科学通报 2016 年 第 61 卷 第 7 期: 771 ~ 781
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于博弈论的全球减排合作方案

刘昌新, 王铮*, 田园

中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190
* 联系人, E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn.

2015-07-17 收稿, 2015-11-20 修回, 2015-11-23 接受, 2016-02-01 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2012CB955800)资助

摘要 本文提出了一个新的全球碳减排合作原则, 并在博弈分析的框架下, 用集成评估模型EMRICES平台模拟计算, 给出了一个全球减排合作方案. 该方案首先可以保证2100年全球升温不超过2℃目标, 并可以实现各国的累积福利比没有减排约束下的结果好, 即具有帕累托改进特性. 此外, 该方案还在帕累托改进原则的基础上考虑了基于"共同但有区别"的公平问题. 最后, 本文针对重要参数贴现率做了敏感性分析. 结果显示, 贴现率的变动不影响非合作的纳什均衡, 但会改变方案的帕累托改进的解集. 具有更高贴现率的国家, 其帕累托改进的空间将越小. 由于贴现率的大小在一定程度上取决于消费增长速度, 且许多发展中国家的消费增长速度高于发达国家, 因此本文认为在国际气候谈判中, 需要考虑发展中国家与发达国家之间存在的贴现率差异, 从而更好地体现全球减排合作的公平.

关键词 气候保护, 气候博弈, 国际合作, 碳减排

目前, 世界各国已经认识到需要携手应对气候变化, 国际上已经就对应对气候变化举行了多轮谈判. 2014年发表了《中美气候变化联合声明》, 随后许多国家陆续提出了各自的自主减排方案, 这是国际上国家间联合应对气候变化问题的一个进步. 然而, 应对气候变化还需要更多国家付出更多的努力. 而发展经济与减少碳排放量对很多国家而言, 始终是一种矛盾的选择, 这样就形成了各国在二氧化碳减排问题上的博弈. 各个国家在全球碳减排合作问题上的博弈的根本出发点就是维护自己国家的利益不受损失, 甚至是最大化自己的利益. 那么, 是否存在一个对大家都有利的减排方案? 如果有, 又应该如何去构建这样的方案?

对于减排方案的研究国内外有很多[1~5], 这些研究提出的减排方案很多是基于单一原则提出, 比如"人均碳排放均等"[3]、"累积人均碳排放均等"[4]、"平稳增长减排方案"[6]等等. 这些研究为促进全球达成减排协议有积极的意义, 但它们都没有考虑到各个国家对减排方案的接受意愿, 因此也很难促成各国达成统一减排方案. 博弈论方法可以考虑到各国对方案的接受意愿, 并且还能考虑到对其他国家或地区的减排力度的反馈, 因此基于博弈视角研究全球减排合作具有重大意义. 目前, 许多学者已经就全球温室气体减排的博弈展开了分析. 这方面的研究大致可以分为2类: 一类是研究全球就气候保护中某个局部问题进行探讨. 比如Scheffran和Pickl[7]讨论联合履约机制下的国际合作的可能. Babiker[8]采用CGE模型, 在博弈框架下研究了京都议定书的附件一国家执行减排承诺的可能性. Caparros等人[9]讨论了在不完全信息下的发达国家和不发达国家的碳减排博弈问题. Kemfert等人[10]讨论了国际贸易影响下的各国气候减排合作问题. Haurie等人[11]构建了一个基于碳

引用格式: 刘昌新, 王铮, 田园. 基于博弈论的全球减排合作方案. 科学通报, 2016, 61: 771–781
Liu C X, Wang Z, Tian Y. Global cooperation on carbon mitigation by applying game theory (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 771–781, doi: 10.1360/N972015-00817

© 2016《中国科学》杂志社

排放交易的微分博弈模型. Tavoni等人[12]采用实验经济学的办法, 模拟了具有不同禀赋的人群在不确定环境下的减排合作的问题. 另一类模型则关注于全球实现减排的方案的达成, 如Fankhauser和Kverndokk[13]将全球划分为5个区域, 并研究各国的博弈策略情况. Yang和Sirianni[14]采用RICE模型, 研究了各国非合作的纳什均衡, 并讨论了在"不变色"的原则下碳配额分配的可行性. 这些研究所采用的模型有的是基于综合评估模型(integrated assessment model, IAM)提出, 比如Kemfert等人[10]以及Yang和Sirianni[14]的工作分别基于WAGEM模型和RICE模型完成, 这些模型对气候变化以及经济发展方面都有详细的描述. 而其他的研究中所采用的模型则简化了这些方程, 更侧重于博弈机制的表达. 但这些模型有一些共同的缺陷, 首先这些模型更多的是将博弈策略限定在基准情景的减排率上, 并没有从全球碳排放总量控制角度出发研究问题. 而实现IPCC减排目标的实际有效的减排方案应当是总量减排. 第二, 这些模型很少从气候伦理学角度考虑问题. 王铮等人[15]认为减排方案的帕累托改进这可能是导致全球达成一致的减排方案的根本保障. 本文在气候变化伦理学的基础上, 采用我们开发的EMRICES模型, 模拟分析了全球碳减排的各国博弈结果.

鉴于二氧化碳的公共品特性, 在没有全球减排约束的情况下. 各个国家在没有减排约束下的减排行为实质上是一个非合作的纳什均衡博弈, 即各个国家的减排策略会相互影响福利变化, 同时各个国家都为了自己的福利最大而决策, 选择自己的最优的减排策略. 因此, 判断每一个国家能否从减排方案中获利的标准是: 减排方案能比纳什均衡给该国带来更大的福利. 本文目的就是寻求满足帕累托改进原则的全球减排方案.

