

# 预期国际环境协议的效应分析

王 莹

(福建江夏学院金融学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 通过构建两阶段(当前阶段和未来阶段)跨界污染动态博弈模型, 分析了预期国际环境协议对各国各期污染排放量以及各期污染存量的影响. 研究表明, 预期到国际环境协议会生效并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则在各国各期污染排放量方面, 全部国家第 1 期污染排放总量随着任意一个国家第 2 期的初始污染排放权的核配量的减少而增加, 二者之间存在单调递减关系, 但单个国家第 1 期污染排放量与任意一个国家第 2 期的核配量之间的关系则不明朗; 在各期污染存量方面, 与无国际环境协议的情景相比, 有国际环境协议情景下, 第 1 期的污染存量变多还是变少不明确, 但是最终的污染存量必将减少.

**关键词:** 国际环境协议; 未来协议; 绿色悖论; 跨界污染; 动态博弈

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2022)05-0590-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2022.05.002

## Analysis on effect of anticipated international environmental agreements

Wang Ying

(Finance College, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Considering a two period dynamic game model of transboundary stock pollution and assuming that countries anticipate that an international environmental agreement, IEA, will enter into force in the future (i.e., in period 2), this paper explored what will be the impact of the future IEA on each country's emissions and the total stock pollution in each period. This paper draws two conclusions. Firstly, in term of the impact of the future IEA on each country's emissions in each period, it can only draw a clear conclusion that there is a monotone decreasing relationship between the total amount of pollution emitted by all countries in period 1 and the quality of initial emission rights possessed by any country when supposing that the IEA is anticipated to implement in period 2. However, it is the stock pollution that influences the welfare of each country. In this regard, this paper reveals that, supposing that an IEA is anticipated to implement in period 2, the impact of an IEA on the stock pollution in period 1 is ambiguous, however, the stock pollution in period 2 will be reduced.

**Key words:** international environmental agreements; future agreements; green paradox; transboundary pollution; dynamic games

## 1 引 言

制定并实施国际环境协议(International Environmental Agreements, IEA)是国际社会解决跨界污染问题

收稿日期: 2019-12-07; 修订日期: 2021-10-25.

基金项目: 福建省创新战略研究资助项目(2021R0163); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持资助项目(闽教科(2018)47 号); 福建江夏学院国家社科基金资助项目(JXZ2021003).

的重要举措. 从 20 世纪下半叶开始, 致力于保护资源与环境的 IEA 数量一直在稳步增长<sup>[1]</sup>. 国际环境协议数据库项目(International Environmental Agreements Database Project)的统计数据显示, 从 1800 年至今, 共有 1 200 多项的多边环境协议被制定, 其中超过半数的协议是 1990 年以后订立的. Barrett<sup>[2]</sup>分析了现有 IEA 被接受和被批准的时间, 发现许多 IEA 都有一个共同点, 即每个 IEA 从制定, 到被各成员国立法机构批准, 再到付诸执行, 往往都要经历一个漫长而波折的过程, 都有一段相当长的间隔时间, 甚至数年. 以气候变迁为例, 联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)是 1992 年 6 月在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上通过的, 直到 1994 年才生效; 同时, UNFCCC 只是框架性协定, 直到 1997 年京都议定书的提出, 才真正实现对发达国家温室气体排放有约束力的限制, 并且, 直到 2005 年京都议定书才强制生效. 在污染积累的情况下, 各国会将污染积累的过程纳入考虑, 即不同时期的污染排放选择将密切相关. 那么预期到未来时期 IEA 必将生效或者可能生效, 会对各国各期的污染排放行为以及各期的污染存量产生怎样的影响? 这是值得深入探讨的问题.

众多学者对这一问题展开深入研究, 认为预期 IEA 有可能会带来正向效应也有可能导致负面效应. 部分文献侧重分析预期 IEA 导致的负面效应. 早在 1994 年, Sinclair<sup>[3]</sup>就指出, 预期到随时间推移而递增的碳税, 经济主体将倾向于加速开采化石资源, 从而导致短期碳供给和排放增加. Strand<sup>[4]</sup>认为京都协议国家集合全球之力开发化石能源后备技术的努力可能会对气候产生负面影响. Sinn<sup>[5]</sup>将预期气候政策实际造成全球变暖问题恶化的这一违反常理的现象概括为“绿色悖论”(green paradox), 引起了学术界对预期环境政策影响的高度关注. Gerlagh<sup>[6]</sup>将“绿色悖论”区分为“弱绿色悖论”和“强绿色悖论”, 其中, 弱绿色悖论是指环境政策引致短期污染排放增加的现象; 强绿色悖论描述环境政策恶化经济主体总福利的情况. 这一区分得到学术界认可, 此后, 大量文献对这一议题展开深入讨论. 李玉婷<sup>[7]</sup>在参考 Ploeg 等的研究结论的基础上, 从“作用机制”, “模型类别”, “是否考虑替代能源”, “设定何种环境政策”, “绿色悖论结论”等方面对现有预期环境政策导致“绿色悖论”的相关主要研究文献进行综述<sup>[5-15]</sup>, 具体结论见表 1. 当然, 也有部分文献则强调了预期 IEA 的正向效应. Bauer 等<sup>[16]</sup>认为预期环境政策会带来“撤资效益”(divestment effect)会降低政策实施滞后期间的二氧化碳排放, 即便绿色悖论存在, 在合理假设下也是小的; Kollenbach<sup>[17]</sup>认为化学能源的开采成本既与储量有关, 也与流量有关, 在此基础上, 他认为预期环境政策的影响比 Hoel<sup>[11]</sup>揭示的要乐观.

表 1 预期环境政策导致“绿色悖论”的相关主要研究文献概览  
Table 1 Overview of major research literature on “green paradox”

作用机制	相关文献	模型类别	替代能源	环境政策	“绿色悖论”
逐渐绿色化政策诱发机制	文献[5]	霍特林	无	碳税	弱
	文献[9]	霍特林	无	碳税	弱/无
	文献[10]	霍特林	无	碳税	弱
	文献[11]	Heal, 两期	后备技术	碳税	弱/无
替代品价格下降传导机制	文献[6]	霍特林/Heal, 两期	后备技术	后备技术成本下降	强/弱/无
	文献[12]	霍特林	后备技术	从价补贴	强/弱/无
公告效应机制	文献[13]	霍特林	无	被公告的排放限额	弱
	文献[14]	代表性消费者决策模型	不相关	被公告的碳税	弱/无
	文献[15]	霍特林, 两期, 三国	无	可交易许可证	强/弱/无
其他机制	文献[11]	Heal	是	碳资源封存	强/弱/无

注: 资料来源: 参考文献[7]的基础上整理得到.

