效应和成本效应,通过研究三种效应之间的占优条件和相互作用,解释了“合作悖论”和“搭便车”现象的机理,提出气候联盟稳定的条件。二是,设定国家存在任何类型和程度的不对称,证明当减排收益和成本呈现负协方差的高度偏态分布时,这种更大的不对称性反而更有利于全球减排。在三种效应和转让机制的共同作用下,可以最终建立广泛参与、稳定的、减排效果显著的全球气候联盟。

1 基本模型和博弈方法

1.1 基本模型和假设

假设国家集 N , $i = 1, \dots, n$, 各国减排量为

q_i , 则全球总减排量为 $Q = \sum_{i \in N} q_i$. 为探索更多的可能性, 本研究假设所有边际减排收益 (the marginal abatement benefit, MAB) 和边际减排成本 (the marginal abatement cost, MAC) 关于减排量都是线性的, 且减排收益 B_i 为凹函数, 减排成本 C_i 为凸函数.

由于温室气体具有流动性, 气候资源作为一种公共产品不受国界的约束, 从而每个国家都是气候资源的消耗者, 也是减少温室气体排放的受益者. 因此, 各国减排收益 B_i 取决于全球减排总量 Q , 表达式为

$$B_i(Q, \theta_i) = b\theta_i \left(aQ - \frac{Q^2}{2} \right) \quad (1)$$

其中 a, b 为严格正数; θ_i 表示各国在全球减排总收益中的占比, $\theta_i > 0$, 且 $\sum_{i \in N} \theta_i = 1$. $MAB_i(Q) = b\theta_i(a - Q)$, $b\theta_i$ 是各国边际收益曲线的斜率. 全球减排总收益为 $B(Q) = b \left(aQ - \frac{Q^2}{2} \right)$, 且 $MAB(Q) = b(a - Q)$.

假定各国减排成本 C_i 取决于其自己的减排水平, 与其他国家的减排水平无关, 表达式为

$$C_i(q_i) = \frac{c_i(q_i)^2}{2} \quad (2)$$

其中 $c_i > 0$, 表示各国边际成本曲线的斜率, $MAC_i(q_i) = c_i q_i$. 全球减排总成本为 $C(Q) = \sum_{i \in N} C_i(q_i)$.

假定各国减排净收益为 $\pi_i = B_i(Q) - C_i(q_i)$, 即

$$\pi_i(\theta_i, c_i, q_i, Q) = b\theta_i \left(aQ - \frac{Q^2}{2} \right) - \frac{c_i(q_i)^2}{2} \quad (3)$$

全球减排总净收益为 $\Pi = \sum_{i \in N} \pi_i$.

当假设对称条件时, 所有国家收益占比都相同 $\theta_i = \frac{1}{N}$, 即各国 MAB_i 的斜率相同 $b\theta_i = \frac{b}{N}$ 且 MAC_i 的斜率相同 $c_i = c$. 此时, 各国减排净收益为

$$\pi_i(Q, q_i) = \frac{b}{N} \left(aQ - \frac{Q^2}{2} \right) - \frac{c(q_i)^2}{2} \quad (4)$$

从式(3)和式(4)中可以看出, 每个国家承担自身全部减排成本, 却只能获得全球减排的一小

部分收益, 此时便出现了公共产品的“社会困境 (social dilemma)”, 即个人利益和集体利益之间的冲突会导致选择次优的全球减排结果.

1.2 博弈方法

本研究共运用了 4 种博弈方法: 不合作下的纳什均衡 (Nash equilibrium)、完全合作下的社会最优 (socially optimal)、库诺特 (Cournot) 静态博弈和斯坦克尔伯格 (Stackelberg) 动态博弈, 具有不同的决策目标和解决策略.

首先, 假设两种最简单、最理想条件下的博弈——完全不合作博弈和完全合作博弈.

在完全不合作博弈中, 所有国家都拒绝合作, 每个非成员国都以个人利益最大化为目标, 其中, 当每个人的战略在其他人的当前战略下是最优时, 则形成了纳什均衡 (NE). 即当个人边际减排成本等于个人边际减排收益时 $MAC_i(q_i) = MAB_i(Q)$, 可最大化个人净收益 π_i .

在完全合作博弈中, 所有国家都自愿签订有约束力的协议, 每个成员国都以集体利益最大化为目标, 从而实现社会最优. 即当个人边际减排成本等于全球边际减排收益时 $MAC_i(q_i) = MAB(Q)$, 可最大化全球净收益 Π .

然后, 放宽假设后, 建立一个允许各国自由加入和退出的气候联盟 (open-membership single coalition game)^[23]. 在第一阶段中, 每个国家自愿选择是否加入气候联盟. 加入的成员国共同形成一个博弈方, 以最大化联盟总净收益为目标, 后期只需在联盟内部按各国不同的减排收益和成本情况自动分配不同的减排任务; 而每个单独行动的非成员国作为多个独立的博弈方, 在决策时以最大化自身净收益为目标. 假设博弈方都具备完全信息 (complete information), 即每个参与人对所有其他参与人的特征, 包括战略空间、支付函数 (payoff) 等, 有完全的了解和准确的知识.

在库诺特博弈的第二阶段中, 成员国和非成员国独立且同时做出不同的减排量决策 (或虽然行动有先后, 但后行动者并不知道前行动者采取了什么具体行动).

不同的是, 在斯坦克尔伯格博弈中, 双方决策出现先后顺序. 在第二阶段, 成员国作为领导者 (leader) 首先选择减排量; 在第三阶段, 非成员国观察到成员国的减排量后, 作为追随者 (follower)

后选择自己的减排量. 这里假设存在“完美信息”(perfect information), 即一个参与人在行动时, 对之前博弈进程有准确了解, 而不是被蒙蔽的, 也就是后行动者能准确知道先行动者选择了什么行动. 此时, 参与人的行动有先后顺序, 且后行动者的决策依赖于先行动者, 先行动者的决策要考虑对后行动者的影响, 并且剔除了纳什均衡策略中的不可信的威胁和承诺, 从而保证动态博弈结果的稳定性, 给出一个合理预测. 也就是要求均衡战略的行为规则在每一个信息集上都是最优的, 即实现了子博弈完美纳什均衡(subgame perfect Nash equilibrium), 进一步完善了纳什均衡的概念.

这种均衡需要采用逆向归纳法(backwards induction)求解. 首先, 在第三阶段, 当非成员国决策时, 成员国选择的 q^l 已经决定了. 因此, 相当于在给定成员国 q^l 的情况下, 非成员国决定最优减排量 $\max_{q^f} \pi^f(q^l, q^f)$, 解得函数 $u(q^l)$; 然后, 在第二阶段, 成员国预测到非成员国将根据函数 $u(q^l)$ 选择 q^f , 所以直接将 $u(q^l)$ 代入自己的净收益函数 $\max_{q^l} \pi^l(q^l, u(q^l))$, 得到成员国的最优减排量 q^{l*} ; 最后将 q^{l*} 代入 $u(q^l)$, 求得非成员国的最优减排量 q^{f*} . 由此可见, 在这种博弈中, 成员国反而掌握了“先动优势”^[24-27], 他们早已预料到非成员国会依据自身减排量制定减排量. 因此, 成员国会用固定的净收益函数率先预估非成员国的最优减排量, 从而制定本国减排量. 如果成员国制定的减排量过低, 非成员国即便为了自身利益最大化也不得不提高本国的减排量.

1.3 联盟稳定的条件

本研究采用内部和外部稳定的概念^[28]来确定稳定的联盟规模. 当任何成员国单独离开联盟都不会获得更高的收益时, 联盟内部是稳定的; 当没有任何非成员国会因为加入联盟而获得更高的收益时, 联盟外部是稳定的.

在对称条件下, 联盟的稳定条件为

$$\begin{aligned} \pi^l(\alpha) &\geq \pi^f\left(\frac{\alpha N - 1}{N}\right) \\ \pi^f(\alpha) &\geq \pi^l\left(\frac{\alpha N + 1}{N}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 π^l 和 π^f 分别表示每个成员国和非成员国的净收益; α 表示加入气候联盟的国家的比例, $0 < \alpha < 1$, 则有 αN 个成员国, 有 $(1 - \alpha)N$ 个非成员国.

在非对称条件下, 联盟的稳定性不仅取决于成员国数量, 还与收益和成本特征有密切关系. 如果让 n 个非对称国家自由组合形成联盟, 则会形成 $2^n - 1$ 个斯坦克尔伯格联盟(先后决策), 或 $2^n - n - 1$ 个库诺特联盟(同时决策), 这就变得相当复杂^[29], 之前的研究多采用模拟或算法来识别其中稳定的联盟^[30, 21]. 也有学者^[31-34]采用合作博弈中的核(core), 夏普里值(Shapley value)或纳什讨价还价(Nash bargaining)分配盈余, 但是过于死板且无法兼顾稳定性问题.

本研究通过引入交易转让机制, 可以使每个成员都通过交易转让获得刚好足够维持联盟参与的状态, 从而同时获得了集体最优和个体最优, 甚至可以形成全员参与的稳定的大联盟.

1) 交易价格

在交易过程中, 联盟需要制定可交易污染许可证(tradable pollution permits)的最优价格(碳价), 或者制定联盟中协调一致的碳税, 其最优价格水平 p 应等于每个成员国的最后一单位减排成本 MAC_i , 即 $p = MAC_i$. 又已知 $MAC_i = c_i q_i$, 所以 $p = c_i q_i$. 从而推导出 $Q^W = \sum_{i \in W} q_i = \sum_{i \in W} \frac{p}{c_i}$, 因此

$$p = \frac{Q^W}{\sum_{i \in W} \frac{1}{c_i}} \quad (6)$$

其中 W 表示成员国集合. 可见, 碳排放额度的最优交易价格受成员国减排总量 Q^W 和 MAC 斜率 c_i 的影响. 成员国 i 只需减排到 $p = c_i q_i$ 时即可.

2) 交易转让所得

联盟根据总减排目标, 需要为各个成员国分配减排量 q_r , 而成员国自身最优的减排量为 q_i . 因此, $q_i - q_r$ 为可转让的碳排放额度. 当 $q_i > q_r$ 时, 该成员国有多余的排放额度, 可卖出; 当 $q_i < q_r$ 时, 该成员国无法完成联盟规定的减排量, 需要购买排放额度.

于是, 交易价格与转让的额度之积为交易转让所得

$$\tau_i = p(q_i - q_r) \quad (7)$$

其中 $\sum_{i \in W} \tau_i = 0$, 即在交易转让的过程中, 买入的国家, 其支付的转让费用 (即 τ_i 为负) 的总和始终等于卖出的国家所获得的转让所得 (即 τ_i 为正) 的总和, 因此被称为零和转让机制 (a zero-sum system of transfers).