1 分析框架

1.1 模型

评估气候变化与经济发展之间的相互影响, 国际上一般采用集成评估模型, 即IAM来研究, 它将经济模块和气候模块结合在一起, 用于评估气候变化的经济损失和减排措施的成本[16]. 本文所采用的IAM模型是EMRICES(Enforced Muilt-factor Regional Climate and Economy System)[17], 它是在RICE基础上发展而来的模型. RICE最初是由Nordhaus和Yang[18]开发的. 在过去的几十年中, RICE模型在IAM模型中扮演了很重要的角色. 在IPCC报告的第2, 3和4次评估报告中均能找到RICE模型的影子. EMRICES将全球划分为8个区域, 它保留了RICE原有的模型优势, 即将气候变化因子作为生产要素影响经济. 同时也克服了模型的一些不足之处, 比如通过GDP溢出模块, 将全球经济的相互影响刻画了出来, 适合研究碳减排的国家经济外部性, 从而更好地反映减排政策. 同时, EMRICES考虑了内生技术进步, 即技术的进步依赖于研发资本的累积[17]. 这些改进既加强了区域经济之间的联系, 又反映了技术进步的实质. 目前, 应用EMRICES已经对一些减排方案战略评估[17]. 本文就是以EMRICES为基础, 研究全球各个国家的减排合作博弈行为.

1.2 全球减排形势

IPCC提出了全球气候变化的控制目标, 即2100年全球的温度不超过2℃. 国际上也普遍认为实现2100年全球的温度不超过2℃必然要求全球碳排放总量减少[1,2]. 那么控制2100年全球的温度不超过2℃, 全球未来还有多少排放空间? 采用EMRICES气候模块, 并假设每年的全球碳排放量线性变化, 通过模拟可知, 如果要控制2100年全球温度不超过2℃, 那么至2100年的全球碳排放量为3.18 GtC, 模型初始年份2010年的全球碳排放量是8.2 GtC, 也就是全球2100年的碳排放量要降低至2010年的38.8%. 而2010年中等收入国家的人均二氧化碳排放量为3.46 $GtCO_2$, 是全球人均二氧化碳排放量为4.88 $GtCO_2$的70.9%. 这意味着即便从人均二氧化碳排放量均等的角度考虑, 在全球2℃目标下, 包括中等收入国家在内的绝大多数国家都要面临着总量减排, 否则目标很难实现. 因此, 全球温度上升控制在2℃以内的目标必然要求全球参与CO_2总量减排. 本文就要研究在全球参与CO_2总量减排的博弈过程中, 如何达成全球的减排协议.

1.3 全球减排合作原则讨论

为了认识博弈基础, 我们需要对全球合作减排的一些伦理学原则进行讨论. 本文认为在总的减排目标下, 即2100年全球升温不超过2℃的目标下, 全球减排合作方案总的原则有两点. 第一, 方案能被全球各个国家和地区接受. 能被全球接受的减排方案

具有一个经济意义上的特性: 全球各个国家和地区都能从该方案中获益, 即满足帕累托改进原则, 或者换句话讲, 各国的利益都不能因为该方案而受到损害. 因为二氧化碳是全球最大的公共品, 从福利经济学角度看, 全球减排的目的是为了增进人类的福利. 对一个国家来说, 也是如此. 一个国家参与减排的动力是, 该国能从减排方案中获益. 第二, 从公平角度出发, 尽可能维护发展中国家的发展机会, 因为发达国家在全球变暖问题上, 负有历史责任, 国际气候谈判中强调的"共同但有区别"原则也是基于发达国家的历史排放责任而考虑的. 然而, 帕累托改进原则与"共同但有区别"的原则之间有一定的冲突, 帕累托改进原则强调参与减排的国家累积福利比不减排时要高, 但充分保证发达国家的利益就将弱化"共同但有区别"的原则. 本文为了协调这种矛盾, 在设定全球合作减排方案时, 对发达国家, 保障其累积福利不受损失, 即尽可能使发达国家参与减排的累积福利与不减排时一致. 与此同时, 最大化发展中国家的利益. 这也是从公平角度出发, 尽可能考虑发展中国家的利益.

在全球气候减排博弈中, 存在一个谈判底线, 任何国家如果它的收益低于这个底线, 则该国将不会接受谈判方案. 而各个国家的谈判底线正是非合作下的纳什均衡. 换言之, 一个国家合作的条件是参加合作时的收益比它追求自己利益最大时的收益要大. 保障各个国家在合作减排时的收益高于谈判底线, 就满足了帕累托改进原则.

综上所述, 本文设计减排方案的原则有3点: 第一, 满足减排要求, 具体为2100年的全球温度不超过2℃; 第二, 满足帕累托改进原则; 第三, 在帕累托改进原则下最大化发展中国家的累积福利, 同时最小化发达国家的累积福利改善程度. 如果将这三点看成是合作减排的3个目标, 那么这3个目标之间并不完全一致, 存在顾此失彼的情况, 本文是将2℃目标以及实现帕累托原则这两个目标赋予了最高优先级, 而"共同但有区别"的原则属于次优级别的目标. 这样做的目的是想寻找2℃目标下的在经济学意义上能被接受的全球合作减排的可能方案.