现有文献, 对于预期 IEA 的研究已经取得了丰硕成果, 不过还存在一些不足之处: 1) 对于预期 IEA 效应的分析, 许多代表性的文献(如文献[6, 8, 10, 11, 14, 15, 17])大多以具体的化学能源行业为基础, 假设具体的需求函数和生产函数, 在此基础上进行建模分析. 因此, 这些文献结论的一般适用性受到限制. 2) 文献[18-20]建立了一般均衡模型来分析预期 IEA 效益, 然而这些文献的分析大都奠基于一重要假设: 所有经济主体均是同质的, 在这样设定下, 单个经济主体增加(或减少)污染排放意味着所有经济主体的污染排放

总量也相应的增加(或减少),反之亦然,尽管这样设定使数理推导大大简化,但是,很明显,该假设条件与事实未必相符;并且这些文献大多只关注预期 IEA 对各经济主体各时期污染排放的影响.事实上,影响各经济主体福利的是污染存量,所以更应该去揭示各期污染存量,尤其是最终的污染存量与预期 IEA 之间的关系.为此,本文参考 Ömer 等<sup>[18]</sup>的建模,考虑各国是异质的基本现状,通过构建两阶段(当前阶段和未来阶段)一般跨界污染博弈模型分析了预期 IEA 对各国各期污染排放量以及各期污染存量的影响.将无 IEA 的情景作为比较的基准情景,将未来 IEA 要实施的环境友好政策设定为各国必须将污染排放控制在无 IEA 的均衡水平以下,在此基础上,通过数理论证,得出了预期 IEA 对各国各期污染排放以及各期污染存量影响的一系列结论.

在对各期污染排放影响方面,本文预期到 IEA 会生效,并且会在第 2 期实施环境友好政策,则全部国家第 1 期污染排放总量随着任意一个国家第 2 期的初始污染排放权的核配量的减少而增加,二者之间存在单调递减关系,但单个国家第 1 期污染排放量与任意一个国家第 2 期的核配量之间的关系则不明朗.该结论与 Ömer 等<sup>[18]</sup>的结论有点类似但又不完全一样.Ömer 等<sup>[18]</sup>在文献[19, 20]的基础上进行拓展,具体的结论是,单个国家第 1 期污染排放量与第 2 期的初始污染排放权的核配量之间存在单调递减关系.之所以会有这样的结论差异,其根本原因是对于 Ömer 等<sup>[18]</sup>的结论是奠基在所有国家是同质的假设上.

本文认为,影响各国福利的是污染存量,所以更应该去揭示各期污染存量,尤其是最终的污染存量与预期 IEA 之间的关系.在这方面,得出了文献[18-20]忽略的一个结论:预期到 IEA 会生效,并且会在第 2 期实施环境友好政策,与无 IEA 的情景相比,第 1 期的污染存量变多还是变少则不明确,最终的污染存量必将减少.该结论强调,无法确定预期 IEA 是否会导致弱绿色悖论——环境政策引致短期污染排放增加的现象<sup>[6]</sup>,即预期 IEA 在某些情况下会引起弱绿色悖论,在某些情况下不会引起弱绿色悖论,具体取决于预期的 IEA 严格程度,预期 IEA 的反馈效应大小等因素,这一结论与文献[8, 9, 20, 21]的观点类似;除此之外,本文的结论则更加强了预期 IEA 对于控制最终污染存量的积极作用.

为了分析简便,假设 IEA 在第 2 期的环境友好政策将一定会实施,不存在不确定性.尽管如此,本文的分析可以拓展到不确定性的情况,即 IEA 在第 2 期的环境友好政策的实施存在不确定性,其实施的概率小于 1 但大于 0.在不确定性的情况下,本文的结论也同样适用.从数理角度看,不确定性的处理无非是最大化预期的折现福利,即以各种情景出现的概率为权重,进行线性加权<sup>[20]</sup>.

## 2 跨界污染动态博弈模型

### 2.1 基本问题

假设世界范围内共有  $I$  个国家,用  $i$  和  $\bar{i}$  作为国家的索引,用  $t = 1, 2$  作为时间索引, $t = 1$  代表当前时期, $t = 2$  代表未来时期. $s_{it}$  表示第  $i$  个国家在第  $t$  期的污染净排放量(等于污染排放量减去污染削减量,当  $s_{it} > 0$ ,则意味着净排放,当  $s_{it} < 0$ ,则意味着净削减),用  $S_t$  表示第  $t$  期的初始污染存量(也可以看作第  $t - 1$  期的最终污染存量), $\bar{s}_{i2}$  表示第  $i$  个国家在  $t = 2$  期拥有的初始污染排放权数量, $\bar{S}_2 = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2}$  表示所有国家在  $t = 2$  期的初始污染排放权核配总量.每时期顺序发生的事情如下:

在给定初始污染存量  $S_t$  的前提下,各国选择各自的排放量( $s_{1t}, s_{2t}, \dots, s_{It}$ ).

当前总排放量和初始存量加总给各国带来损害,用  $d_{it} \left( S_t + \sum_{i=1}^I s_{it} \right)$  表示国家  $i$  的损害函数.本文中各经济主体的异质性,体现在  $\sum_{i=1}^I s_{it}$ ;如果各经济主体同质,则  $\sum_{i=1}^I s_{it}$  简化为  $I s_{it}$ .

污染排放自然衰减,即有  $S_{t+1} = \left( S_t + \sum_{i=1}^I s_{it} \right) (1 - \delta)$ ,其中  $\delta \in [0, 1]$  表示污染物的自然衰减率.

本文要解决的问题为预期到未来(第 2 期)IEA 将要生效并实施环境友好政策,各个国家将会对各期污染排放做怎样的调整,最终各期的污染存量会有怎样的变化.环境友好政策是指将污染排放控制在无 IEA

的均衡水平以下的政策, 要求国家  $i$  的第 2 期的均衡污染排放量必须控制在核定的允许排放量  $\bar{s}_{i2}$  以内, 并且该核定的允许排放量  $\bar{s}_{i2}$  少于无 IEA 下的均衡排放量. 用带有“nc”, 和“c”的变量分别代表无 IEA 的情景和有 IEA 情景下的均衡结果, 则必须满足  $s_{i2} \leq \bar{s}_{i2} \leq s_{i2,nc}, \forall i \in 1, 2, \dots, I$ .

设  $u_{it}(s_{it})$  是国家  $i$  的污染排放收益函数, 表示国家  $i$  在第  $t = 1, 2$  时期排放  $s_{it}$  污染物所获得的福利; 用  $S_t = S_2 + \sum_{i=1}^I s_{i2}$  表示最终污染存量.

$u'_{it,nc} = \frac{\partial u_{it}(s_{i1,nc})}{\partial s_{it,nc}}$  是在无 IEA 的情景下, 均衡时第  $i$  个国家在第  $t$  时期排放单位污染物所获得的边际福利.

$u'_{it,c} = \frac{\partial u_{it}(s_{i1,c})}{\partial s_{it,c}}$  是在有 IEA 情景下, 均衡时第  $i$  个国家在第  $t$  时期排放单位污染物获得的边际福利.

$d'_{it,nc} = \frac{\partial d_{it}(\psi)}{\partial \psi}$  是在无 IEA 的情景下, 均衡时第  $t$  时期污染物存量变化给第  $i$  个国家带来的边际损害,

其中  $\psi = S_{t,nc} + \sum_{i=1}^I s_{it,nc}$ .

$d'_{it,c} = \frac{\partial d_{it}(\phi)}{\partial \phi}$  是在有 IEA 情景下, 均衡时, 第  $t$  时期污染物存量变化给第  $i$  个国家带来的边际损害, 其

中  $\phi = S_{t,c} + \sum_{i=1}^I s_{it,c}$ .