3) 联盟盈余的分配

如果某成员国退出联盟会获得更大的收益, 则会产生离开的动机从而威胁联盟的稳定. 因此联盟必须要提前向该国补足这份收益差额来防止成员国退出. 这里将“收益差额”定义不同国家分配到的盈余为 x_i , 可表示为

$$\pi_i^w(W) + \tau_i - \pi_i^k(W \setminus i) = x_i \geq 0$$

即只要成员国留在联盟中的净收益 $\pi_{i \in W}^w(W)$ 加上转让所得 τ_i 大于退出联盟的净收益 $\pi_{i \in W}^k(W \setminus i)$, 则联盟的内部是稳定的. 其中, $W \setminus i$ 表示成员国 i 离开后剩余的联盟; K 表示非成员国集合.

转让机制需要联盟将盈余做出合理的分配^[21], 本研究按照收益成本比 $\omega_i \equiv \frac{\theta_i}{c_i}$ 分配联盟的盈余, 不同国家分配到的盈余为 x_i .

$$x_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i \in W} \omega_i} \left[\sum_{i \in W} \pi_i^w(W) - \sum_{i \in W} \pi_i^k(W \setminus i) \right] \quad (8)$$

结合式(7), 可求出分配给成员国减排量

$$q_r = q_i + \frac{\pi_i^w(W) - \pi_i^k(W \setminus i) + x_i}{p} \quad (9)$$

其中 $\sum_{r \in W} q_r = Q^w$, 即联盟内的总减排量不变.

综上所述, 非对称条件下, 带转让机制的联盟内外部稳定的要求变为

$$\begin{aligned} \pi_{i \in W}^w(W) + \tau_{i \in W} &\geq \pi_{i \in W}^k(W \setminus i) \\ \pi_{j \in K}^k(W) &> \pi_{j \in K}^w(W \cup j) + \tau_{j \in K} \\ \Phi &= \left\{ i \in W: \sum_{i \in W} \pi_i^w - \sum_{i \in W} \pi_i^k(W \setminus i) \geq 0 \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

即当成员国留在联盟的净收益加转让所得大于其退出联盟的净收益, 且非成员国不加入联盟的净收益大于其加入联盟的净收益加转让所得时, 联盟同时实现内外部稳定. 此外, 由上式还可知, 由于 $\sigma(W) = \sum_{i \in W} \pi_i^w(W) - \sum_{i \in W} \pi_i^k(W \setminus i) \geq 0$, 即稳定的联盟无论缩小还是扩大, 盈余都为正. 因此, 只需要寻找 $\sigma(W) \geq 0$ 有最多成员 (或最大减排)

的联盟. 在下文的模拟部分 (表 11) 可清晰验证交易转让是如何维持联盟稳定的.

2 博弈分析

在对称和非对称条件的假设下, 根据式(1) ~ 式(4) 和 4 种博弈模型的最优决策目标, 可计算出对应的 8 种均衡结果, 见表 1 和表 2 中式(11) ~ 式(18). 具体的推导和计算过程受篇幅所限本研究不再详述.

本节分为 3 个部分: 一是计算社会最优与纳什均衡作为基础对照; 二是在对称条件下, 研究气候联盟正的外部效应和负的时间效应的占优条件和相互作用, 求得稳定联盟的成员国数量, 论证了“合作悖论”和“搭便车”现象的机理; 三是在非对称条件下, 引入成本效应和转让机制时, 气候联盟的外部效应和时间效应的均衡结果和减排路径发生变化, 从而克服了“合作悖论”, 满足了建立广泛参与、稳定的、减排效果显著的全球气候联盟的条件.

外部效应也称外部性 (externality), 分为正外部性和负外部性. 温室气体排放具有负外部效应, 即该经济行为使他人或社会受损, 却没有为此承担成本或无法向他人支付赔偿. 而减排就是一种正外部性的行为, 即该经济行为使他人或社会收益, 却无法获得相应报酬或无法向他人收费, 如果缺少激励和补偿, 就会导致这类产品供给不足.

时间效应来源于博弈的阶段数. 当动态地审视气候联盟扩张的过程, 下文经计算会证明, 在理论模型中, 越早加入斯坦克尔伯格联盟的成员国, 具有的“先动优势”就越大. 联盟中成员国数量的每一次增加或减少, 都会影响到当时成员国和非成员国间博弈的均衡结果. 直到联盟达到内外稳定的状态时, 计算此时联盟的成员国数量和减排总量才是本研究想要得到的结果.

成本效应来源于非对称假设. 在对称假设中, 每个国家都一样, 加入气候联盟后会在内部平均承担减排任务. 而在非对称假设中, 每个国家有不同的减排收益和成本. 因此, 加入气候联盟会承担不同的减排任务, 从而博弈结果会更复杂. 此外, 还会产生交易转让的需求, 使全球气候联盟同时实现广泛参与、稳定且减排效果显著成为可能.

表1 纳什均衡与社会最优
Table 1 Nash equilibrium and socially optimal

均衡结果		不合作	完全合作
对称	各国减排量	$q^o = \frac{a}{N(1+\gamma)}$	$q^c = \frac{a}{N+\gamma}$
	全球减排量	$Q^o = \frac{a}{1+\gamma}$	$Q^c = \frac{aN}{N+\gamma}$
	全球净收益	$\Pi^o = \frac{ba^2(2N\gamma + N - \gamma)}{2N(\gamma + 1)^2}$	$\Pi^c = \frac{ba^2N}{2(N+\gamma)}$
非对称	各国减排量	$q_i^{ao} = \frac{ab\omega_i}{1 + b \sum_{i \in N} \omega_i}$	$q_i^{ac} = \frac{ab}{1 + b \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}}$
	全球减排量	$Q^{ao} = \frac{ab \sum_{i \in N} \omega_i}{1 + b \sum_{i \in N} \omega_i}$	$Q^{ac} = \frac{ab \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}}{1 + b \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}}$
	各国净收益	$\pi_i^{ao} = \frac{a^2b^2 \left(2\theta_i \sum_{i \in N} \omega_i - \omega_i^2 c_i + \theta_i \left(\sum_{i \in N} \omega_i \right)^2 \right)}{2 \left(1 + b \sum_{i \in N} \omega_i \right)^2}$	$\pi_i^{ac} = \frac{a^2b^2 \left(2\theta_i \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} - \frac{1}{c_i} + b\theta_i \left(\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} \right)^2 \right)}{2 \left(1 + b \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} \right)^2}$

表2 库诺特博弈与斯坦克尔伯格博弈的均衡结果

Table 2 Equilibrium outcomes of Cournot and Stackelberg games

均衡结果		库诺特联盟	斯坦克尔伯格联盟
对称	成员国	$q^{s*}(\alpha) = \frac{a\alpha}{\gamma + 1 - \alpha + \alpha^2 N}$	$q^{l*}(\alpha) = \frac{a\alpha\gamma}{(\gamma + 1 - \alpha)^2 + \alpha^2 N\gamma}$
	非成员国	$q^{n*}(\alpha) = \frac{a/N}{\gamma + 1 - \alpha + \alpha^2 N}$	$q^{f*}(\alpha) = \frac{a(\gamma + 1 - \alpha)/N}{(\gamma + 1 - \alpha)^2 + \alpha^2 N\gamma}$
	全球总量	$Q^{cou} = \frac{a(1 - \alpha + \alpha^2 N)}{\gamma + 1 - \alpha + \alpha^2 N}$	$Q^{sta} = \frac{a\alpha^2 N\gamma + a(1 - \alpha)(\gamma + 1 - \alpha)}{(\gamma + 1 - \alpha)^2 + \alpha^2 N\gamma}$
非对称	成员国	$q_i^{v*} = \frac{ab \sum_{i \in V} \theta_i}{c_i \left[1 + b \left(\sum_{i \in V} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in V} \theta_i + \sum_{j \in T} \omega_j \right) \right]}$	$q_i^{w*} = \frac{ab \sum_{i \in W} \theta_i}{c_i \left[b \sum_{i \in W} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in W} \theta_i + \left(1 + b \sum_{j \in K} \omega_j \right)^2 \right]}$
	非成员国	$q_j^{t*} = \frac{ab\theta_j}{c_j \left[1 + b \left(\sum_{i \in V} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in V} \theta_i + \sum_{j \in T} \omega_j \right) \right]}$	$q_j^{k*} = \frac{ab\theta_j \left(1 + b \sum_{j \in K} \omega_j \right)}{c_j \left[b \sum_{i \in W} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in W} \theta_i + \left(1 + b \sum_{j \in K} \omega_j \right)^2 \right]}$
	全球总量	$Q^{acou} = \frac{ab \left(\sum_{j \in T} \omega_j + \sum_{i \in V} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in V} \theta_i \right)}{1 + b \left(\sum_{j \in T} \omega_j + \sum_{i \in V} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in V} \theta_i \right)}$	$Q^{asta} = \frac{ab \left[\sum_{i \in W} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in W} \theta_i + \sum_{j \in K} \omega_j \left(1 + b \sum_{j \in K} \omega_j \right) \right]}{b \sum_{i \in W} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in W} \theta_i + \left(1 + b \sum_{j \in K} \omega_j \right)^2}$

2.1 外部效应的影响程度

本节对比不合作和完全合作的均衡结果——纳什均衡与社会最优。减排的外部效应在纳什均衡时最小，在社会最优时最大，两者之差可以衡量外部效应的影响程度。

一方面，在对称条件下，各国有着相同的边际减排收益斜率 $\frac{b}{N}$ 和边际减排成本斜率 c （以下简称收益和成本）。在式(11)与式(12)中， $\gamma \equiv \frac{c}{b}$ 表示成本和收益之比。可证， γ 越小，减排量越大。

另外,当 $N > 1$ 时, $Q^c > Q^o, q^c > q^o, \pi^c > \pi^o$, 说明完全合作博弈中会实现更多的全球减排 Q^c , 对每个国家都更有利, 社会最优明显优于个人最优, 但事实上没有一个国家有动机单方面选择 q^c 从而主动增加减排量。

命题 1 用完全合作和不合作下的全球减排量(全球净收益)之差来衡量外部效应的影响程度, 差异越大, 合作的优势和必要性就越大。

外部性的影响程度为

$$\Delta Q = Q^c - Q^o = \frac{a\gamma(N-1)}{(N+\gamma)(1+\gamma)} > 0$$

$$\Delta \Pi = \Pi^c - \Pi^o = \frac{a^2c\gamma(N-1)^2}{2N(N+\gamma)(\gamma+1)^2} > 0$$

进一步探究外部效应随收益和成本变化的规律。

1) 在 ΔQ 中, 对 γ 求导发现: 当 $\gamma < \sqrt{N}$ 时, ΔQ 随 γ 增大而增大, 随 γ 的减小而减小; 当 γ 接近 0 时, 即成本小收益大时, 外部效应甚微, 此时

表 3 外部效应与 c 、 b 、 γ 值的关系

Table 3 Relationships among externality effect, c , b and γ

类型	c	b	γ	减排量	净收益	外部效应	减排效果
1	小	大	小	q^o 大	Π^o 极大	$\Delta \Pi$ 极小	各国已主动积极减排, 全球无需合作减排
2	大	小	大	q^c 小	Π^c 较小	$\Delta \Pi$ 较小	各国消极减排, 全球合作净收益随 b 的变大而增加
3	小	小	≈ 1	ΔQ 大	Π^c 极小	$\Delta \Pi$ 较大	全球合作可极大提高减排量, 但净收益值极小
4	大	大	≈ 1	ΔQ 大	Π^c 极大	$\Delta \Pi$ 极大	全球合作不仅可极大提高减排量, 且外部效应极大

另一方面, 在非对称条件下, 各国有着不同的全球收益占比 θ_i 和边际减排成本斜率 c_i , 从而使气候联盟更接近现实情况, 不同国家可以有低成本低收益、低成本高收益、高成本低收益、高成本高收益等多种特征. 因此, 加入的成本(收益)效应是否改变了外部效应的影响程度呢?