2 博弈设计与模拟

2.1 福利与公平

首先需要明确各个国家或地区比较自己合作与不合作的利益评判标准是什么. 在经济学中, 习惯采用福利作为利益最大的追求目标. 而福利一般被定义为消费量的函数. 为简明起见, 设$y=U(C)$表示福利. 其中C表示消费量. 则, $U(C)$满足$\frac{\partial U}{\partial C}>0$, $\frac{\partial U^2}{\partial^2 C}<0$. 本文也遵循这一原则. 具体的形式为$U(C)=\frac{(C/L)^{1-\tau}}{1-\tau}$, $\tau<1$, 其中τ为风险厌恶系数. τ值越大, 则消费的增加带来的福利上升就越不明显. L表示人口数.

减排的收益体现在未来相当长的一段时间里的利益总和. 实际上减排在初始阶段, 各个国家的利益总是会下降的, 减排带来的气候变化的收益在未来能得到很好的体现. 因此, 本文将福利值定义为起始年至2100年的累积福利值. 并通过折旧与贴现的办法将未来的福利值贴现到当前, 计算累积福利的现值. 同时本文计算的是相应国家或地区的总人口的福利值. 具体的形式为

$$U_i(n)=\sum_{t=1}^{n}(1+\rho)^{-t}L_{i,t}\frac{\left(C_{i,t}/L_{i,t}\right)^{1-\tau}}{1-\tau}. \quad (1)$$

在本研究中, 考虑了公平因素. 在追究发达国家的历史责任的情况下, 我们认为公平可以定义为: 在实现全球减排目标的前提下, 对发达国家或地区, 减排方案应力求不损害其累积福利; 对发展中国家, 应尽可能改善其累积福利.

2.2 全球区域与减排策略

在本研究的博弈框架中, 全球的各个国家是博弈参与者, 减排率是博弈策略, 博弈的收益为博弈参与者的累积福利值. 前面已经论述, 由于全球气候变化控制目标为2100年温度不超过2℃, 无论是全球还是具体到发展中国家都应采取总量减排. 因此将博弈的策略设为: 相对于基准年份, 至2050年, 各个国家或地区的总量减排率. 基准年份设定的时间越早, 则后期的碳排放空间就越少. 以1990和2005年为基准年份具有一定的国际公认性. 欧盟提出的目标是2020年比1990年减少30%, 到2050年则减少80%. 《美国清洁能源安全法案》提出到2020年的排放量比2005年减少17%, 到2050年比2005年减少83%. Stern方案以及Nordhuas方案中也均以2005和1990年作为基准年份设定减排方案. 为了体现"共同但有区别"

原则, 对于发达国家, 本文设定其减排的基准年份为1990年, 而发展中国家的基准年份为2005年. 各个国家或地区的划分以及相应的基准年份见表1.

设博弈G有8个博弈参与者. 即对应于EMRICES中的8个国家或地区. 每个博弈参与者的策略空间为$S_1, S_2, \cdots, S_8$, $s_{ij} \in S_i$表示博弈方i的第j个策略, j个策略分别代表减排率从0到1, 以0.1为间隔的11个策略, 即S_i={0, 0.1, 0.2,⋯, 0.9, 1}. 其中$j \in$ {1, 2, ⋯, 11}. 若s_{i2}=0.1, 则表示博弈参与者i的第2个策略为: 至2050年, 该国或地区的碳排放总量比基准年份的减少10%. 博弈方的收益为u_i, 表示第i个国家或地区至2100年的累积福利值. 此博弈可以写作G={S_1, ⋯, S_8; u_1, ⋯, u_8}.

本文将全球分为8个区域, 因此有8个博弈参与者. 每个参与者有11个策略, 因此一共有11^8个策略组合. 可以通过两张表格说明此博弈格局. 表2反映的是8个国家或地区的博弈策略组合情况. 表中的数据表示各个国家或区域的减排策略. 表3反映的是各个组合策略下的博弈收益情况. 其中, $u_i^{(j)}$表示第i个国家在第j个策略组合下的累积福利值.

2.3 纳什均衡求解及结果

由于EMRICES的系统复杂, 很难从解析的角度给出该博弈的纳什均衡解, 需要重新设计该问题的求解算法. 本文设计算法如下: 首先给定任意一组策略$\left(s_1^0, s_2^0, \cdots, s_8^0\right)$作为初始解. 然后在$\left(s_{ij}, s_2^0, \cdots, s_8^0\right)$中计算最优的减排策略$s_1^1$, 使得第1个国家或地区的福利值$u_1$最大. 并依次对第2, 第3, 直至第$n$个国家或地区采取同样的办法计算最优的减排策略. 如果该轮计算后, 策略没有发生变动. 即$\left(s_1^1, s_2^1, \cdots, s_8^1\right)=\left(s_1^0, s_2^0, \cdots, s_8^0\right)$, 则停止计算. 否则开始新一轮的计算. 直至$\left(s_1^k, s_2^k, \cdots, s_8^k\right)=\left(s_1^{k-1}, s_2^{k-1}, \cdots, s_8^{k-1}\right)$. 则此时的纳什均衡为$\left(s_1^*, s_2^*, \cdots, s_n^*\right)=\left(s_1^k, s_2^k, \cdots, s_8^k\right)$. 计算流程如图1所示. 在EMRICES系统中, 国家之家的相互经济影响有两种: 一方面是每个国家的经济变动会通过GDP溢出机制影响其他国家, 其影响机制来源于全球国际贸易关系; 另一方面, 各个国家的经济增长以及福利都受到气候变化的影响, 一个国家的减排会影响到大气碳浓度以及全球温度, 进而影响到其他