$s'_{it} = \frac{\partial s_{it}(S_t)}{\partial S_t}$  是第  $t$  时期单位初始污染存量变动导致第  $t$  时期第  $i$  个国家污染排放的变动量.

各国污染排放收益函数是严格递增和严格凹, 各国的损害函数是严格递增和严格凸, 即  $u' > 0, u'' < 0, d' > 0, d'' > 0$ .

根据该假设, 则有  $u'' - d'' < 0$ , 可见各国污染排放的边际净福利(等于单位污染排放带来的边际福利  $u'$  减去单位污染排放带来的边际损害  $d'$ , 即  $u' - d'$ )递减. 同时, 在这样假设下, 后文的最大化问题的解存在且唯一<sup>[23]</sup>.

## 2.2 无 IEA 情景下的模型构建与均衡结果

无 IEA 情景下, 任意国家  $i$  的最优污染排放选择问题可表示为

$$\text{Max } u_{i1}(s_{i1}) - d_{i1} \left( S_1 + \sum_{i=1}^I s_{i1} \right) + \beta \left( u_{i2}(s_{i2}) - d_{i2} \left( S_2 + \sum_{i=1}^I s_{i2} \right) \right). \quad (1)$$

式(1)的一阶条件为

$$u'_{i1,nc} - d'_{i1,nc} + \beta(1 - \delta) \left( u'_{i2,nc} s'_{i2,nc} - d'_{i2,nc} \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \right) \right) = 0, \quad (2)$$

$$\beta(u'_{i2,nc} - d'_{i2,nc}) = 0 \Rightarrow u'_{i2,nc} - d'_{i2,nc} = 0, \quad (3)$$

其中  $\beta$  为福利折现系数.

模型表明, 每个国家在没有任何环境政策约束下自由选择各期污染排放量, 以最大化自身的折现的总福利. 根据最优一阶条件可知, 在无 IEA 的情景下, 国家  $i$  在对第 1 期污染排放进行决策时, 由于第 1 期污染排放没有受到限制, 因此, 国家  $i$  会一直排放到一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利等于 0 的量. 一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利为

- 1) 一单位第 1 期污染排放给自身第 1 期带来的边际净福利  $u'_{i1,nc} - d'_{i1,nc}$ ;
- 2) 一单位第 1 期污染排放给自身第 2 期带来的边际净福利

$$\beta(1 - \delta) \left( u'_{i2,nc} s'_{i2,nc} - d'_{i2,nc} \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \right) \right).$$

在无 IEA 的情景下, 国家  $i$  在对第 2 期污染排放进行决策时, 由于第 2 期污染排放没有受到限制, 因此, 国家  $i$  会一直排放到一单位第 2 期污染排放给自身带来的边际净福利等于 0 的量.

### 2.3 有 IEA 情景的模型构建与均衡结果

预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策下, 任意国家  $i$  对污染排放进行最优选择以最大化自身的折现的总福利, 即

$$\begin{aligned} \text{Max } & u_{i1}(s_{i1}) - d_{i1} \left( S_1 + \sum_{i=1}^I s_{i1} \right) + \beta \left( u_{i2}(s_{i2}) - d_{i2} \left( S_2 + \sum_{i=1}^I s_{i2} \right) \right), \\ \text{s.t. } & s_{i2} \leq \bar{s}_{i2}. \end{aligned} \quad (4)$$

令

$$L_1 = u_{i1}(s_{i1}) - d_{i1} \left( S_1 + \sum_{i=1}^I s_{i1} \right) + \beta \left( u_{i2}(s_{i2}) - d_{i2} \left( S_2 + \sum_{i=1}^I s_{i2} \right) \right) - \lambda_i (s_{i2} - \bar{s}_{i2}). \quad (5)$$

式(4)的一阶条件为

$$u'_{i1,c} - d'_{i1,c} + \beta(1 - \delta) \left( u'_{i2,c} s'_{i2,c} - d'_{i2,c} \left( 1 + \sum_{i=1}^I s'_{i2,c} \right) \right) - \lambda_{i,c} (1 - \delta) s'_{i2,c} = 0, \quad (6)$$

$$\beta (u'_{i2,c} - d'_{i2,c}) - \lambda_{i,c} = 0, \quad (7)$$

$$\lambda_{i,c} (s_{i2,c} - \bar{s}_{i2}) = 0, \lambda_{i,c} \geq 0, \quad (8)$$

根据一阶条件可知, 在有 IEA 的情景下, 国家  $i$  在对第 1 期污染排放进行决策时, 由于第 1 期污染排放没有受到限制, 国家  $i$  会一直排放到一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利等于 0 的量。

一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利包括两部分:

- 1) 一单位第 1 期污染排放给自身第 1 期带来的边际净福利  $u'_{i1,c} - d'_{i1,c}$ ;
- 2) 一单位第 1 期污染排放给自身第 2 期带来的边际净福利

$$\beta(1 - \delta) \left( u'_{i2,c} s'_{i2,c} - d'_{i2,c} \left( 1 + \sum_{i=1}^I s'_{i2,c} \right) \right) - \lambda_{i,c} (1 - \delta) s'_{i2,c}.$$

在有 IEA 的情景下, 国家  $i$  在对第 2 期污染排放进行决策时, 由于第 2 期污染排放受到限制, 因此, 国家  $i$  会一直排放到一单位第 2 期污染排放给自身带来的边际净福利等于一单位污染排放的影子价格  $\lambda_{i,c}$ ; 并且一单位污染排放的影子价格  $\lambda_{i,c}$  总是大等于 0。

### 2.4 各种情景的均衡结果比较与经济阐释

首先, 有下列结论(文中所有的引理和结论的证明见附录),

**引理 1** 预期到 IEA 会生效, 并会在第 2 期实施环境友好政策, 则任意国家  $i$  的第 2 期的均衡污染排放量必须控制在核定的允许排放量  $s_{i2,c} = \bar{s}_{i2} \leq s_{i2,nc}$ , 即任意国家  $i$  的第 2 期的均衡污染排放量等于其初始污染排放权数量。

根据引理 1, 则有

$$s'_{i2,c} = 0. \quad (9)$$

将式(3)代入式(2), 可以得到无 IEA 情景下的一阶条件

$$u'_{i1,nc} - d'_{i1,nc} + \beta(1 - \delta) d'_{i2,nc} \left( s'_{i2,nc} - \left( 1 + \sum_{i=1}^I s'_{i2,nc} \right) \right) = 0, \quad (10)$$

$$u'_{i2,nc} - d'_{i2,nc} = 0. \quad (11)$$

将式(9)代入式(6), 从而得出得到有 IEA 情景下  $s_{i1,c}$  的新的—阶条件, 进一步得到有 IEA 情景下的新的

一阶条件

$$u'_{i1,c} - d'_{i1,c} - \beta(1 - \delta)d'_{i2,c} = 0, \quad (12)$$

$$\beta(u'_{i2,c} - d'_{i2,c}) = \lambda_{i,c} \geq 0. \quad (13)$$

1) 由于第 1 期的污染排放经过自然衰减后会形成第 2 期的污染存量, 影响各国的第 2 期的污染排放和福利; 但是, 第 2 期的污染排放却不会影响第 1 期污染存量以及各国的福利. 换言之, 各国在进行第 1 期污染排放决策时, 需要考虑第 1 期污染排放对第 2 期的福利影响, 实现污染排放在第 1 期和第 2 期之间的最优分配; 但在进行第 2 期污染排放决策时, 只要考虑第 2 期污染排放对第 2 期福利的影响, 而不要考虑其对第 1 期的福利影响.