在式(13)和式(14)中, $\omega_i \equiv \frac{\theta_i}{c_i}$ 表示收益占比与边际减排成本斜率之比. 容易验证, 式(11)、式(12)分别是式(13)、式(14)在对称条件下 $\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} = \frac{N}{c}$ 的特殊解。

当存在纳什均衡时, 由式(13)求导可证, Q^{ao} 随 a 、 b 和 $\sum_{i \in N} \omega_i$ 增大而增大. 由于边际成本 $MAC_i^{ao} = \frac{ab\theta_i}{1+b\sum_{i \in N} \omega_i}$, 可知 θ_i 的任何非对称都会

意味着合作的优势和必要性最小。

2) 在 $\Delta \Pi$ 中, 首先, 固定 γ 不变, 发现 $\Delta \Pi$ 随成本 c 增大而增大. 其次, 固定 c 不变, 对 γ 求导发现: 定义 $S(N) = (\sqrt{N^2 + 8N} - N)/4$, 则: ① 当 $\gamma < S(N)$ 时, $\Delta \Pi$ 随 b 增大而减小; 当 $\gamma > S(N)$ 时, $\Delta \Pi$ 随 b 增大而增大. ② γ 与 $S(N)$ 越接近, $\Delta \Pi$ 越大, 完全合作越有利. ③ $S(N)$ 是单调的, 当 N 变得很大时, 其趋于 1. 例如当 $N = 200$ 时, $S(200) \approx 0.99$.

根据以上分析, 再综合式(11), 式(12)和命题 1 可进一步总结出表 3 中的规律和结论, 并可以在模拟部分(表 8)得到清晰验证。

对比表 3 中的 4 种关系可以发现, 只有当 $c \approx b$ 且都较大时, $\gamma \approx 1$, 外部效应最大, 合作最有必要. 此时, 全球合作不仅可极大提高减排量, 且净收益增长极大. 而在其他情况下, 没有必要促成全球合作减排, 或者说很难形成稳定的合作关系。

产生成本效应, 于是对于高收益低成本的国家来说, 非对称性也会增加该国的减排量. 此外, 由于 Q^{ao} 在 θ_i 和 c_i 的协方差中是递减的, 负(正)的协方差通常表明在不合作时, 因此, 非对称下的全球减排量会大于(小于)对称情况。

当存在社会最优时, 由式(14)求导可证, Q^{ac} 随 a 、 b 和 $\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}$ 增大而增大, 且与 θ_i 无关. 另外,

由于边际成本 $MAC_i^{ac} = \frac{ab}{1+b\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}} = \frac{Q^{ac}}{\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}}$, 且

当 c_i 相等时(即对称的成本), 平均分布的 $\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}$ 最小, 导致非对称的成本使全球 MAC 变得更平坦, 因此, 在完全合作时, 非对称下的全球减排量也会大于对称情况。

$$\Delta Q^a = Q^{ac} - Q^{ao} = \frac{ab \left[\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} - \sum_{i \in N} \omega_i \right]}{\left(1 + b \sum_{i \in N} \frac{1}{c_i}\right) \left(1 + b \sum_{i \in N} \omega_i\right)} > 0$$

通过求差发现,与对称时一样,完全合作的 Q^{ac} 严格大于不合作的 Q^{ao} (由于 $0 < \theta_i < 1$ 且 $\sum_{i \in N} \theta_i = 1$, 得到 $\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} > \sum_{i \in N} \omega_i$). 此时的 ΔQ^a , 不仅包含了最大的外部效应,也包含了成本效应.

由于各国的 c_i 和 θ_i 是给定的,所以全球边际收益曲线的斜率 b 决定了 ΔQ^a 的大小. 对 b 求导, 定义 $S = 1 / \sqrt{\sum_{i \in N} \frac{1}{c_i} \sum_{i \in N} \omega_i}$, 所以当 $b < S$ 时, ΔQ^a 随 b 的增大而增大; 当 $b > S$ 时, ΔQ^a 随 b 的增大而减小.

综上所述,与对称条件下仅存在外部效应相比,在非对称条件下,成本效应加入后,不变的是社会最优始终严格大于个人最优. 变化的是在不合作时,各国最优减排量受自身收益占比和减排成本大小的影响,收益占比越大、成本越低的国家减排越多;在完全合作时,全球减排总量与各国收益占比无关,仅与成本有关. 非对称下的全球减排量和净收益一般都会大于对称情况. 以上结论可在模拟部分(表10)得到清晰验证.

2.2 对称条件下气候联盟的外部效应与时间效应

本节在对称条件下对比受外部效应影响的库诺特联盟和受外部效应和时间效应影响的斯坦克尔伯格联盟的均衡结果.

由式(15)和式(16),容易验证,当代入 $\alpha = 1$ 进成员国减排量 $q^{s*}(\alpha)$ 和 $q^{l*}(\alpha)$ 中,可以得到社会最优时的特殊解 q^c ; 当代入 $\alpha = 0$ 进非成员国减排量 $q^{n*}(\alpha)$ 和 $q^{f*}(\alpha)$ 中,可以得到纳什均衡下的特殊解 q^o .

2.2.1 正的外部效应

在库诺特联盟中,由式(15)可证,当成员国数量 $\alpha N > 1$ 时, $q^{s*} > q^{n*}$, 即成员国比非成员国的减排量更大.

命题2 对于成员国数量 $\alpha N > 1$ 的对称的库诺特气候联盟,加入联盟总是意味着要增加减排量,所以外部效应是严格正的,即 $q^s(\alpha N + 1) - q^n(\alpha N) > 0$.

进一步对比纳什均衡(式11)、社会最优(式12)和库诺特联盟(式15)的结果发现:①当成员国数量 $\alpha N > \gamma + 1$ 时, $q^{s*} > q^c$. ②当成员国数量 $\alpha N > 1$ 时, $q^{n*} < q^o$. 因此,在一般情况下可以合并为 $q^{s*} > q^c > q^o > q^{n*}$, 即在库诺特联盟中,成员国的减排量甚至高于完全合作时的减排量,非成员国的减排量甚至可以低于不合作时的减排量.

因此,这种正的外部效应极大的拉开了成员国和非成员国的减排差距,成员国为实现集体利益背负上了巨大的减排压力,非成员国只关心自身收益从而坐享“搭便车”收益. 下文会通过模拟结果(表8)验证上述命题与结论.

2.2.2 负的时间效应

在斯坦克尔伯格联盟中,由式(16),对比成员国和非成员国的减排差距,发现,当 $\alpha < \frac{\gamma + 1}{\gamma N + 1}$ 时, $q^l < q^f$, 即成员国的减排量小于非成员国,此时加入联盟变得更有利; 当 $\alpha > \frac{\gamma + 1}{\gamma N + 1}$ 时, $q^l > q^f$, 即成员国的减排量大于非成员国,此时成员国有机退出气候联盟. 可见,当 α 较大时,拥有较大参与比例的气候联盟并不稳定.

另外,为单独分离出时间效应,消除外部效应,给式(16)赋值成员国数量 $\alpha N = 1$. 计算得

$$\begin{aligned} q_{1\alpha N=1}^l &= \frac{a\gamma N}{(\gamma N + N - 1)^2 + \gamma N} \\ q_{1\alpha N=1}^f &= \frac{a(\gamma N + N - 1)}{(\gamma N + N - 1)^2 + \gamma N} \end{aligned} \quad (19)$$

可证当 $N > 1$ 时, $q_{1\alpha N=1}^l < q_{1\alpha N=1}^f$, 即当仅存在时间效应时,单个成员国的减排量小于所有非成员国. 进一步与式(11)中不合作结果 q^o 对比,可知当 $N > 1$ 时, $q_{1\alpha N=1}^l < q^o < q_{1\alpha N=1}^f$, 也就是说,作为气候联盟的第一个发起者可以率先选择比不合作时更小的减排量,从而仅利用时间效应就获得更大的收益.

命题3 在对称的斯坦克尔伯格气候联盟中,当参与比例在一定范围内时 $\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma N + 1}\right)$, 率先加入联盟意味着可以选择更少的减排量,所以时间效应是负的,即 $q^l(\alpha N + 1) - q^f(\alpha N) < 0$. 尤其作为气候联盟的第一个发起者,可以最大程度

降低自身减排量(相对于 q^o),诱导追随者增加减排量(相对于 q^o).

最后,对比两个气候联盟的博弈结果,发现

命题 4 对于所有拥有 $1 \leq \alpha N < N$ 个成员的可能子联盟(即部分参与)形成的库诺特联盟与斯坦克尔伯格联盟相比, $Q^{sta} < Q^{cou}, q^l < q^s, q^f > q^n$.

因此,相对于库诺特联盟,斯坦克尔伯格联盟中的时间效应使领导者 q^l 降低了减排量,而追随者 q^f 却增加了减排量.同时,又由于这种反向形式的“碳泄漏”是不完全的^[35-37](后有证),因此,斯坦克尔伯格联盟总减排压力 Q^{sta} 更小.所以,领导者通过时间效应获得了“先动优势”从而提高了自身收益,一举扭转了在库诺特联盟中的劣势地位.下文会通过模拟结果(表 8)验证上述结论.

2.2.3 时间效应何时优于外部效应呢?

利用式(16)计算当两种效应精确抵消时,即 $q^{l*}(\hat{\alpha}) = q^{f*}(\hat{\alpha})$ 时,加入气候联盟的国家的比例为 $\hat{\alpha}$,成员国数量为 $\hat{\alpha}N$,可以确定联盟的边界为

$$\hat{\alpha} = \frac{\gamma + 1}{\gamma N + 1} \tag{20}$$

其中 $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \hat{\alpha} = 1$, $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \hat{\alpha} = \frac{1}{n}$. 因此可得出以下命题.

命题 5 当 $\alpha = \hat{\alpha}$ 时,外部效应和时间效应相互完全抵消;当 $\alpha < \hat{\alpha}$ 时,时间效应占优;当 $\alpha > \hat{\alpha}$ 时,外部效应占优.