表 1 各个国家或地区的基准年份

Table 1 The benchmark year of countries and regions

国家或地区	基准年份	国家或地区	基准年份
中国	2005年	高发展中国家	2005年
美国	1990年	中发展中国家	2005年
日本	1990年	低发展中国家	2005年
欧盟	1990年	其他发达国家	1990年

表 2 博弈策略组合

Table 2 Game strategy profile

策略组合	中国	美国	日本	欧盟	其他发达国家	高发展中国家	中发展中国家	低发展中国家
策略组合1	0	0	0	0	0	0	0	0
策略组合2	0.1	0	0	0	0	0	0	0
策略组合3	0.2	0	0	0	0	0	0	0
策略组合4	0.3	0	0	0	0	0	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…

表 3 策略组合下的各国累积福利值

Table 3 The accumulated welfares under strategy profile

策略组合	中国	美国	日本	欧盟	其他发达国家	高发展中国家	中发展中国家	低发展中国家
策略组合1	$u_1^{(1)}$	$u_2^{(1)}$	$u_3^{(1)}$	$u_4^{(1)}$	$u_5^{(1)}$	$u_6^{(1)}$	$u_7^{(1)}$	$u_8^{(1)}$
策略组合2	$u_1^{(2)}$	$u_2^{(2)}$	$u_3^{(2)}$	$u_4^{(2)}$	$u_5^{(2)}$	$u_6^{(2)}$	$u_7^{(2)}$	$u_8^{(2)}$
策略组合3	…	…	…	…	…	…	…	…
策略组合4	…	…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…

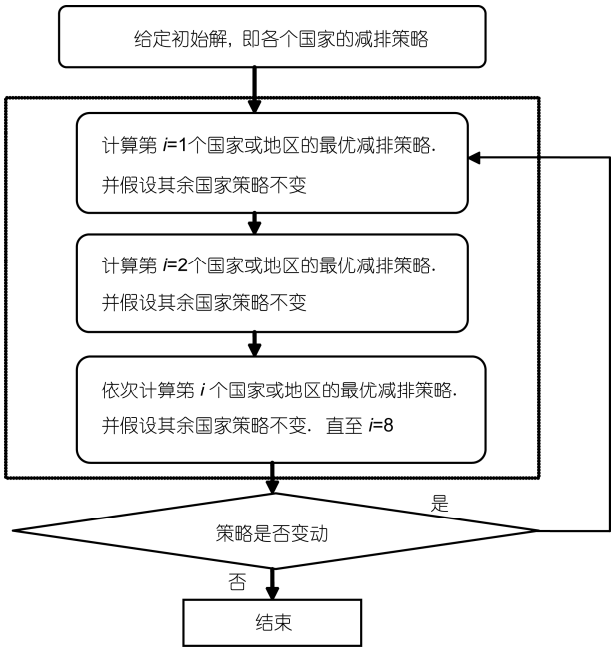

图 1 求解博弈的计算算法流程图

Figure 1 The algorithm of the solution to the Nash equilibrium

国家的福利值. 这两种机制的影响程度由EMRICES平台计算得出.

本文以EMRICES为平台, 采用如图1的计算算法, 分别以初始值(0,0,0,0,0,0,0,0), (0.1,0.1,0.1,0.1, 0.1,0.1,0.1,0.1), (0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.2), …, (1, 1,1,1,1,1,1,1), 计算该博弈的纳什均衡解. 最后计算发现, 在这些给定的初始值下, 最后的稳定解均为(0,0,0,0,0,0,0,0). 即所得的纳什均衡解都是各个国家或地区不采取总量减排.

为了防止漏解, 本文将每个国家的策略集丰富为S_i={0, 0.05, 0.1, …, 0.95, 1}, 其最后计算结果仍然为(0,0,0,0,0,0,0,0).

博弈的结果说明, 如果各个国家或地区都为了各自的利益最大, 其结果将是大家都不会采用总量减排的策略. 然而, 采取合作可以使得各个国家或地区的状况得到改善. 所以气候保护问题, 如果全球不能通过协商解决问题, 大家势必会陷入一种囚徒困境的状态中.

2.4 最终方案的确定

本文在EMRICES平台上搜寻有效帕累托方案, 在考虑公平性因素的情况下(即对发达国家或地区保持不损害其累积福利, 对发展中国家或地区, 在2℃目标下尽可能大的改善其累积福利), 得到方案A满足要求. 方案A的具体减排要求为: 中国2050年比2005年减少20%的碳排放总量; 美国2050年比1990年减少碳排放总量63%; 日本2050年比1990年减少碳排放85%; 欧盟2050年比1990年碳排放量减少85%; 高发展中国家2050年比2005年碳排放量减少50%; 中发展中国家2050年比2005年碳排放量减少20%; 其他发达国家2050年比1990年碳排放总量减少82%. 在该方案下, 2100年地表温度为1.996℃. 因此全球的温度上升在2100年之前可以控制在2℃以内. 图2反映了该方案下的地表温度以及海洋温度变化趋势. 在这种方案下, 全球碳排放量在2050年之前持续下降, 2050年全球碳排放量达到3.6 GtC, 2050~2100年维持2050年的排放水平. 全球二氧化碳当量浓度持续上升, 但上升速度逐渐变缓, 2100年达到474.62 ppmv(1 ppmv=1 μL/L). 辐射强迫的上升速度也逐渐降低, 2100年达到3.6 W/m^2. 与IPCC的RCP情景相比, 本方案介于RCP4.5与RCP2.6之间, 在RCP2.6情景中, 21世纪后半叶二氧化碳将进入负排放, 这意味着RCP2.6情景将比本方案的减排力度更加严格, 最主要的差别在于2050年之后, 本方案要求各个国家维持2050年的水平即可, 而RCP2.6要求碳排放量持续下降. 从气候变化的结果上看, 两者的差别在于, RCP2.6情景下, 全球碳浓度将在2100年之前达到峰值, 全球温度将永远不会超过2℃, 而本方案, 碳浓度值虽然增速下降, 但在2100年之前并未达到峰值, 只能保证2100年之前温度不会超过2℃, 2100年之后温度仍然有可能突破2℃.