2) 在对第 2 期污染排放进行决策时, 在无 IEA 的情景下, 各国会一直排放到单位污染排放给自身带来的边际福利等于 0 的量; 在有 IEA 情景下, 各国第 2 期的污染排放量等于其初始污染排放权核配置量, 并且单位污染排放给自身带来的边际福利大等于 0.

3) 在对第 1 期污染排放进行决策时, 由于第 1 期污染排放均没有受到限制, 因此, 在任何情景下, 国家  $i$  均会一直排放到一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利等于 0 的量.

在任何情景下, 各国一单位第 1 期污染排放给自身带来的边际净福利包括两部分: 一单位第 1 期污染排放给自身第 1 期带来的边际净福利和一单位第 1 期污染排放给自身第 2 期带来的边际净福利.

在任何情景下, 各国一单位第 1 期污染排放给自身第 1 期带来的边际净福利都一样. 在不同情景下, 各国一单位第 1 期污染排放给自身第 2 期带来的边际净福利存在差异, 在有 IEA 情景下为  $\beta(1 - \delta)d'_{i2,c}$ , 在无 IEA 情景下为  $\beta(1 - \delta)d'_{i2,nc}((1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc}) - s'_{i2,nc})$ . 这是因为在有 IEA 情景下, 根据引理 1, 任意国家  $i$  的第 2 期污染排放已经确定, 即等于其核配的允许污染排放量, 因此, 第 1 期的单位污染排放给放给第 2 期带来的影响就仅来自一个方面, 即第 1 期的污染排放形成第 2 期污染初始存量  $S_2$  对第 2 期造成边际影响  $d'_{i2,c}$ .

在无 IEA 情景下, 任意国家  $i$  的第 2 期污染排放不确定, 并且所有国家的污染排放总量也不确定, 因此, 第 1 期的单位污染排放给放给第 2 期带来的影响来自三个方面:

1) 第 1 期的污染排放形成第 2 期污染初始存量  $S_2$  对第 2 期造成边际影响  $d'_{i2,nc}$ ;

2) 第 2 期污染初始存量  $S_2$  对国家  $i$  的第 2 期污染排放选择的影响  $s'_{i2,nc}$ ;

3) 第 2 期污染初始存量  $S_2$  对所有国家的第 2 期污染排放总量的影响  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc}$ , 其中  $s'_{i2,nc}$  和  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc}$  均为所谓的反馈效应.

### 3 预期 IEA 对各期污染排放量和污染存量的影响分析与经济阐释

#### 3.1 预期 IEA 对各期污染排放量的影响

引理 1 的结论已经揭示了预期 IEA 对各国第 2 期污染排放量的影响, 即预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策的情景下, 预期 IEA 对各国第 2 期污染排放量的影响. 下面将探讨预期 IEA 对各国第 1 期污染排放量的影响.

**引理 2** 在没有 IEA 的情景下, 对于任意国家  $i$ , 一定有  $s'_{i2,nc} < 0$ ,  $1 > 1 + \sum_{\bar{i}} s'_{\bar{i}2,nc} > 0$  以及  $-1 < s'_{i2,nc} < 0$ , 即任意国家  $i$  的第 2 期污染排放量随第 2 期的初始污染存量减少而增加, 二者之间存在单调递减关系.

同时, 根据引理 1, 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则任意国家  $i$  的第 2 期的均

衡污染排放量等于其初始污染排放权数量, 即

$$s_{i2,c} = \bar{s}_{i2}. \quad (14)$$

式(14)右边的  $\bar{s}_{i2}$  是一个固定值, 故  $s_{i2,c}$  与  $S_{1,c}$  无关. 于是有以下结论.

**引理 3** 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 任意国家  $i$  的第 2 期污染排放与第 2 期的初始污染存量无关.

在引理 3 的基础上, 有下列结论.

**引理 4** 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则一定有  $\frac{\partial \sum_i s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0$  和  $(1 - \delta) \frac{\partial \sum_i s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 > 0$ , 即所有国家第 1 期污染排放总量随着任意一个国家第 2 期的初始污染排放权核配量的减少而增加, 二者之间存在单调递减关系. 任意国家  $i$  第 1 期污染排放量与任意一个国家第 2 期的初始污染排放权核配量之间的关系则不明朗.

根据引理 4, 如果第 2 期实施环境友好政策, 则该环境友好政策对单个国家的第 1 期污染排放量的影响都是不明确的; 不过, 该环境友好政策对所有国家的第 1 期污染排放总量是明确的负影响, 即环境友好政策越严格, 则所有国家的第 1 期污染排放总量则越多.

### 3.2 预期环境政策对各期污染排放存量的影响

根据引理 4, 有

$$\frac{\partial S_{2,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial \left( \left( S_1 + \sum_{i=1}^I s_{i1,c} \right) (1 - \delta) \right)}{\partial \bar{s}_{i2}} = (1 - \delta) \sum_{i=1}^I \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0. \quad (15)$$

根据式(16), 可以推知

$$\frac{\partial S_{f,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial \left( \left( S_{2,c} + \sum_{i=1}^I s_{i2,c} \right) (1 - \delta) \right)}{\partial \bar{s}_{i2}} = \left( (1 - \delta) \sum_{i=1}^I \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) (1 - \delta) > 1. \quad (16)$$

由此得到下列结论.

**引理 5** 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则一定有  $\frac{\partial S_{2,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0$  和  $\frac{\partial S_{f,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} > 0$ , 即, 第 1 期污染存量随着任意一个国家第 2 期的初始污染排放权核配量的减少而增加, 二者之间存在单调递减关系; 第 2 期污染存量随着任意一个国家第 2 期的初始污染排放权核配量的减少而减少, 二者之间存在单调递增关系.

此外, 还可以进一步得出下列结论.

**引理 6** 第 2 期污染排放总量相同的情况下, 按照不同环境政策情景下第 1 期污染排放的决策原则来决定第 1 期污染排放, 则一定有,  $s_{i1,c} < s_{i1,nc}$ , 即, 任意国家  $i$  第 1 期的污染排放量的比较情况是, 有 IEA 的情景的排放量比无 IEA 情景的排放量多.

根据引理 6, 如果将各国第 2 期的初始污染排放权数量设定在无环境政策情景下的均衡排放水平, 即  $\bar{s}_{i2} = s_{i2,nc}$ , 则此时, 任意国家  $i$  第 1 期的污染排放量的比较情况是, 有 IEA 的情景的排放量比无 IEA 情景的排放量多, 这是由于预期 IEA 的反馈效应<sup>[18]</sup>所导致的.

根据以上推导, 有以下结论.