也就是对于拥有 α 比例成员国的所有斯坦克尔伯格联盟来说

- 当 $\alpha < \hat{\alpha}$ 时, $q^l < q^o < q^f, Q^{sta} < Q^o$;
- 当 $\alpha > \hat{\alpha}$ 时, $q^l > q^o > q^f, Q^{sta} > Q^o$;
- 当 $\alpha = \hat{\alpha}$ 时, $q^l = q^o = q^f, Q^{sta} = Q^o$.

因此,当成员国数量少于 $\hat{\alpha}N$ 时,时间效应优于外部效应,且成员国的减排量 q^l 可低于不合作减排量 q^o ,并利用其时间优势诱导非成员国选择高于 q^o 的减排量 q^f .这个结果成为“减排”和“参与”潜在关系的关键所在.下文会通过模拟结果(表 8)验证上述结论.

进一步探索联盟规模 $\hat{\alpha}$ 与 γ 、收益、时间效应、外部效应之间的关系.由式(20)可知,①当 γ

接近 0 时(成本小收益大), $\hat{\alpha}$ 接近 1,因此在所有国家都加入联盟之前,时间效应始终优于外部效应,早加入优于不加入,直至形成最大的联盟.此时,命题 1 和表 3 已指出,“当 γ 接近 0 时, ΔQ 较小, $\Delta \Pi$ 极小,外部效应甚微,此时意味着合作的优势和必要性较小.”综上,“合作悖论”的逻辑清晰起来:当 γ 接近 0 时,时间效应优于外部效应,成员国自主逐渐形成最大的联盟,但此时合作增加的收益极小.②相反,当 γ 较大时(成本大收益小), $\hat{\alpha}$ 较小,稳定的联盟会很小,外部效应明显优于时间效应,即不加入联盟会明显多出更大的收益.

2.2.4 时间效应在多大程度上优于外部效应呢?

这里首先需要厘清各国减排量之间的关系.当各国最大化自身净收益时,对式(3)求一阶导为

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = b\theta_i(a - q_i - Q_{-i}) - c_i q_i = 0$$

其中 Q_{-i} 表示除 i 国以外其他国家的减排量总和,则 $Q_{-i} = \sum_{j \neq i \in N} q_j, Q = Q_{-i} + q_i$.求得最优反应函数(best-response function)为

$$q_i^{br} = \frac{b\theta_i(a - Q_{-i})}{c_i + b\theta_i} \tag{21}$$

由于在对称条件下 $\omega_i \equiv \frac{\theta_i}{c_i} = \frac{1}{cN}$,加之 $\gamma \equiv \frac{c}{b}$,因此,最优反应函数的斜率为

$$\frac{\partial q_i^{br}}{\partial Q_{-i}} = \frac{-b\omega_i}{1+b\omega_i} = \frac{-\frac{b}{cN}}{1+\frac{b}{cN}} = \frac{-1}{1+\gamma N} \in (-1, 0) \tag{22}$$

由式(22)可见,最优反应函数的斜率为负,表明双方之间的减排量是相互替代关系,且存在一定比例的替代率.这意味着一个国家提高的减排量只能部分抵消其他国家降低的减排量,也就解释了为什么目前发达国家减少的排放不仅无法完全抵消甚至加剧了发展中国家的排放,最终导致全球排放总量仍在增加,这被称为“碳泄漏”^[35-37].该情况在本研究中意味着,成员国减少的排放无法完全抵消非成员国通过“搭便车”增加的排放.这便解释了前文中提到的“反向形式的碳泄漏是不完全的”.

由式(22)可见,在对称条件下,当 γ 接近0时,最优反应函数的斜率接近-1,出现完全替代情况.再加上如果此时时间效应占优(成员国比例尚未达到 $\hat{\alpha}$),则作为领导者的成员国一旦率先降低减排量,作为追随者的非成员国就要几乎完全弥补这种降低.所以,此时成员国通过将减排目标转移到追随者,有效地诱使非成员国增加了减排量,从而增加了自身收益,获得了最大的时间效应.

在非对称条件下,当 ω_i 接近0时,最优反应函数的斜率接近0,则该国不会发生碳泄露,也就是该国减排不会造成他国排放增加,则减排效果明显.因此,若低比率 ω_i 国家(即低收益高成本国家)退出气候联盟,则造成的影响则较小;若高比率 ω_i 国家(即高收益低成本国家)退出,则造成的严重的碳泄露.当 ω_i 增大,最优反应函数的斜率接近-1,则联盟增加的减排量几乎被高比率 ω_i 国家退出联盟带来的减排量降低完全抵消,此时出现完全的碳泄露,从而从全球角度来看完全丧失减排效果.

2.3 非对称条件下气候联盟的成本效应

本节在非对称条件下,对比受外部效应和成本效应影响的库诺特联盟和受外部效应、时间效应和

成本效应影响的斯坦克尔伯格联盟的均衡结果.

很容易验证,式(15)、式(16)是式(17)、式(18)在对称条件下 $\sum_{i \in V} \frac{1}{c_i} = \frac{\alpha N}{c}$, $\sum_{i \in V} \theta_i = \alpha$ 和 $\sum_{j \in T} \omega_j = \frac{1 - \alpha}{c}$ 的特殊解.当代入 $j = 0$ 或 $i = 1$ 进式(17)和式(18)时,可得到不合作时式(13)和完全合作时式(14)的特殊解.

2.3.1 库诺特气候联盟中的外部效应和成本效应

当联盟成员固定时, $\sum_{i \in V} \theta_i$ 、 $\sum_{i \in V} \frac{1}{c_i}$ 和 $\sum_{j \in T} \omega_j$ 是不变的.由式(17),发现各成员国减排量 q_i^{**} 之间的差别仅由成本 c_i 决定,与收益占比 θ_i 无关.所以,与对称条件下的正外部效应不同,在非对称条件下,只有低成本的成员国被迫增加减排量,为了联盟的利益,舍小家为大家;而高成本的成员国则受益于加入联盟,可减少减排量.

不同的是,各非成员国减排量 q_j^* 之间的差别则由收益成本比 ω_j 决定所以,低收益高成本的非成员国会自动降低自身减排目标.

表4中举例说明了在非对称条件下,国家间不同的减排收益和成本决定了其对加入气候联盟的态度.

表4 气候联盟中不同减排收益与成本的国家

Table 4 Countries classified based on the benefits and costs of abatement in the climate coalition

类型	c_i 与 θ_i	举例	特征
1	收益低	旅游业发达的小岛国家	原本环境优良、受污染影响较小的国家
2	收益高	沙漠干旱国家、沿海低海拔国家、重污染国家	受气候影响较大的国家
3	成本低	印度、中国、俄罗斯等	能源效率较低或使用大量碳密集燃料的国家
4	成本高	日本、欧盟等发达国家	能源效率很高且使用大量可再生能源的国家

类型1国家多以争取援助基金为目的加入联盟以提高本国适应气候变化的能力,更容易被援助者拉拢,与之共进退.这类国家往往国土面积较小或资源贫乏,碳排放量一般都没有达到联盟制定的标准.

类型2国家是联盟的坚决支持者,它们迫切希望全球气候尽快改善,短期内就可以实现减少本国面临的气候威胁和经济损失的目的,较高的减排收益使之呼吁各国积极行动.

类型3国家的减排态度和气候政策往往更依赖于国内发展需求的变化,或支持或反对或旁观.

由于长期依赖煤炭和粗放型的生产方式,因此淘汰落后产能、引进国外先进设备、实行集约型生产等方法可实现大幅减排,减排成本相对较低.但如上文所说,若加入库诺特气候联盟,只有低成本的成员国被迫增加减排量.

类型4国家往往扮演联盟的领导者和减排的倡导者的角色.它们经济成熟稳定、人口稳中有降、能源需求相对饱和,更加重视环境保护与能源安全,因此通过积极研发新技术和改变消费者的行为来进一步减少排放.虽减排成本较高,但可以实现创造就业岗位、技术压制、利润垄断等目的.

总之,不同国家一旦加入联盟,那么在分担的减排责任时会出现两类情况:一是无法立即完成自身的减排责任,需要分阶段逐步减排;二是能够立即实现减排目标,并且有多余的碳排放额度.此时,一个具有成本效应的联盟为最终实现联盟总的减排目标,应允许成员国之间可以相互交易多余的碳排放额度^[38, 39].

综上所述,与命题2中对称的库诺特联盟存在严格的正的外部效应不同是,受非对称条件中成本效应的影响,高收益低成本的国家加入库诺特联盟无需真正被迫增加减排量,可以通过气候联盟内部的成员国“转让制度”卖出自身多余的排放配额.这种转让是通过可交易污染许可证制度在成员国之间实施,非成员国被排除在许可证交易之外.

2.3.2 斯坦克尔伯格联盟中三种效应的共同作用

与库诺特联盟相同,由式(18)可证,当斯坦克尔伯格联盟成员固定时,各成员国减排量 q_i^{w*}

之间的差别也仅由成本 c_i 决定,而各非成员国减排量 q_j^{k*} 之间的差别由 ω_j 决定.可见,无论加入哪种联盟,成员国若想争取更少的减排义务分担,第一要务都是着眼国内,竭力降低自身减排成本,不仅应提高能源管理和利用水平,还应呼吁和督促发达国家尽快落实向发展中国家提供的资金和技术支持的承诺.

最后,对比两个气候联盟的博弈结果.由式(17)和式(18)同样可以证明,在非对称条件下,无论联盟的规模大小以及成员的利益和成本特征如何,命题4的结论都成立:斯坦克尔伯格联盟的总减排量 Q^{sta} 更低,其成员国的减排量 q_i^w 更少,非成员国的减排量 q_j^k 更多.另外,结合式(6)碳价的影响因素可知,由于成员国减排总量 $Q^{sta} < Q^{cou}$,所以斯坦克尔伯格联盟合作明显会有更低的碳价.

表5总结了三种效应分别在对称与非对称条件下4种博弈模型中产生作用的大小.

表5 对称与非对称条件下的三种效应对比

Table 5 Comparison of three effects under symmetric and asymmetric conditions

博弈类型	对称	非对称
斯坦克尔伯格联盟	正的外部效应 + 负的时间效应	外部效应 + 时间效应 + 成本效应
库诺特联盟	正的外部效应	外部效应 + 成本效应
完全合作	最大外部效应	最大外部效应 + 成本效应
不合作	最小外部效应	最小外部效应 + 成本效应

3 模拟分析

在博弈论的研究中,模拟法往往必不可少.模拟是基于变量的涵义和变量间相互关系的详细说明,赋予变量合理的值或区间,就可以清晰验证模型结果,再现模型中各要素和变量之间的互相作用、动态的变化及发展或过程.

本节共做出3种模拟,一是在对称条件下模拟斯坦克尔伯格联盟达成稳定的过程以及不同收益和成本下稳定联盟的成员国数量、减排量和净收益;二是在非对称条件下模拟成本效应如何影响不合作与完全合作的均衡结果;三是在非对称

条件下模拟稳定的斯坦克尔伯格联盟的成员国数量、减排量和净收益,以及交易转让的过程.