需要说明的是, 由于美国当前的福利值较高, 当美国的减排率过高时, 至2100年其累积福利得不到改善. 而中国的减排率低于高发展中国家的减排率主要是考虑到中国在世界经济中的地位以及中国目前较低的人均碳排放量水平. 如果中国的减排率过高, 不仅是中国的人均碳排放量水平得不到改善, 并且由于中国经济对世界经济的拉动作用, 过度减排, 会使得世界经济受到影响.

从累积福利变化角度(图3), 至2100年, 中国的累积福利值比全球减排不合作时纳什均衡时高出1.84%; 美国的累积福利值高出0.01%; 日本高出0.38%; 欧盟高出0.19%; 高发展中国家高出0.88%; 中发展中国家高出1.66%; 低发展中国家高出3.21%; 发达国家高出0.001%. 即各个国家的福利值均好于

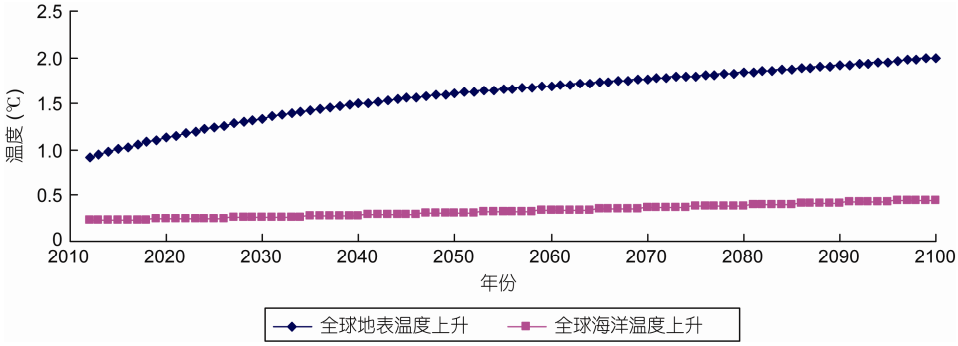

图 2 (网络版彩色)方案A的温度变化趋势

Figure 2 (Color online) The temperature change trend chart of Scheme A

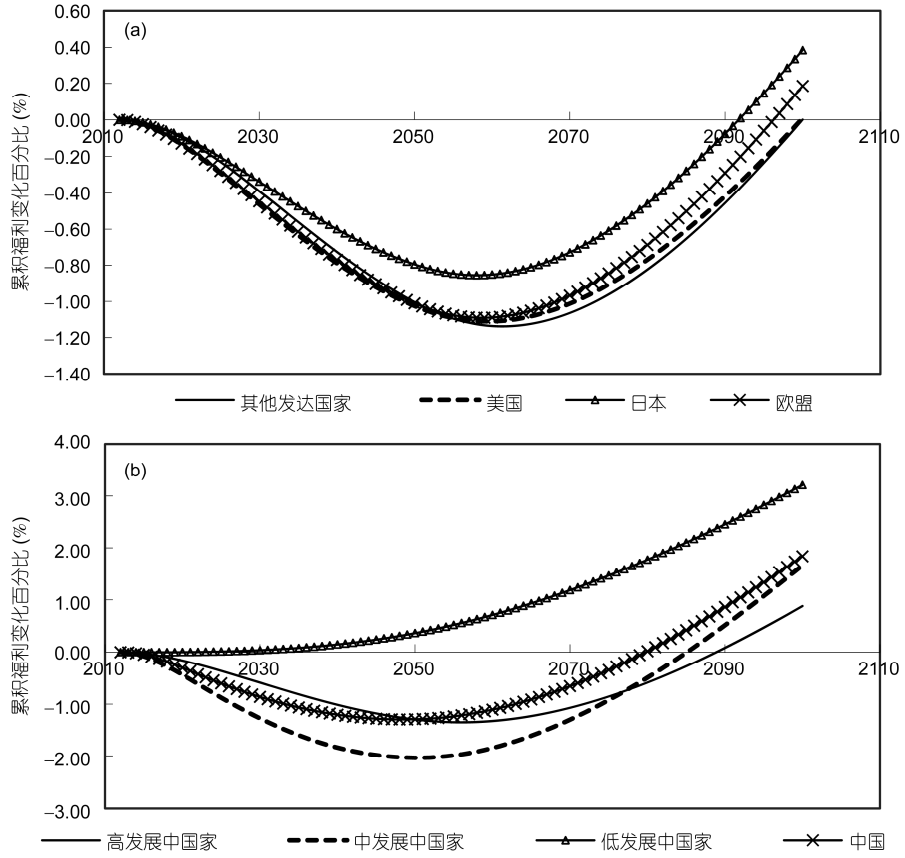

图 3 发达国家(a)和发展中国家(b)的累积福利变化百分比

Figure 3 Cumulative welfare change rate of developed countries (a) and developing countries (b)

非合作的纳什均衡的福利值, 因此方案A满足帕累托最优.