**结论 1** 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 与无 IEA 的情景相比, 第 1 期的污染存量变多还是变少则不明确, 不过, 第 2 期的污染存量都将减少.

该结论无法确定预期 IEA 是否会导致弱绿色悖论——环境政策引致短期污染排放增加的现象, 即预

期 IEA 在某些情况下会引起弱绿色悖论, 在某些情况下不会引起弱绿色悖论, 具体取决于预期的 IEA 严格程度, 预期 IEA 的反馈效应大小等因素; 不过, 该结论也强调了预期 IEA 一定有利于最终的污染存量控制。

### 3.3 经济阐释

不管在何种环境政策情景下, 第 1 期的单位污染排放给第 1 期带来的边际净福利均为  $u'_{i1} - d'_{i1}$ . 由于  $u''_{i1} - d''_{i1} < 0$ , 因此不管在何种环境政策情景下, 第 1 期的单位污染排放给第 1 期带来的边际净福利均是递减。

在不同的环境政策情景下, 各国第 2 期污染排放行为受到限制的程度不一样, 因此, 各国第 1 期的单位污染排放给其第 2 期带来边际净福利的折现值则不一样. 其中, 无 IEA 情景为

$$\beta(1-\delta)d'_{i2,nc} \left( \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{i2,nc} \right) - s'_{i2,nc} \right), \quad (17)$$

有 IEA 情景为  $\beta(1-\delta)d'_{i2,c}$ .

根据引理 3 有  $s'_{i2,nc} < 0$ . 因此, 相同的第 2 期排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i2}$  下, 对于任意的第 1 期污染排放量总有  $\beta(1-\delta)d'_{i2,nc} \left( \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{i2,nc} \right) - s'_{i2,nc} \right) < \beta(1-\delta)d'_{i2,c}$ , 无 IEA 情景下的第 1 期的单位污染排放给其第 2 期带来边际净福利折现值小于有 IEA 情景. 而根据前文的分析, 不管在何种环境政策情景下, 在对第 1 期污染排放进行决策时, 各国都要在第 1 期和第 2 期之间进行污染排放的最优跨期选择, 使第 1 期的单位污染排放给第 1 期带来的边际净福利等于该单位污染排放给其第 2 期带来边际净福利折现值. 又由于第 1 期的单位污染排放给第 1 期带来的边际净福利均是递减, 因此, 在相同的第 2 期排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i2} = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2} \leq \sum_{i=1}^I s_{i2,nc}$  下, 无 IEA 情景下的第 1 期污染排放量一定会大于有 IEA 情景, 此即引理 6 的结论. 将有 IEA 情景和污染排放总量控制且有交易机制情景的第 2 期污染排放核配量设定为无 IEA 情景下的均衡水平

$$\sum_{i=1}^I s_{i2,c} = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2} = \sum_{i=1}^I s_{i2,nc}. \quad (18)$$

根据前面的分析, 由于反馈效应的存在, 一定有无 IEA 情景下的第 1 期污染排放量一定会大于有 IEA 情景.

根据引理 5, 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 一定有

$$\frac{\partial S_{1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial S_{1,c}}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial S_{1,c}}{\partial \varphi} < 0,$$

其中  $\varphi = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2}$ .

第 1 期污染存量随着任第 2 期的核配总量的减少而增加, 二者之间存在单调递减关系. 因此, 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 与无 IEA 的情景相比, 有 IEA 情景, 第 1 期的污染存量变多还是变少则不明确.

根据引理 5, 又预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则一定有

$$\frac{\partial S_{f,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial S_{f,c}}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial S_{f,c}}{\partial \varphi} > 0,$$

其中  $\varphi = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2}$

第 2 期污染存量随着第 2 期的核配中量的减少而减少, 二者之间存在单调递增关系. 结合式(18), 因此, 在有 IEA 机制的情景下, 第 2 期的污染核配总量不多于无 IEA 下的均衡排放量, 则最终的污染存量一定会比无 IEA 下的污染存量减少. 综上所述, 实施环境友好政策, 都会导致最终污染排放总量的减少, 确保环境政策有效.

### 4 实例分析

设定  $S_1 = 0, \delta = 0, \beta = 1$ , 有国家 1 和国家 2, 即  $I = 2$ . 国家 1 的污染排放收益函数和损害函数分别是  $u_{1t}(s_{1t}) = 4s_{1t}^{\frac{1}{2}}$  和  $d_{1t}(S_t + \sum_{i=1}^I s_{it}) = \frac{1}{2}(S_t + \sum_{i=1}^I s_{it})^2$ ; 国家 2 的污染排放收益函数和损害函数分别是  $u_{2t}(s_{2t}) = 2s_{2t}^{\frac{1}{2}}$  和  $d_{2t}(S_t + \sum_{i=1}^I s_{it}) = \frac{1}{2}(S_t + \sum_{i=1}^I s_{it})^2$ .

#### 4.1 无 IEA 情景下的均衡结果分析

根据基本设定, 并结合无 IEA 情景下的均衡条件式(2)和式(3), 求解得到无 IEA 情景下的均衡结果(见表 2).

表 2 无 IEA 情景下的均衡结果  
Table 2 Equilibrium of no IEA scenario

变量分类	变量	均衡值
各国各期污染排放量	国家 1 第 1 期污染排放量 $s_{11}$	0.572 9
	国家 1 第 2 期污染排放量 $s_{12}$	0.965 7
	国家 2 第 1 期污染排放量 $s_{21}$	0.255 1
	国家 2 第 2 期污染排放量 $s_{22}$	0.241 4
各期最终污染存量	第 1 期最终污染存量 $S_2$	0.828 0
	最终污染存量 $S_f$	2.035 1

#### 4.2 有 IEA 情景下的均衡结果分析

根据基本设定, 并结合有 IEA 情景下的均衡条件式(6)~式(8), 求解得到有 IEA 情景下的均衡结果. 其中, 图 1 描述了国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  的关系.

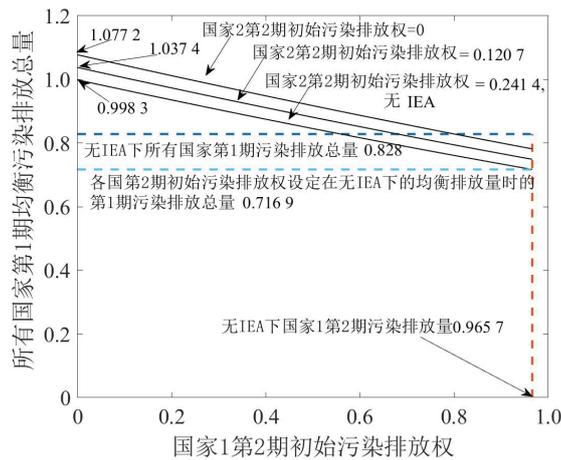


图 1 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  的关系

Fig. 1 Relationship between  $\bar{s}_{12}$  and  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$

图 1 中, 横轴表示国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$ , 纵轴表示所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$ . 图中的 3 条实线“国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0 时的关系曲线”, “国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0.1207 时的关系曲线”和“国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0.2414 时(无 IEA 时)的关系曲线”分别