3.1 对称条件下稳定的联盟

前文在1.3节中已详细论证了联盟内外稳定的条件.前面用 $\hat{\alpha}N$ 表示临界的联盟规模(取小数),这里定义 α^*N 表示一个稳定的联盟规模,即成员数量(取整数),其内部和外部都是稳定的,且 $\alpha^*N - \hat{\alpha}N < 2$.

3.1.1 求解稳定的联盟规模

为方便对比,假设 $N = 10, a = 100, b = 2, c = 0.5$.根据式(5)、式(16)和式(20),可求得每个可能的成员国比例 α 对应的减排水平和净收益.表6清晰再现了稳定联盟的形成过程.

表6 对称条件下稳定联盟的形成过程

Table 6 The formation process of stable coalition under symmetric hypothesis

α	q^l	q^f	π^l	π^f	Q^{sta}	Π^{sta}
0.00	—	8.00	—	944.00	80.00	9 440.00
0.10	1.86	8.53	953.62	936.27	78.66	9 380.04
0.20	4.16	8.73	948.02	933.29	78.17	9 362.34
0.30	6.65	8.43	944.57	937.88	78.94	9 398.87
0.40*	8.91*	7.57*	944.32*	949.83*	81.07*	9 476.24*
0.50	10.53	6.32	947.37	965.10	84.21	9 562.33
0.60	11.34	4.91	952.74	978.86	87.71	9 631.90
0.70	11.46	3.60	959.08	988.66	91.00	9 679.55
0.80	11.10	2.50	965.33	994.55	93.76	9 711.70
0.90	10.48	1.63	970.90	997.68	95.93	9 735.74
1.00	9.76	—	975.61	—	97.56	9 756.10

由表6可知,当 $\alpha = 0$ 时表示不合作的纳什均衡,最大化自身收益后每个国家减排量为8.00,净收益为944.00.当 $\alpha = 0.1$ 时,作为联盟的发起者,唯一成员国只需减排1.86,并迫使非成员国减排量增加到8.53,并且净收益也明显增加到953.62.当第2个国家发现 $\pi^l(0.2) > \pi^f(0.1)$ 时,也会选择加入联盟,此时2个成员国各减排4.16,8个非成员国的减排量再次被迫增加到8.73.此时联盟这种极大的吸引力来自于成员国作为领导者,利用此时的时间效应优于外部效应,获得比不合作时还低的减排量,迫使追随者——非成员国增加减排量,从而实现成员国的“搭便车”.直到在 $\alpha < 0.4$ 时, $\pi^l(0.4) > \pi^f(0.3)$,联盟对非成员国始终有吸引力.当 $\alpha = 0.4$ 时,如果还有非成员国想要加入,则该国收益由 $\pi^f(0.4)$ 减少到 $\pi^l(0.5)$.因此该国加入联盟并不会获得更高的收益,从而实现联盟外部稳定.

另一方面,可以发现 Q^{sta} 和 Π^{sta} 随着 α 增大而增加,当 $\alpha = 1$ 全员参加时,联盟减排量和净收益最大,出现社会最优.但是由于 $\pi^l(1) < \pi^f(0.9)$,975.61 < 997.68,即全员参与时的成员国净收益小于9个成员国时的非成员国的净收益,因此会有一个成员国退出联盟.以此类推,直到在 $\alpha > 0.4$ 时,成员国退出联盟都可获得更多的净收益,外部效应优于时间效应.但当 $\alpha = 0.4$

时,如果有成员国再退出,则净收益由 $\pi^l(0.4)$ 减少到 $\pi^f(0.3)$,因此,该国离开联盟并不会获得更高的收益,从而实现联盟内部稳定.

由此可见,在外部效应和时间效应占优的较量中,最终唯一稳定的联盟是由4个成员国组成,即 $\alpha = 0.4$.

此外,可以发现,存在 $\pi^l\left(\alpha^* + \frac{1}{N}\right) - \pi^l(\alpha^*) > \pi^f(\alpha^*) - \pi^f\left(\alpha^* + \frac{1}{N}\right)$,在本例中就是 $\pi^l(0.5) - \pi^l(0.4) > \pi^f(0.4) - \pi^f(0.5)$,可理解为在最优成员数量的基础上,当联盟增加1名成员国时,每个成员国增加的收益是大于该非成员国加入联盟增加的收益的.因此,原有稳定联盟的成员国其实是有集体动机拉拢非成员国加入联盟的,只是需要支付额外的款项.

3.1.2 联盟规模与成本收益率的关系

本研究进一步将 b 值和 c 值扩展到 12×12 种组合,求出144种情况下,稳定的成员国数量 $\alpha^* N$.并且,为更贴近现实情况,考虑到目前世界上有233个国家和地区,其中,国家数量为197个,因此,设 $N = 200$.由式(20)可知, $\hat{\alpha}$ 与 a 无关,为方便后续的减排量对比,设 $a = 1\ 000$.表7列举了稳定联盟中成员国数量的均衡结果,明确了 $\gamma = \frac{c}{b}$ 和 α^* 之间的关系.

表 7 不同收益和成本下稳定联盟的成员国数量

Table 7 The number of members in stable climate coalitions under the differing benefits and costs of abatement

$\alpha^* N$		c											
		0.01	0.05	0.10	0.25	0.50	1	2	5	10	20	50	100
b	0.01	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	0.05	6	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
	0.10	11	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
	0.25	24	6	4	3	3	3	3	2	3	2	2	2
	0.50	41	11	6	4	3	3	3	3	3	2	2	2
	1	68	20	11	6	4	3	3	3	3	3	2	2
	2	101	35	20	9	6	4	3	3	3	3	3	2
	5	144	68	41	20	11	6	4	3	3	3	3	3
	10	167	101	68	35	20	11	6	4	3	3	3	3
	20	182	134	101	58	35	20	11	6	4	3	3	3
	50	193	167	144	101	68	41	24	11	6	4	3	3
	100	197	182	167	134	101	68	41	20	11	6	4	3

由表 7 可以看出,稳定联盟的成员国数量随着 γ 值的减小而增加;当 γ 值足够小时,稳定联盟几乎由全部国家组成,例如当 $c = 0.01$, $b = 100$ 时, $\gamma = 0.0001$,此时,成本低且收益高,成员国的数量可以稳定在 197 个。相反,当 γ 值较大时,很少有国家选择加入气候联盟,加之在实际中,气候联盟通常规定签署国的最低数量,这意味着当 γ 很大时,联盟不

太可能最终达成。当 $\gamma \geq 1$ 之后,也就是成本一旦大于等于收益,稳定的成员国数量不会超过 3 个。

3.1.3 稳定联盟的减排量与净收益

表 8 模拟了不同的 γ 值下,稳定联盟需要由不同数量的成员国组成,以及对比了 4 种博弈中的全球与各国减排量和净收益的差异,充分验证了前文所有命题和结论。

表 8 联盟规模与全球和各国的减排量、净收益

Table 8 Coalitions size and global and national abatement, net income

γ	0.0001	0.01		1			100		10000
c	0.01	0.01	1	0.01	1	100	1	100	100
b	100	1	100	0.01	1	100	0.01	1	0.01
$\hat{\alpha}N$	196.10	67.33		1.99			1.01		1.00
$\alpha^* N$	197	68		3			2		2
全球									
Q^o	999.90	990.10		500.00			9.90		0.10
Q^{sta}	999.92	990.15		501.91			10.00		0.10
Q^c	1000.00	999.95		995.02			666.67		19.61
Q^{cou}	1000.00	999.58		507.39			10.00		0.10
Π^o	49 999 975	499 926	49 992 648	3 744	374 375	37 437 500	98	9 827	1
Π^{sta}	49 999 975	499 927	49 992 696	3 753	375 321	37 532 109	99	9 922	1
Π^c	49 999 975	499 975	49 997 500	4 975	497 515	49 751 244	3 333	333 333	98
各国									
q^o	5.00	4.95		2.50			0.05		0.00
q^l	5.02	5.00		3.76			0.10		0.00
q^f	3.85	4.93		2.49			0.05		0.00
q^s	5.08	14.29		7.39			0.10		0.00
q^n	0.03	0.21		2.46			0.05		0.00
q^c	5.00	5.00		4.98			3.33		0.10
π^o	249 999.87	2 499.88	249 963.24	18.72	1 871.88	187 187.50	0.49	49.14	0.005
π^l	249 999.87	2 499.63	249 963.24	18.73	1 872.68	187 268.28	0.49	49.26	0.005
π^f	—	2 499.64	249 963.61	18.77	1 876.67	187 666.52	0.50	49.61	0.010
π^c	249 999.88	2 499.88	249 987.50	24.88	2 487.56	248 756.22	16.67	1 666.67	0.490

注: $N = 200$, $a = 1000$

验证命题1,外部效应的影响程度.由表(8)发现,外部效应最大的情况是 $\Delta Q = Q^c - Q^o = 995.02 - 500.00$, $\Delta \Pi = \Pi^c - \Pi^o = 49\ 751\ 244 - 37\ 437\ 500$,此时对应 $b = 100, c = 100, \gamma = 1$,验证表3中情景4的合作必要性最大的条件.但此时,稳定的成员国数量 $\alpha^* N = 3$,完全印证了“合作悖论”中的“收益大的联盟规模往往都较小”.而希望联盟规模很大时, $\alpha^* N = 197$,符合此条件的 $\Delta \Pi$ 和 ΔQ 却都极小,失去了合作的必要性,联盟很难维持稳定.

必须强调的是,以上情况适用于 N 较大的环境问题.当 N 变小时,任何国家的退出或加入都会对其他成员减排水平的影响较大,反而有效地惩罚了“搭便车”行为.例如当设 $N = 5, a = 100, b = 1, c = 1$ 时,计算可得,稳定的联盟由3个成员国和2个非成员国组成,且求得 $Q^o = 50.00, Q^c = 83.33, Q^{sta} = 62.77, \Pi^c = 4\ 166.67, \Pi^o = 3\ 500, \Pi^{sta} = 3\ 869.40$.可见在这种情况下,联盟能够在很大程度上缩小与不合作情景之间的差距,不满足“合作悖论”.

验证命题2,库诺特联盟中的外部效应到底增加了成员国多少减排压力?当 $\gamma = 0.01$ 时,相对于 $q^c = 5.00$ 和 $q^o = 4.95, q^s - q^n = 14.29 - 0.21$,因此,外部效应是严格正的.而且 $q^s - q^n$ 随着 γ 值增大而减小,外部效应逐渐减弱.此外,除当 $\gamma = 100$ 时,由于 $\alpha N > \gamma + 1$ 不成立之外,验证结论 $q^s > q^c > q^o > q^n$ 成立.

验证命题4,斯坦克尔伯格联盟受时间效应影响,成员国从先动优势中获益多少?例如当 $\gamma = 0.01$ 时, $q^l - q^f = 5 - 4.93$,可见负的时间效应极大的抵消了正的外部效应.此外,对比两个联盟, $Q^{sta} < Q^{non}$ ($990.15 < 999.58$), $q^l < q^s$ ($5.00 < 14.29$), $q^f > q^n$ ($4.93 > 0.21$)成立.