总之, EMRICES的计算结果显示, 合作的方案比大家都不减排的效果要好, 这是“囚徒困境”的有效解决途径. 由于帕累托改进方案的不唯一性, 可以搜寻出其他的帕累托改进方案, 如方案B(表4). 在方案B下, 全球温度在2100年将上升1.991℃. 各个国家或地区的累积福利值相比于基准情景(即纳什均衡)的变动率见表4. 容易发现该方案也是一个帕累托改进方案.

根据结果可知, 如果考虑2100年温度上升不超过2℃, 那么在其他的帕累托改进方案下, 发展中国家减排总体并不会减排减少. 主要原因在于发展中国家的碳排放量占全球的碳排放比例已经比较高,

表 4　合作减排方案B

Table 4　Carbon mitigation cooperation Scheme B

	中国	美国	日本	欧盟	发达国家	高发展中国家	中发展中国家	低发展中国家
方案B	0.23	0.6	0.9	0.9	0.8	0.4	0.3	0
累积福利相比基准情景变动率	1.63%	0.02%	0.31%	0.075%	0.05%	1.07%	1.26%	3.22%

在保障发达国家的累积福利不受损失时, 发展中国家必须做出减排牺牲才能实现2℃目标. 如果充分考虑共同但有区别的责任, 留给发展中国家足够的发展空间, 即减少发展中国家的减排量, 那么在全球升温不超过2℃的目标与帕累托改进原则之中, 必须二者舍其一. 若要求2100年全球温度上升不超过2℃, 那么发达国家的累积福利必须有所损失, 将不再满足帕累托改进原则. 若要坚持帕累托改进的原则, 那么2℃的目标将被突破. 因此, 在2℃目标、帕累托改进原则以及共同但有区别的原则这3个目标几乎不可能同时达到最理想的状态, 所以在设计减排方案时需要对3个目标赋予不同的优先级. 本文中提及的全球合作减排方案主要是将2℃目标以及帕累托改进原则赋予了最高的优先级, 而共同但有区别的原则为次优级, 即在2℃目标以及帕累托改进原则的强力约束下, 最大化发展中国家的累积福利, 并最小化发达国家的累积福利. 在实际气候变化的谈判中, 3个目标之间的优先级次序还会有所争议. 此外, 对于如何通过碳配额的分配来量化“共同但有区别”的原则, 本身也是国际气候谈判中争议较大的问题. 但是从福利经济学角度考虑, 帕累托改进方案是一种比较理想的方案.

3　方案的参数敏感性分析

模型中涉及到很多参数, 许多学者对IAM的重要参数做过讨论, 尤其是对福利计算中的跨期贴现率的分析, Nordhaus的贴现率为3%(每年), Stern的贴现率为0.1%(每年). 本文所采用的贴现率为1.5%. 贴现率上的差异也引来了众多学者的争论[19~22]. 贴现率体现了人们现在对未来利益的重视程度, 贴现率越高, 说明人们越不重视未来的福利或者认为未来的福利贴现到现在的值小, 反之, 则说明人们越重视未来的福利. Beckerman和Hepburn[23]则把贴现率的争论上升到伦理问题, 认为这是反映代际公平的重要参数.

根据经济增长理论, 贴现率的大小实际取决于3个方面: 纯时间偏好率、边际效用弹性和消费增长率[24]. 纯时间偏好率与边际效用弹性体现的是人们对于代际公平的认识和偏好. 消费增长率与经济增长相关, 经济增长越快的国家, 其消费增长率也会较快. 消费增长率越高, 贴现率将会越大. 假设世界各个国家对代际公平的认识基本一致, 那么区别各个国家的贴现率将最终取决于各个国家经济增长率. 增长越快的国家, 其贴现率越高. 在EMRICES模型中, 保留的RICES模型在贴现率方面的设置特点, 即全球采用统一的贴现率计算. 但我们可以考察不同的贴现率对方案的评估的影响.

3.1　贴现率对纳什均衡的影响

通过在EMRICES中更改贴现率的参数, 从0.01%至3%, 按0.5%为间隔计算, 发现纳什均衡点始终为全球各个国家都不采取总量减排策略, 在可考虑的贴现率范围内, 贴现率不影响纳什均衡点. 它的政策含义是尽管在不同的贴现率情况下, 累积福利值有较大的差异, 但如果各个国家从自己的福利最大的原则出发, 仍然不会采取总量减排行动.

3.2　贴现率对方案帕累托改进性质的影响

在纳什均衡点不受贴现率影响的情况下, 可以进一步考察不同贴现率对减排方案的帕累托改进原则是否能得到满足. 分别计算Stern贴现率以及Nordhaus贴现率下方案A的结果.

Stern贴现率为0.1%时, 各国的累积福利改善程度将更大(和纳什均衡比), 发展中国家的累积福利改善程度仍大于发达国家. 减排方案满足帕累托改进原则.