描述了“国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0$  时, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  关系曲线”, “国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0.1207$  时, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  的关系曲线”和“国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0.241$  时, 即, 无 IEA 时的水平, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  的关系曲线”。

从图 1 可以看出: 1) 所有国家第 1 期污染排放总量随着国家 1 第 2 期的初始污染排放权数量的减少而增加; 2) 由于污染物的自然衰减率  $\delta = 0$ , 因此, 第 1 期污染存量等于第 1 期污染排放总量, 从而有, 第 1 期污染存量随着国家 1 第 2 期的初始污染排放权核配量的减少而增加; 3) 所有国家第 2 期的初始污染排放权数量设定在无 IEA 时的均衡排放量时, 所有国家第 1 期污染排放总量为 0.716 9, 少于无 IEA 时的第 1 污染排放总量 0.828 0, 减少的 0.111 1 是由预期 IEA 的反馈效应所致; 4) 当所有国家第 2 期的排放数量控制为 0 时, 即, 实施最严格的控制政策下, 所有国家第 1 期污染排放总量达到了最大值 1.077 2; 5) 在有 IEA 下, 所有国家第 1 期污染排放总量, 有可能多于, 也有可能少于, 无 IEA 时的均衡排放量, 即, 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 与无 IEA 的情景相比, 第 1 期的污染存量变多还是变少则不明确。

图 2 描述了国家 2 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{22}$  与所有国家第 1 期均衡污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  关系, 从图 2 也可以得到类似的上述 5 点结论。

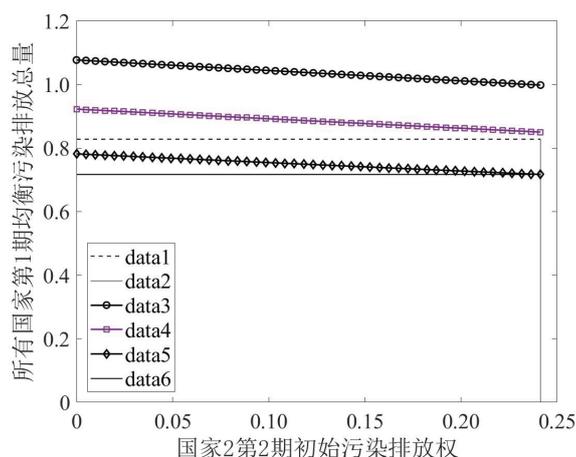


图 2 国家 2 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{22}$  与所有国家第 1 期污染排放总量  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$  的关系

Fig. 2 Relationship between  $\bar{s}_{22}$  and  $\sum_{i=1}^I s_{i1}$

注: data1: 无 IEA 下所有国家第 1 期污染排放总量 = 0.828 0; data2: 无 IEA 下国家 2 第 2 期污染排放量 = 0.241 4; data3: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0; data4: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0.482 9; data5: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0.965 7(无 IEA); data6: 各国初始污染排放权设定在无 IEA 下的均衡排放时的第一期污染排放总量 = 0.716 9。

图 3 描述了国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  关系, 图 3 中, 横轴表示国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$ , 纵轴最终污染存量  $S_{f,c}$ 。图中的 3 条实线“国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0 时的关系曲线”, “国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0.120 7 时的关系曲线”和“国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0.241 4 时(无 IEA 时)的关系曲线”分别描述了“国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0$  时, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  的关系曲线”, 国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0.120 7$  时, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  的关系曲线和“国家 2 第 2 期初始污染排放权  $\bar{s}_{22} = 0.241 4$  时, 即, 无 IEA 时的水平, 国家 1 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  的关系曲线”。

从图 3 可以看出, 1) 最终污染存量随着国家 1 第 2 期的初始污染排放权核配量的减少而减少, 二者之间

存在单调递增关系; 2) 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 与无 IEA 的情景相比, 最终的污染存量都将减少; 3) 所有国家第 2 期的初始污染排放权数量设定在无 IEA 时的均衡排放量时, 最终污染存量为 1.924, 少于无 IEA 时的最终污染存量 2.035 1; 4) 当所有国家第 2 期的排放数量控制为 0 时, 即, 实施最严格的控制政策下, 最终污染存量达到了最小值 1.077 2.

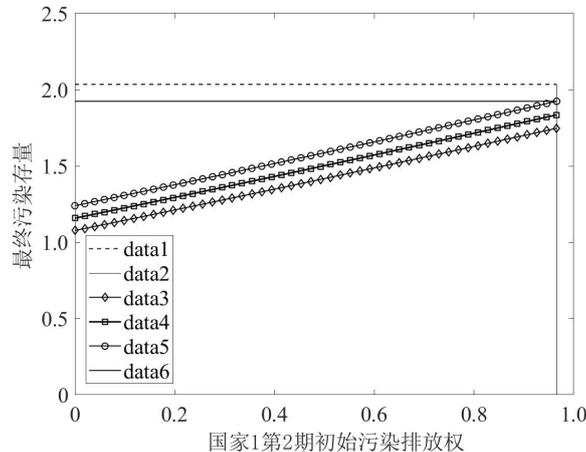


图3 国家1第2期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{12}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  关系

Fig. 3 Relationship between  $\bar{s}_{12}$  and  $S_{f,c}$

注: data1: 无 IEA 下最终污存量 = 2.035 1; data2: 无 IEA 下国家 1 第 2 期污染排放量 = 0.965 7; data3: 国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0; data4: 国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 0.120 7; data5: 国家 2 第 2 期初始污染排放权 = 2.414 0(无 IEA); data6: 各国第 2 期初始污染排放权设定在无 IEA 下的均衡排放量时的最终污染存量 = 1.924 0

图 4 描述了国家 2 第 2 期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{22}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  关系. 同样, 从图 4 也可以得到类似的这 4 点结论.

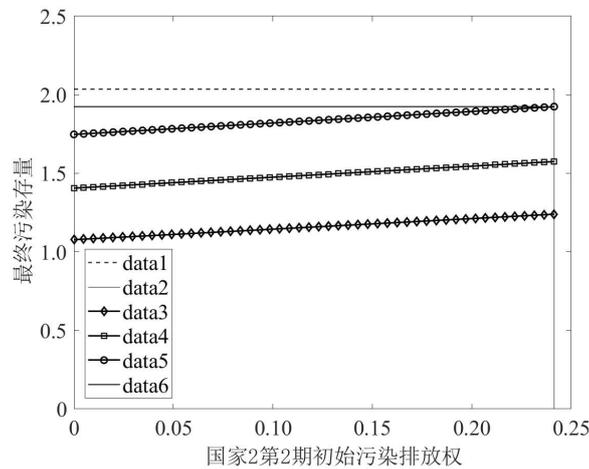


图4 国家2第2期初始污染排放权数量  $\bar{s}_{22}$  与最终污染存量  $S_{f,c}$  关系

Fig. 4 Relationship between  $\bar{s}_{22}$  and  $S_{f,c}$

注: data1: 无 IEA 下最终污存量 = 2.035 1; data2: 无 IEA 下国家 2 第 2 期污染排放量 = 0.241 4; data3: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0; data4: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0.482 9; data5: 国家 1 第 2 期初始污染排放权 = 0.965 7(无 IEA); data6: 各国第 2 期初始污染排放权设定在无 IEA 下的均衡排放量时的最终污染存量 = 1.924 0

## 5 结束语

本文考虑经济主体是异质的情况, 通过构建一般均衡模型分析了预期 IEA 对各国各期污染排放量以及各期污染存量的影响. 研究表明, 预期到 IEA 会生效, 并且会在第 2 期实施环境友好政策, 则在各国各

期污染排放量方面,全部国家第1期污染排放总量随着任意一个国家第2期的初始污染排放权的核配量的减少而增加,二者之间存在单调递减关系,但,单个国家第1期污染排放量与任意一个国家第2期的核配量之间的关系则不明朗;在各期污染存量方面,与无IEA的情景相比,有IEA情景下,第1期的污染存量变多还是变少不明确,不过,最终的污染存量必将减少,该结论强调了环境友好政策对于控制最终污染存量的积极作用.上述结论同样适用于IEA在第2期的环境友好政策的实施存在不确定性的情景.