验证命题5,相对于不合作博弈,斯坦克尔伯格联盟的结果改进了多少?当 $\gamma = 1$ 时,由于 $\alpha^* N > \hat{\alpha} N$ ($3 > 1.99$),所以验证 $q^l \geq q^o \geq q^f$ ($3.76 > 2.50 > 2.49$), $\pi^f \geq \pi^l \geq \pi^o$ ($18.77 > 18.73 > 18.72$)成立,即相比不合作时,虽然联盟中成员国的减排量更多,非成员国的减排量更少,但双方获得的净收益都比不合作时更多,有利于联盟维持稳定.

此外,本研究探究了为什么无论建立怎样规

模的联盟都始终无法有效提高全球减排量?非成员国“搭便车”危害有多大?1)当 $\gamma = 1$ 时,稳定联盟由3个成员国组成,197个非成员国“搭便车”.虽然此时成员国努力增加减排 $q^l > q^o > q^f$ ($3.76 > 2.50 > 2.49$),但提高全球减排量的效果有限($Q^{sta} - Q^o = 501.91 - 500.00$).2)当 $\gamma = 0.01$ 时,成员国数量增加到68个,但每个成员国只象征性地增加了很少的减排量($q^l - q^o = 5.00 - 4.95$),因此,全球减排量仍无明显增加($Q^{sta} - Q^o = 990.15 - 990.10$).即便如此,相比之下,还是3个成员国的小联盟更优.因此,当 $b = 100$ 和 $c = 100$ 时, $\Pi^{sta} - \Pi^o = 37\ 532\ 109 - 37\ 437\ 500$,全球净收益相对有了明显的提升.

综上所述,在对称条件下,时间效应对于联盟的参与有巨大的影响.在斯坦克尔伯格联盟中,包括大联盟在内的任何数量的成员国都有可能是稳定的,而库诺特联盟的成员从不超过3个^[40].原因是,对于成员数量小于 $\hat{\alpha} N$ 的联盟来说,时间效应占优,导致成员国将减排任务转移给非成员国.当成员数量大于 $\hat{\alpha} N$ 时,外部效应占优,哪怕多出1个成员都会使联盟不稳定.

3.2 模拟非对称条件下的成本效应

本节通过对成本和收益分布规律的巧妙设计,明确了从对称约束条件转变到非对称,在不合作与完全合作中,各国减排量和净收益的变化路径,从而解释了成本效应对外部效应的影响程度.

表9中,假设有3个国家;第1组,各国呈现对称性特征.从第2组开始到第4组,收益不变,成本出现非对称性,且差距越来越明显.从第4组到第8组,在成本的非对称性基础上,收益也出现非对称性,并且两者分别呈现正负协方差的情况,进而出现了低成本低收益、低成本高收益、高成本高收益、高成本低收益等组合情况.

通过验证发现:

1)观察第1组~第4组,收益相同,随着非对称的成本差距越来越大,无论合作与否,总减排量 Q^{ac} 、 Q^{ao} 和外部效应 ΔQ 都逐渐变大($68 > 53 > 48 > 43, 41 > 27 > 23 > 20, 27 > 26 > 24 > 23$),合作变得更有必要.此外,对比各国减排量发现,虽然合作时的减排量始终大于不合作 $q_i^{ac} > q_i^{ao}$,但净收益 $\pi_i^{ac} > \pi_i^{ao}$.随着组间非对称成本差距的增加,组内各国之间的减排量和净收益差距越来越

越大。

2) 对比第 1 组和第 9 组, 成本相同, 收益占比出现非对称特征, 虽不影响减排总量 Q^{ac} 、 Q^{ao} 和 ΔQ , 但各国 q_i^{ao} 、 π_i^{ac} 和 π_i^{ao} 发生变化, 且 $\Delta \Pi$ 明显增加 ($743 > 610$), 合作变得更有利。

3) 观察第 4 组 ~ 第 8 组, 保持成本差异不变时, 无论收益 θ_i 如何变化, 完全合作下的 q_i^{ac} 、 Q^{ac} 和 Π^{ac} 都不变。①在第 5 组和第 6 组中, 成本和收益的协方差为正, 于是存在低成本低收益的国家和低成本高收益的国家。两组在不合作时的 Q^{ao}

和 Π^{ao} 减少 ($41 > 29 > 25, 2\ 866 > 2\ 194 > 1\ 903$), 并且此时第 6 组的外部性最大 ($\Delta Q : 43 > 39 > 27, \Delta \Pi : 1\ 484 > 1\ 193 > 521$), 成为最有必要合作的一组, 此时只需 π_3^{ac} (3 308) 给予 π_1^{ac} (40) 和 π_2^{ac} (40) 适当的补贴, 便可实现。②在第 7 组和第 8 组中, 成本和收益的协方差为负, 于是存在低成本高收益的国家和低成本低收益的国家。可以发现, 这种组合方式下即使不合作, 它们的减排总量 Q^{ao} 也达到最大 (46), 因此 ΔQ 最小 (22), 此时最没有必要合作。

表 9 成本效应对减排量和净收益的影响

Table 9 Influence of cost effect on abatement and net income

组别		1	2	3	4	5	6	7	8	9
成本	c_1	4	2	2	1	1	1	1	1	4
	c_2	4	4	2	1	1	1	1	1	4
	c_3	4	6	8	10	10	10	10	10	4
收益占比	θ_1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/6	1/8	5/12	1/3	1/6
	θ_2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/6	1/8	5/12	1/6	1/6
	θ_3	1/3	1/3	1/3	1/3	2/3	5/12	1/6	1/6	2/3
不合作	q_1^{ao}	7	13	12	20	12	9	23	36	3
	q_2^{ao}	7	6	12	20	12	9	23	9	3
	q_3^{ao}	7	4	3	2	5	6	1	1	13
	Q^{ao}	20	23	27	41	29	25	46	46	20
	π_1^{ao}	511	526	638	898	337	225	1 221	1 710	278
	π_2^{ao}	511	607	638	898	337	225	1 221	549	278
	π_3^{ao}	511	635	748	1 071	1 519	1 454	586	586	844
Π^{ao}	1 533	1 768	2 025	2 866	2 194	1 903	3 028	2 845	1 400	
完全合作	q_1^{ac}	14	26	24	32	32	32	32	32	14
	q_2^{ac}	14	13	24	32	32	32	32	32	14
	q_3^{ac}	14	9	6	3	3	3	3	3	14
	Q^{ac}	43	48	53	68	68	68	68	68	43
	π_1^{ac}	714	532	744	973	226	40	1 346	2 466	153
	π_2^{ac}	714	873	744	973	226	40	1 346	226	153
	π_3^{ac}	714	986	1 159	1 441	2 934	3 308	695	695	1 837
Π^{ac}	2 143	2 391	2 647	3 387	2 143					
外部效应	ΔQ	23	24	26	27	39	43	22	22	23
	$\Delta \Pi$	610	624	622	521	1 193	1 484	359	542	743

综上所述, 非对称性并不一定是成功合作的阻碍, 相反, 一定程度的非对称性, 有利于提高全球的减排量和净收益。成本的非对称和收益的非对称会分别对减排量和净收益产生不同的影响。成本的非对称性越强, 如果能实现完全合作, 则会出现最大的全球减排量 (68) 和净收益 (3 387)。当收益与成本的协方差呈现正向变动时, 外部性

增大了, 合作变得更有必要和容易成功 (第 5 组和第 6 组); 当呈现反向变动时, 外部性较小, 合作的稳定性较差 (第 7 组和第 8 组)。

具体到各种类型的国家: ①低成本高收益的国家会在完全合作时会被分配到比不合作更少且极少的减排任务, 同时获得更大且极大的净收益。因此, 此类国家必然积极倡导完全合作。②低成本

高收益的国家会在不合作时获得最高的净收益,但会在完全合作时被分配较高的减排任务,因此,劝说此类国家参与合作最难. ③低成本低收益的国家也会在完全合作时被分配较高的减排任务,且由于收益占比较低,最终的净收益也较低. 但此时很容易被同组内低成本高收益的国家以少量的补偿拉拢. ④低成本低收益的国家在完全合作时会被分配到极少的减排任务,如果不合作,可以减排更少. 此类国家完全不考虑减排,若想提高其积极性,最好的办法是提高收益.

3.3 模拟非对称联盟的稳定性

本节的目的是强调这三种效应对斯坦克尔伯格联盟稳定性的影响,而不是提供详尽的模拟. 假设国家数量 $n = 10$, $a = 100$, $b = 1$. 主要考虑了两种方法:同时考虑成本斜率 c_i 和收益占比 θ_i 存在负的和正的协方差,且在第一组模拟中被假设为等距分布^[7, 41],在第二组模拟中被假设为高度偏态分布^[41, 42].

首先,定义等距分布. 1) 收益的分布为: $\theta = \left[\frac{1}{55}, \frac{2}{55}, \dots, \frac{10}{55} \right]$, 满足 $\theta_i = \theta_1 i$, 且 $\theta_1 = \frac{1}{55}$, $\sum_{i=1}^n \theta_i = 1$. 2) 成本的分布满足平均斜率 $\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i = 1$, $\sum_{i=1}^n c_i = n$. ①正协方差时,成本分布满足 $c_i = ni\beta_1$, 且 $\beta_1 = \frac{1}{55}$, 得到 $c = \left[\frac{10}{55}, \frac{20}{55}, \dots, \frac{100}{55} \right]$, 此时, $\omega_i = \frac{\theta_i}{c_i} = \frac{1}{10} = \frac{1}{n}$. ②负协方差时,成本分布为 $c = \left[\frac{100}{55}, \frac{90}{55}, \dots, \frac{10}{55} \right]$, 则 $\omega = \left[\frac{1}{100}, \frac{2}{90}, \dots, \frac{10}{10} \right]$. 此时国家 10 拥有最高的收益和最低的成本.

其次,定义高度偏态分布. 1) 收益的分布为: $\sum_{i=1}^n \theta_i = 0.4 \times 2 + 0.025 \times 8 = 1$, 前 2 个国家高收益占比,后 8 个国家低收益占比. 2) 成本的分布仍然满足 $\sum_{i=1}^n c_i = n$. ①当正协方差分布时,成本分布为 $4 \times 2 + 0.25 \times 8$, 即 2 个高收益高成本国

家, 8 个低收益低成本国家, 同样满足 $\omega_i = \frac{\theta_i}{c_i} = \frac{1}{10} = \frac{1}{n}$. ②当负协方差分布时,成本分布为 $0.2 \times 2 + 1.2 \times 8$, 即 2 个高收益低成本国家, 8 个低收益高成本国家.