Nordhaus贴现率为3%的情景. 在该贴现率下, 各国的累积福利改善程度将变小(和EMRICES情景比), 发展中国家的累积福利能得到改善, 发达国家的累积福利得不到改善. 减排方案不满足帕累托改

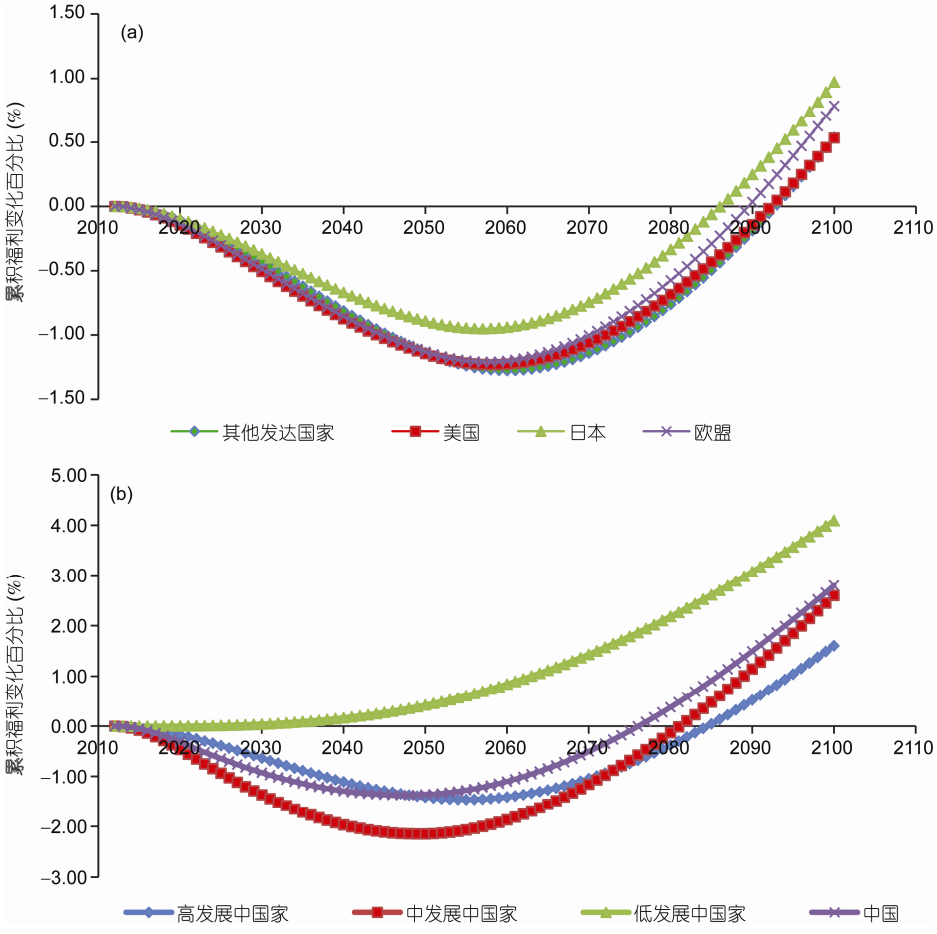

图 4 Stern贴现率下发达国家(a)和发展中国家(b)的累积福利变化

Figure 4 Cumulative welfare change rate of developed countries (a) and developing countries (b) under Stern's discount rate

进原则(图5).

模拟结果表明: 当贴现率变高时, 原方案的帕累托改进原则可能会被打破, 满足帕累托改进原则的方案的范围也会缩小. 当贴现率变低时, 原方案的帕累托改进原则不会被打破, 满足帕累托改进原则的方案的范围也会扩大. 这主要是因为当贴现率变高时, 人们不重视未来的福利. 而减排的福利变动特点是: 前期由于减排二氧化碳的福利会受到降低, 而后期的福利会由于温度降低带来的经济损失的减小而增加. 因此, 当人们更看重现在时, 近期的福利损失会比远期的福利增加要大, 从而帕累托改进方案的范围也会随着缩小.

一个显然的结论是: 一个国家的贴现率越高, 其累积福利越不容易被改善. 从而, 其参与减排的可能性就越小. 不同国家的贴现率之间可能是存在差异的[25]. 总体而言, 发展中国家目前处于高速基础设施更新与建设之中, 经济增长较快; 而发达国家的基础设施已经基本建设完毕, 经济增长平稳而缓慢. 因此发展中国家的贴现率可能会高于发达国家. 考虑这种情况, 发展中国家参与减排的任务可能比方案A的减排率还要低.

4 主要结论

(1) 本研究从建立能被全球接受的全球减排合作方案出发, 提出了全球减排合作方案的3个原则. 第一, 实现全球气候变化控制目标, 即2100年全球温度不超过2℃. 第二, 满足帕累托改进原则, 即各个国家的累积福利都能从减排方案中获益. 第三, 在前两个目标的基础上尽可能体现"共同但有区别"的原则. 在此基础上, 本研究提出了一个满足这3个原则的方案. 为我国未来气候谈判提供了一定的理论支持.