不过,本文的结论莫基于一个假设:各国污染排放收益函数是严格递增和严格凹,各国的损害函数是严格递增和严格凸.尽管该假设条件也是现有大部分文献的基础假设之一,但对于放宽该假设条件下的结论分析,则是未来研究的拓展方向之一.

### 参考文献:

- [1] Breton M, Sbragia L, Zaccour G. Dynamic models for international environmental agreements. *Environmental & Resource Economics*, 2010, 45(1): 25–48.
- [2] Barrett S. The theory of international environmental agreements. *Handbook of Environmental Economics*, 2005, 3(5): 1457–1516.
- [3] Sinclair P J N. On the optimum trend of fossil fuel taxation. *Oxford Economic Papers*, 1994, 46(4): 869 – 877.
- [4] Strand J. Technology treaties and fossil-fuels extraction. *Energy Journal*, 2007, 28(4): 129–141.
- [5] Sinn H. Public policies against global warming: A supply side approach. *International Tax and Public Finance*. 2008, 15(4): 360–394.
- [6] Gerlagh R. Too much oil. *Cesifo Economic Studies*, 2011, 57(1): 79–102.
- [7] 李玉婷. 气候政策的绿色悖论文献述评. *现代经济探讨*, 2015(8): 90–94.  
Li Y T. Literature review of the green paradox of climate policy. *Modern Economic Research*, 2015(8): 90–94. (in Chinese)
- [8] Ploeg F V D. Cumulative carbon emissions and the green paradox. *Annual Review of Resource Economics*, 2013, 5(1): 281–300.
- [9] Edenhofer O, Kalkuhl M. When do increasing carbon taxes accelerate global warming: A note on the green paradox. *Energy Policy*, 2011, 39(4): 2208–2212.
- [10] 李程宇, 邵 帅. 可预期减排政策会引发“绿色悖论”效应吗: 基于中国供给侧改革与资本稀缺性视角的考察. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1184–1200.  
Li C Y, Shao S. Would the expected emission reduction policy lead to “green paradox” effect: An investigation based on the supply side reform and capital scarcity in of China. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(5): 1184–1200. (in Chinese)
- [11] Hoel M. Is there a green paradox. *CESifo Working Paper Series*, 2010, 100(11): 1999–2030.
- [12] Grafton R Q, Kompas T, Long N V, et al. US biofuels subsidies and CO<sub>2</sub> emissions: An empirical test for a weak and a strong green paradox. *Energy Policy*, 2014, 68(5): 550–555.
- [13] Di Maria C, Smulders S, van der Werf E. Absolute abundance and relative scarcity: Environmental policy with implementation lags. *Ecological Economics*, 2012, 74: 104–119.
- [14] Smulders S, Tsur Y, Zemel A. Announcing climate policy: Can a green paradox arise without scarcity. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2012, 64(3): 364–376.
- [15] Ritter H, Schopf M. Unilateral climate policy: Harmful or even disastrous. *Environmental & Resource Economics*, 2014, 58(1): 155–178.
- [16] Bauer N, McGlade C, Hilaire J, et al. Divestment prevails over the green paradox when anticipating strong future climate policies. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 130–134.
- [17] Kollenbach G. Unilateral climate policy and the green paradox: Extraction costs matter. *Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d’Economie*, 2019(3): 1036–1083.
- [18] Ömer T. Açıkgöz, Benchekroun H. Anticipated international environmental agreements. *European Economic Review*, 2017, 92: 306–336.
- [19] Beccherle J, Tirole J. Regional initiatives and the cost of delaying binding climate change agreements. 2011, 95(11): 1339–1348.
- [20] Smulders S, Tsur Y, Zemel A. Announcing climate policy: Can a green paradox arise without scarcity. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2012, 64(3): 364–376.
- [21] Ploeg F V D, Withagen C. Global Warming and the green paradox: A review of adverse effects of climate policies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2015, 9(2): 285–303.

- [22] Ploeg F V D. Second-best carbon taxation in the global economy: The green paradox and carbon leakage revisited. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2016, 78: 85–105.
- [23] Baumol W J, Oates W E. *The theory of environmental policy*. Second Edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 36–47.
- [24] 程发新, 袁 猛, 孙立成, 等. 复合碳减排政策下闭环供应链网络均衡决策. *系统工程学报*, 2019, 34(4): 483–496.  
Cheng F X, Yuan M, Sun L C, et al. Equilibrium decision research of closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(4): 483–496. (in Chinese)

### 作者简介:

王 炎 (1980—), 男, 福州闽清人, 博士, 教授, 研究方向: 资源与环境经济学, Email: 55780836@qq.com.

### 附录

#### 引理 1 的证明

可以通过反证法证明  $s_{i2,c} = \bar{s}_{i2} \leq s_{i2,nc}$ . 假设  $s_{i2,c} \neq \bar{s}_{i2}$ , 有

$$s_{i2,c} < \bar{s}_{i2} \leq s_{i2,nc}. \quad (\text{A.1})$$

根据式(A.1)和式(8), 式(7)变为

$$\beta \cdot (u'_{i2,c} - d'_{i2,c}) = \lambda_{i,c} = 0. \quad (\text{A.2})$$

在这种情况下, 有 IEA 情景的模型(式(4))的一阶最优条件变成式(6)和式(A.2), 和无 IEA 情景下的模型(式(1))的一阶最优条件式(2)与式(3)一致, 从而二者具有一样的解, 即

$$s_{i2,c} = s_{i2,nc}, s_{i1,c} = s_{i1,nc}. \quad (\text{A.3})$$

式(A.3)和式(A.1)相互矛盾, 因此, 证得  $s_{i2,cnt} = \bar{s}_{i2}$ .

证毕.