由于在斯坦克尔伯格联盟中,成员国和非成员国的决策有先后顺序,但成员国内部不分先后顺序,因此,10 个国家可形成 $2^n - 1 = 1023$ 种组合,其中,稳定联盟组中最高全球减排量用 $\max Q^{asia}$ 表示. 定义“减排效果”CGI (a closing-the-gap index), $CGI^Q = \frac{\max Q^{asia} - Q^{ao}}{Q^{ac} - Q^{ao}}$, “净收益效果” $CGI^{\Pi} = \frac{\max \Pi^{asia} - \Pi^{ao}}{\Pi^{ac} - \Pi^{ao}}$. 进一步定义“减排效率” $AE = CGI^Q \times \frac{Q^{ac}}{Q^{ao}}$, “净收益效率” $NE = CGI^{\Pi} \times \frac{\Pi^{ac}}{\Pi^{ao}}$. 表 10 模拟了 4 种分布情况下的各值情况.

第一,对比外部效应的影响程度. 发现,①社会最优下最大的全球减排量 Q^{ac} (97.015) 出现在第 4 组下的正协方差偏态分布. ②负协方差的组 1 和组 3 成员拥有低成本和高收益,即使不合作也会大量减排 Q^{ao} , 且偏态分布下更明显 (80.645 > 68.962). ③由于正协方差下的组 2 和组 4 的 Q^{ao} 略小,所以 ΔQ 会更大,此时的外部效应更大,更容易达成完全合作.

第二,对比斯坦克尔伯格联盟中稳定的成员国数量 $\alpha^* N$. 发现第 3 组下的负协方差的偏态分布,可以实现全员参加 $\{N\}$, 成员是 2 个高收益低成本的国家与 8 个低收益高成本的国家,类似于 2 个气候恶劣的发展中大国与 8 个环境优良的发达国家组成的气候联盟. 从而使第 3 组的 $\max Q$ 、 CGI^Q 、 AE 和 CGI^{Π} 都最大. 但第 4 组的 $\max \Pi$ 和 NE 最大,即实现了以更少的减排量 (88.881) 获得更大的净收益 (4759.224), 此时,联盟成员是 1 个高收益高成本的国家与 5 个低收益低成本的国家.

第三,对比正负协方差. 发现负协方差的成员国数量 $\alpha^* N$ 、减排量 $\max Q$ 等大部分指标都大于正协方差的结果,也就是组 1 优于组 2, 组 3 优于组 4.

表 10 非对称条件下的模拟结果
Table 10 Simulation results under asymmetric conditions

组别		平均分布		偏态分布	
		1) 负 cov	2) 正 cov	3) 负 cov	4) 正 cov
收益	θ_i	$[\frac{1}{55}, \frac{2}{55}, \dots, \frac{10}{55}]$	$[\frac{1}{55}, \frac{2}{55}, \dots, \frac{10}{55}]$	$[\frac{2}{5}, \frac{2}{5}, \frac{1}{40}, \dots, \frac{1}{40}]$	$[\frac{2}{5}, \frac{2}{5}, \frac{1}{40}, \dots, \frac{1}{40}]$
成本	c_i	$[\frac{100}{55}, \frac{90}{55}, \dots, \frac{10}{55}]$	$[\frac{10}{55}, \frac{20}{55}, \dots, \frac{100}{55}]$	$[\frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{6}{5}, \dots, \frac{6}{5}]$	$[4, 4, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{4}]$
不合作	Q^{ao}	68.962	50.000	80.645	50.000
完全合作	Q^{ac}	94.155	94.155	94.340	97.015
斯坦克尔 伯格联盟	$\alpha^* N$	{3, 8, 9, 10}	{1, 9, 10}	{N}	{1, 3, 4, 5, 6, 7}
	max Q	81.720	67.998	94.340	88.881
	CGI^Q	50.642%	40.761%	100%	82.700%
	AE	0.691	0.768	1.170	1.605
	max Π	4 576.352	4 299.299	4 716.981	4 759.224
	CGI^Π	63.016%	62.276%	100%	92.533%
	NE	0.682	0.809	1.045	1.238

第四,对比平均分布和偏态分布.发现偏态分布在三种博弈情况和两种分布中的所有指标都大于平均分布的结果,也就是组 3 优于组 1,组 4 优于组 2.

综上所述,当成本和收益呈现负协方差的偏态分布时,斯坦克尔伯格联盟中的时间效应和成本效应发挥出最大的作用,使其减排量最大,且实现了全员参加和社会最优.据此推断:更大的不对称

性反而更有利于全球减排.

3.4 模拟稳定联盟中交易转让的过程

其中,以第 1 组联盟 {3, 8, 9, 10} 为例,表 11 模拟了转让机制是如何影响各成员国分配到的盈余 x_i 、分配到的减排量 q_i 和转让所得 τ_i 并最终维持了联盟稳定.根据前文式(6)~式(10)和式(17)、式(18)可计算出各列数值.

表 11 模拟稳定联盟中交易转让的过程
Table 11 Simulation results with transfers

$i \in W$	$q_i^k(W)$	$\pi_i^w(W)$	$\pi_i^k(W \setminus i)$	x_i	q_i	τ_i	$\pi_i^w(W) + \tau_i$
3	4.670	247.750	260.414	0.535	2.931	13.200	260.950
8	12.455	660.666	663.330	1.428	11.915	4.091	664.758
9	18.682	727.385	722.142	1.606	19.161	-3.637	723.748
10	37.364	751.799	736.361	1.784	39.164	-13.654	738.145
$\sum_{i \in W}$	73.171	2 387.601	2 382.248	5.353	73.171	0.000	2 387.601
$j \notin W$	$q_j^k(W)$	$\pi_j^k(W)$					
1	0.183	87.841					
2	0.406	175.608					
4	1.045	350.791					
5	1.523	438.091					
6	2.194	525.041					
7	3.199	611.379					
$\sum_{j \notin W}$	8.549	2 188.751					
$\sum_{i,j \in N}$	81.720	4 576.352					

在负协方差的平均分布下,该联盟可以实现最大的减排量,其稳定的成员国由 1 个较低收益、

较高成本国家和 3 个最高收益、最低成本国家组成,各自的收益和成本为 $[\frac{3}{55}, \frac{80}{55}]$ 、 $[\frac{8}{55}, \frac{30}{55}]$ 、

$\left[\frac{9}{55}, \frac{20}{55}\right]$ 和 $\left[\frac{10}{55}, \frac{10}{55}\right]$. 表 11 中, 上半部分的成员国 i 在联盟内部参与交易转让, 下半部分的非成员国 j 被排除在外.

例如, 国家 3 若留在联盟中需减排 4.670 且获净收益 247.750, 若退出联盟净收益将增加到 260.414, 于是有动机退出. 于是联盟为留住该成员国需要为其补足净收益潜在的损失, 按照收益成本比进行分配到盈余 0.535. 加上联盟内各成员国相互交易转让减排量形成的碳价 $p = 7.587$, 最终国家 3 只需承担联盟为分配的更少的减排量 2.931, 并将多余的排放额度卖出, 获利 13.200. 此时, 国家 3 留在联盟内的净收益增加到 260.950 大于退出联盟的净收益 260.414. 因此, 国家 3 不会退出. 再例如, 国家 10 若留在联盟中需减排 37.364, 但联盟为其分配的减排量为 39.164, 为此该国需支付 13.654 购买额外的排放额度. 最终, 该国获得净收益虽然从 751.799 减少到 738.145, 但仍高于退出联盟的净收益 736.361, 因此, 国家 10 也不会退出. 同时, $\sum_{i \in W} \tau_i = 0$ 实现了“零和转让”, $\sum_{r \in W} q_r = \sum_{i \in W} q_i^*$ 联盟减排总量也没变. 总之, 交易转让机制使联盟中的成员国进一步根据各自减排成本和收益的情况在联盟内部转让减排额度, 从而实现联盟减排量和净收益的最大化, 有利于维持联盟的稳定.

综上所述, 通过模拟, 清晰再现了各国的决策博弈过程和稳定联盟的形成过程, 给出了明确的成员国数量. 尤其在非对称假设下, 通过对成本和收益分布规律的巧妙设计, 明确了不同博弈模型中减排量的变化路径.

4 结束语

本研究通过研究外部效应、时间效应和成本效应的相互作用, 解释了“合作悖论”产生的内在逻辑, 并分别对比分析了对称和非对称条件下的 4 种博弈的均衡结果, 研究结果发现:

在对称国家的假设下, 全球可形成稳定的大联盟但净收益增长甚微. 外部效应具有严格的正向作用, 迫使库诺特联盟成员国的减排量骤增. 但时间效应具有负向作用, 可以帮助斯坦克尔伯格联盟中“领导者”(成员国)获得“先动优势”, 越早加入, 最优减排量(集体净收益最大)越小, 净

收益越大, “追随者”(非成员国)的最优减排量(个体净收益最大)反而更大. 当外部效应和时间效应正好抵消时, 边际成本斜率和边际收益斜率的比值决定了稳定的气候联盟的成员国数量、减排量和净收益. 当比值接近 0, 即成本大收益小时, 时间效应优于外部效应, 从而会吸引大量的参与者, 但此时形成稳定的大联盟收益极小, 出现“合作悖论”; 当比值较大, 即成本小收益大时, 只能形成稳定的小联盟.

气候联盟的进一步改进源于成本效应的出现. 在非对称国家的假设下, 外部效应不再是严格的正向作用, 并产生了交易转让的需求, 成员国无需被迫增加减排量, 可以卖出自身多余的排放配额. 在斯坦克尔伯格联盟中, 3 种效应同时存在. 对于低成本高收益的成员国来说, 时间效应的影响最大——越早加入联盟, 净收益越大; 对于高成本高收益的成员国来说, 成本效应的影响最大——较高的减排成本使之在联盟只需承担极小的减排任务. 通过模拟发现, 在非对称情况下, 当在成本和收益呈现负协方差的偏态分布时, 斯坦克尔伯格联盟中的时间效应和成本效应可发挥出最大的作用, 形成了一个广泛参与、稳定的、减排效果显著的全球气候联盟. 说明非对称越明显越有利于联盟维持稳定和提高减排水平.

建立气候联盟更应该像制定一系列的策略集, 无论形成何种联盟结构, 联盟总能以最优减排水平或碳税标准予以应对. 当减排不是占优策略, 且存在碳泄漏时, 联盟就不应该再为每个成员国制定固定的减排要求. 此外, 时间效应表明, 联盟与其呼吁所有国家同时提交减排计划, 不如要求成员国先做出减排承诺, 非成员国后选择减排量, 这样可以使减排目标不那么宏大, 从而参与度更高. 最后, 转让机制对于利用成本效应和提高参与度至关重要, 尤其当高收益低成本的成员国发挥先动优势和利用成本收益的偏态分布时, 建立的联盟可以同时拥有较高的减排量和大量的参与者, 接近社会最优. 如果相对贫穷的国家具有较低的 MAC, 并可以获得来自富裕国家的正向转让, 那么气候联盟就可以获得高效减排和缩小全球不平等^[43]的双重红利.