#### 引理 2 的证明

将式(3)两边对  $S_{2,nc}$  求导得

$$\frac{\partial U_i^2}{\partial s_{i2,nc} \partial S_{2,nc}} = \beta \left( u''_{i2,nc} s'_{i2,nc} - d''_{i2,nc} \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \right) \right) = 0 \Rightarrow u''_{i2,nc} s'_{i2,nc} - d''_{i2,nc} \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \right) = 0. \quad (\text{B.1})$$

进而有

$$s'_{i2,nc} = \frac{d''_{i2,nc}}{u''_{i2,nc}} \left( 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \right). \quad (\text{B.2})$$

假设  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \geq 0$ , 根据式(B.2), 则有  $s'_{i2,nc} < 0 (\forall i)$ , 进而有  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} < 0$ , 从而与假设  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \geq 0$  矛盾. 因此, 有

$$\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} < 0. \quad (\text{B.3})$$

假设存在  $s'_{\bar{i}2,nc} \geq 0 (\exists \bar{i})$ , 根据式(B.2), 则有  $1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \leq 0$ , 进而可以进一步推知  $s'_{i2,nc} \geq 0 (\forall i)$  和  $\sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} \geq 0$ , 这些将会与式(B.3)矛盾. 因此, 对于任何国家  $i$  均有

$$s'_{i2,nc} < 0. \quad (\text{B.4})$$

根据式(B.2), 式(B.3)和式(B.4), 则有

$$1 > 1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s'_{\bar{i}2,nc} > 0 \quad (\text{B.5})$$

根据式(B.4)和式(B.5), 则有  $-1 < s'_{i2,nc} < 0$ .

证毕.

引理 4 的证明

将式(12)两边对  $\bar{s}_{i2}$  求导, 则有

$$u''_{i1,c} \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} - d''_{i1,c} \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} - \beta(1-\delta) d''_{i2,c} \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) = 0. \tag{C.1}$$

由于  $\frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial S_2} \frac{\partial S_2}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial S_2}$ , 式(C.1)整理得到

$$\frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial S_2} = \frac{d''_{i1,c}}{u''_{i1,c}} \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + \frac{\beta(1-\delta) d''_{i2,c}}{u''_{i1,c}} \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right). \tag{C.2}$$

对式(C.2)两边加总得到

$$\sum_{i=1}^I \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\sum_{i=1}^I \left( d''_{i1,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + \beta(1-\delta) \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) \sum_{i=1}^I \left( d''_{i2,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right)}{\prod_{i=1}^I u''_{i1,c}}. \tag{C.3}$$

假设  $\sum_{\bar{i}} \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} \geq 0$ , 则可以推知

$$\sum_{i=1}^I \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\sum_{i=1}^I \left( d''_{i1,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + \beta(1-\delta) \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) \sum_{i=1}^I \left( d''_{i2,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right)}{\prod_{i=1}^I u''_{i1,c}} < 0. \tag{C.4}$$

式(C.4)与假设  $\sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} \geq 0$  矛盾, 同时结合  $\frac{\partial \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}}$ , 因此有

$$\frac{\partial \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0. \tag{C.5}$$

假设  $(1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \leq 0$ , 根据式(C.3), 则有

$$\sum_{i=1}^I \frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \frac{\sum_{i=1}^I i^I \left( d''_{i1,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + \beta(1-\delta) \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) \sum_{i=1}^I \left( d''_{i2,c} \prod_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I u''_{\bar{i}1,c} \right)}{\prod_{i=1}^I u''_{i1,c}} > 0. \tag{C.6}$$

式(C.6)与式(C.4)相互矛盾, 同时结合  $\frac{\partial \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} = \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}}$ , 因此有

$$(1-\delta) \frac{\partial \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 > 0. \tag{C.7}$$

根据式(C.5), 则有

$$d''_{i1,c} \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0. \quad (\text{C.8})$$

根据式(C.7), 则有

$$\beta(1-\delta) d''_{i2,c} \left( (1-\delta) \sum_{\bar{i}=1}^I \frac{\partial s_{\bar{i}1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} + 1 \right) > 0. \quad (\text{C.9})$$

根据式(C.2), 式(C.8)和式(C.9),  $\frac{\partial s_{i1,c}}{\partial \bar{s}_{i2}}$  可能大于 0, 可能小于 0, 也可能等于 0, 即, 任意国家  $i$  第 1 期污染排放总量与任意一个国家第 2 期的初始污染排放权核配置量之间的关系则不明朗. 证毕.

### 引理 6 的证明

令

$$h(s) = u'_{i1} - d'_{i1} - \beta(1-\delta)d'_{i2}. \quad (\text{D.1})$$

式(D.1)中, 第 2 期污染排放总量满足  $\sum_{i=1}^I s_{i2} \leq \sum_{i=1}^I s_{i2,nc}$ . 对式(D.1)求导得到

$$h'(s) = u''_{i1} - d''_{i1} - \beta(1-\delta)d''_{i2} < 0. \quad (\text{D.2})$$

则, 根据式(12), 有 IEA 的情景下, 有

$$h(s_{i2,c}) = u'_{i1,c} - d'_{i1,c} - \beta(1-\delta)d'_{i2,c} = 0. \quad (\text{D.3})$$

则, 根据式(10), 无 IEA 情景原则的排放量, 有

$$h(s_{i2,nc}) = u'_{i1,nc} - d'_{i1,nc} - \beta(1-\delta)d'_{i2,nc} = \beta(1-\delta)d'_{i2,nc} \sum_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I s'_{i2,nc}. \quad (\text{D.4})$$

根据引理 3, 有  $s'_{i2,nc} < 0$ . 结合式(D.3)和式(D.4), 则有

$$\beta(1-\delta)d'_{i2,nc} \sum_{\bar{i}=1, \bar{i} \neq i}^I s'_{i2,nc} < 0. \quad (\text{D.5})$$

结合式(D.2)和式(D.5), 有  $s_{i2,c} < s_{i2,nc}$ .

证毕.

### 结论 1 的证明

将各国第 2 期污染核配置量界定在无 IEA 的情景下的排放水平, 即,  $\bar{s}_{i2} = s_{i2,nc}$ . 根据引理 1 和引理 2, 有

$$s_{i2,c} = \bar{s}_{i2} = s_{i2,nc} \Rightarrow \sum_{i=1}^I s_{i2,c} = \sum_{i=1}^I \bar{s}_{i2} = \sum_{i=1}^I s_{i2,nc}. \quad (\text{E.1})$$

再根据引理 6, 则有

$$s_{i1,c} < s_{i1,nc}. \quad (\text{E.2})$$

根据式(E.2)进而有

$$S_{2,c} = \left( S_1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,c} \right) (1-\delta) < S_{2,nc} = \left( S_1 + \sum_{\bar{i}=1}^I s_{\bar{i}1,nc} \right) (1-\delta). \quad (\text{E.3})$$

根据引理 5, 即,  $\frac{\partial S_{2,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0$ , 并结合式(E.3), 因此, 可知: 无 IEA 情景相比, 有 IEA 情景下第 1 期的污染存量, 变多还是变少, 则不明确. 再结合式(E.1), 式(E.2)和式(E.3), 因此, 在  $\bar{s}_{i2} = s_{i2,nc}$  时有

$$S_{f,c} < S_{f,nc}. \quad (\text{E.4})$$

根据引理 5, 即,  $\frac{\partial S_{f,c}}{\partial \bar{s}_{i2}} < 0$ , 并结合式(E.4), 因此, 在  $\bar{s}_{i2} \leq s_{i2,nc}$  时, 均有  $S_{f,c} < S_{f,nc}$ .

证毕.