对中国来说, 面对复杂的国际形势, 中国提出“双碳”目标这一重大战略决策, 既有利于中国的

高质量可持续发展,也促进了中国参与全球气候治理与合作。本研究为此提出三点启示。

第一,降低减排成本,提高减排收益。通过着力控制减排成本和气候损失,提高环境效益、气候效益、经济效益等手段,争取成为具备低成本和高收益特征的国家,并且利用“先动优势”,不仅有利于在全球碳减排义务分担的决策博弈中争取主动权,还有利于形成自身稳定、科学、高效的减排节奏,维持较高的净收益。

第二,同时建立“大联盟”和“小联盟”。中国一方面要全面落实《巴黎协定》,积极建设性参与气候变化国际谈判,努力推动构建公平合理、合作共赢的全球气候治理体系,另一方面也可以在小范围内建立气候联盟。从“合作悖论”与“更大的非对称性反而更有利于减排”的结论中得到启示,在小联盟中,积极与不同发展水平的国家开展多领域的合作与帮扶,如积极推动气候变化南南合作和绿色“一带一路”建设等,通过技术合作和资金支持,不仅缓解了其他相对落后的发展中国家的减排压力,还有利于减少摩擦和谈判成本,形成更加稳固的小联盟,最大程度的提高其减排总量和净收益。

第三,灵活利用转让机制。中国应积极发挥全国碳排放权交易市场的积极作用,参与和推动构建《巴黎协定》下的全球碳交易市场机制^[44],就兼容性、使用范围和时机等问题加强对话与协调。

在未来研究中,可以从以下几方面进行扩展:首先,博弈论作为理论经济学的分支,很难同时兼顾实证研究的功能,只能通过模拟进行验证。下一步尽可能收集各国真实的减排成本与收益的统计数据或相关替代变量,使研究结论可以真正指导各国减排决策。其次,为适应 2015 年《巴黎协定》建立的新的气候治理机制,各国在第一次提交国家自主贡献时,很可能由于缺乏经验或参考案例,而做出有偏差的决策。因此,“完全理性”假设往往很难实现。基于“有限理性”的假设,采用演化博弈方法,不仅可以作为完全理性博弈分析结论的印证和选择工具,还可以用来预测全球气候联盟未来长期中的变化趋势。最后,目前的文献大都用损失函数来替代收益函数,作者认为仅用气候损失这一经济变量可能无法全面涵盖国家的减排收益。未来可以更多的将健康收益、生态收益、环境收益,甚至国际声誉等潜在收益等作为协同因素考虑在内。

参 考 文 献:

- [1] World Economic Forum. The Global Risks Report 2022[R]. 2021: 1-117.
- [2] United Nations Environment Programme. Emissions gap report 2022: The Closing Window-climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies[R]. Nairobi, 2022: 1-132.
- [3] 张中祥, 张钟毓. 全球气候治理体系演进及新旧体系的特征差异比较研究[J]. 国外社会科学, 2021, (5): 139-151.
Zhang Zhongxiang, Zhang Zhongyu. The evolution of the global climate governance system and differences in the characteristics of the old and new systems[J]. Social Sciences Abroad, 2021, (5): 139-151. (in Chinese)
- [4] Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C [J]. Nature, 2016, 534: 631-639.
- [5] Grunewald N, Zarzoso I. Did the kyoto protocol fail? An evaluation of the effect of the kyoto protocol on CO₂ emissions[J]. Environment and Development Economics, 2016, 21(1): 1-22.
- [6] Almer C, Winkler R. Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the kyoto protocol[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 82: 125-151.
- [7] Barrett S. Self-enforcing international environmental agreements[J]. Oxford Economic Papers, 1994, 46: 878-894.
- [8] Stern N. A time for action on climate change and a time for change in economics[J]. The Economic Journal, 2022, 644(132): 1259-1289.
- [9] 刘大勇, 薛 澜, 傅利平, 等. 国际新格局下的全球治理: 展望与研究框架[J]. 管理科学学报, 2021, 24(8): 125-132.
Liu Dayong, Xue Lan, Fu Liping, et al. Global governance in the new international pattern: Prospect and research framework[J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(8): 125-132. (in Chinese)

- [10] Zhang K, Liang Q. Recent progress of cooperation on climate mitigation: A bibliometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 1–14.
- [11] Carraro C, Siniscalco D. Strategies for the international protection of the environment[J]. *Journal of Public Economics*, 1993, 52(3): 309–328.
- [12] Finus M. Game theoretic research on the design of international environmental agreements: Insights, critical remarks and future challenges[J]. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2008, 2(1): 29–67.
- [13] Eyckmans J. Review of applications of game theory to global climate agreements[J]. *Review of Business and Economic Literature*, 2012, 57(2): 122–142.
- [14] Benchekroun H, Long N V. Collaborative environmental management: A review of the literature[J]. *International Game Theory Review*, 2012, 14(4): 1–22.
- [15] Fuentes A C, Rubio S. Can international environmental cooperation be bought? [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(1): 255–264.
- [16] Pavlova Y, De Zeeuw A. Asymmetries in international environmental agreements[J]. *Environment and Development Economics*, 2013, 18: 51–68.
- [17] Finus M, Furini F, Rohrer A V. The efficacy of international environmental agreements when adaptation matters: Nash-Cournot vs Stackelberg leadership[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021, 109: 102461.
- [18] Carraro C, Eyckmans J, Finus M. Optimal transfers and participation decisions in international environmental agreements [J]. *Review of International Organizations*, 2006, 1(4): 379–396.
- [19] Li Q, Fujita T. Transfers in international environmental agreements under heterogeneity[J]. *Applied Economics*, 2021, 53: 3899–3910.
- [20] Finus M, Pintassilgo P. The role of uncertainty and learning for the success of international climate agreements[J]. *Journal of Public Economics*, 2013, 103: 29–43.
- [21] McGinty M. International environmental agreements among asymmetric nations[J]. *Oxford Economic Papers*, 2007, 59(1): 45–62.
- [22] Karp L, Simon L. Participation games and international environmental agreements: A non-parametric model[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013, 65(2): 326–344.
- [23] Yi S S. Stable coalition structures with externalities[J]. *Games and Economic Behavior*, 1997, 20(2): 201–237.
- [24] Eichner T, Pethig R. Self-enforcing international environmental agreements and trade: Taxes versus caps[J]. *Oxford Economic Papers*, 2015, 67(4): 897–917.
- [25] Diamantoudi E, Sartzetakis E S. International environmental agreements: Coordinated action under foresight[J]. *Economic Theory*, 2015, 59(3): 527–546.
- [26] Holland L, Hovi J, Sælen H. Climate leadership by conditional commitments[J]. *Oxford Economic Papers*, 2018, 70(2): 417–442.
- [27] Irina B, Johan E. Simulating the impact of heterogeneity on stability and effectiveness of international environmental agreements[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 277(3): 1151–1162.
- [28] D'Aspremont C, Jacquemin A, Gabszewicz J J, et al. On the stability of collusive price leadership[J]. *Canadian Journal of Economics*, 1983, 16(1): 17–25.
- [29] Cramton P, Stoft S. Global climate games: How pricing and a green fund foster cooperation[J]. *Economics of Energy Environment Policy*, 2012, 1(2): 125–136.
- [30] Nordhaus W. Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy[J]. *American Economic Review*, 2015, 105(4): 1339–1370.
- [31] Barrett S. *Heterogeneous International Environmental Agreements*[M]. Cheltenham: Edward Elgar, 1997.
- [32] Yang Z L. Likelihood of environmental coalitions and the number of coalition members: Evidences from an IAM model[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 255(1): 9–28.
- [33] Ansink E, Weikard H, Withagen C. International environmental agreements with support[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 97: 241–252.
- [34] Li H, Rus H. Climate change adaptation and international mitigation agreements with heterogeneous countries[J]. *Journal of Association Environmental and Resource Economists*, 2019, 6(3): 503–530.

- [35] Zhang Z X. Trade and climate change: Focus on carbon leakage, border carbon adjustments and WTO consistency[J]. *Foundations and Trends in Microeconomics*, 2018, 12(1): 1 – 108.
- [36] Zhang Z X. Competitiveness and leakage concerns and border carbon adjustments[J]. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2012, 6(3): 225 – 287.
- [37] King L C, Van den Bergh J C J M. Potential carbon leakage under the Paris Agreement[J]. *Climatic Change*, 2021, 165: 52.
- [38] 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)
- [39] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. *经济研究*, 2022, 57(1): 56 – 71.
Lin Boqiang. China's high-quality economic growth in the process of carbon neutrality[J]. *Economic Research Journal*, 2022, 57(1): 56 – 71. (in Chinese)
- [40] Finus M, Rundshagen B. *Endogenous Coalition Formation in Global Pollution Control: A Partition Function Approach*[M]. Cheltenham; Edward Elgar Publishing Ltd, 2003.
- [41] Barrett S. Environment and statecraft: The strategy of environmental treaty-making[J]. *Management of Environmental Quality*, 2003, 14(5): 622 – 623.
- [42] Caparrós A, Péreau J C. Multilateral versus sequential negotiations over climate change[J]. *Oxford Economic Papers*, 2017, 69(2): 365 – 387.
- [43] Callahan C, Mankin J. National attribution of historical climate damages[J]. *Climatic Change*, 2022, 172(40): 1 – 19.
- [44] 张希良, 张 达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. *管理世界*, 2021, 37(8): 80 – 95.
Zhang Xiliang, Zhang Da, Yu Runxin. Theory and practice of China's national carbon emissions trading system[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(8): 80 – 95. (in Chinese)

Game analysis of stable global climate coalition under multiple effects

ZHANG Zhongxiang¹, ZHANG Zhong-yu^{2*}

1. Ma Yinchu School of Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Finance, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

Abstract: How to establish a global climate coalition with broad participation, stability, and significant abatement effect has been an urgent issue for the international community. This paper divides the climate coalition models into the externality effect, timing effect, and cost effect ones. The equilibrium results of non-cooperation, full cooperation, a two stages static game of Cournot coalition, and a three stages dynamic game of Stackelberg coalition are compared under symmetric and asymmetric conditions. The stable coalition sizes are determined by simulation. It is found that the positive effect of externality effect and the negative effect of timing effect would offset or dominate each other under certain conditions within the coalition. When the cost-benefit ratio is close to 0, the net benefit of the coalition is small, with the timing effect becoming dominant. Leaders will reduce abatement and induce followers to increase abatement. This will attract more participants and form a stable grand coalition eventually, which explains the “cooperation paradox”. The cost effect stems from asymmetry among countries, which makes the externality effect no longer strictly positive and creating the need for payment transfers. For countries with high benefits and low costs, the timing effect is the greatest. For countries with high benefits and high costs, the cost effect is the greatest. The simulation results show that when costs and benefits present a skewness distribution with negative covariance, the more pronounced the asymmetry, the more stable and effective the abatement effects of coalitions.

Key words: climate coalition; stability; asymmetry; dynamic game