针对重要参数——贴现率——本文考察了它对非

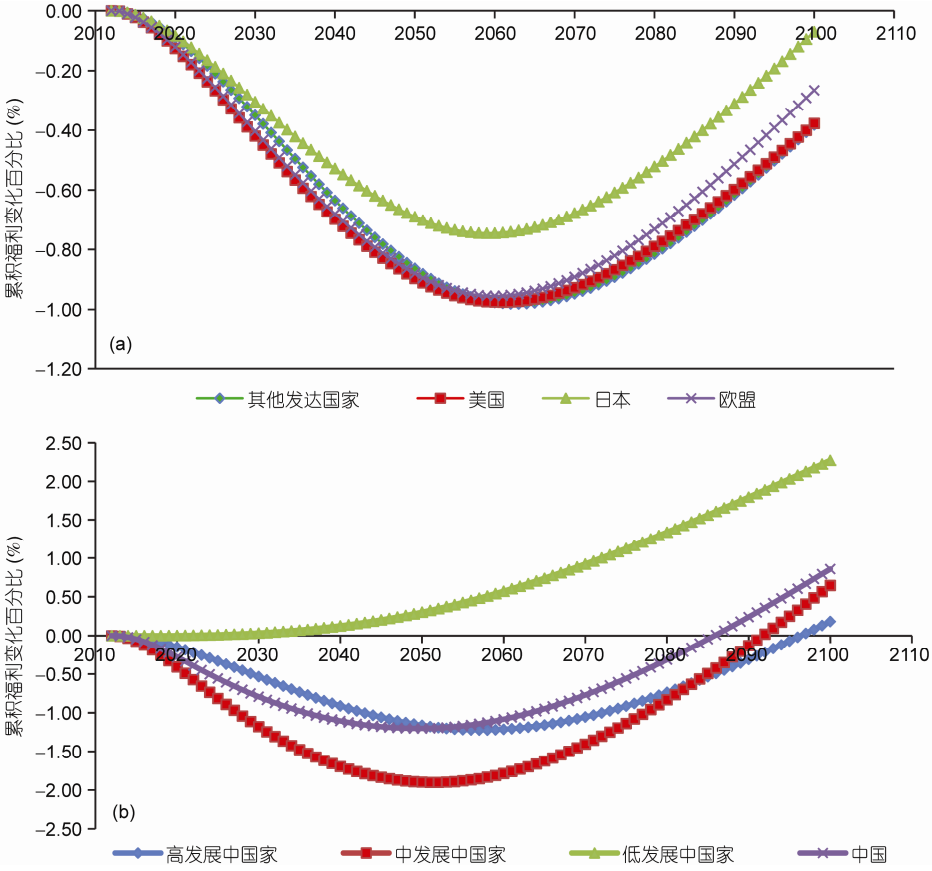

图 5 Nordhaus贴现率下发达国家(a)和发展中国家(b)的累积福利变化

Figure 5 Cumulative welfare change rate of developed countries (a) and developing countries (b) under Nordhaus's discount rate

合作博弈均衡的影响以及对减排方案满足帕累托改进原则的特性的影响.

(2) 贴现率不影响纳什均衡. 即无论人们把未来看得多重要(重要程度不超过现在, 因为贴现率为正), 如果各个国家都只为了是自己利益最大化, 最终的结果是大家都不会采取总量减排的策略.

(3) 贴现率会影响到方案的帕累托改进的特性. 在本文中, 当贴现率为1.5%时, 方案A为帕累托改进方案; 贴现率为0.1%时, 方案A仍然满足帕累托改进原则, 且帕累托改进程度较贴现率为1.5%时更大; 贴现率为3%时, 方案A不再满足帕累托改进原则. 显然, 贴现率的大小对全球碳减排方案是否满足帕累托改进原则有决定性的作用. 总的来说, 贴现率越低, 满足帕累托改进特性的方案就越多, 反之亦然. 具体来说, 如果一个方案满足帕累托改进原则, 那么当采用新的贴现率计算时, 只要小于原方案所采用的贴现率的值, 就一定满足帕累托改进的特性; 如果大于原方案所采用的贴现率时, 则未必会满足帕累托改进的特性.

(4) 出于数据获取的困难, 本文模型中采用的各个国家的贴现率统一. 但发展中国家处于基础设施更新与建设的高速发展时期, 其贴现率会远高于发达国家. 如果考虑这一点, 本文设计的减排方案A可能还要被修正, 即发展中国家的减排率会降低. 换句话说, 如果考虑到贴现率的差异情况, 方案A高估了发展中国家的累积福利改善程度.

参考文献

1 Nordhaus W, Boyer J. Warming the world: The economics of the greenhouse effect. Cambridge, MA: Massachusettes Institute of Technology Press, 2000

2 Stern N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. London: Cambridge University Press, 2007
3 Chen W Y, Wu Z X, He J K. Two-convergece approach for future global carbon permit allocation (in Chinese). J Tsinghua Univ (Sci Tech), 2005, 45: 324–346 [陈文颖, 吴宗鑫, 何建坤. 全球未来碳排放权"两个趋同"的分配方法. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45: 324–346]
4 Ding Z L, Duan X N, Ge Q S, et al. Control of atmospheric CO_2 concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 52: 1447–1469 [丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO_2 浓度控制: 各国排放权计算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1009–1027]
5 Wang Z, Wu J, Zhang S, et al. Integrated assessment of the economics of climate change: Modeling, implementation and applications (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2012, 5: 595–601 [王铮, 吴静, 张帅, 等. 寻求合理的全球碳减排方案——气候变化经济学集成评估: 建模、开发与系统应用. 中国科学院院刊, 2012, 5: 595–601]
6 Wang Z, Wu J, Zhu Q T, et al. MRICES: A new model for emission mitigation strategy assessment and its application. J Geogr Sci, 2012, 22: 1131–1148
7 Scheffran J, Pickl S. Control and game-theoretic assessment of climate change: Options for joint implementation. Ann Oper Res, 2000, 97: 203–212
8 Babiker M H. The CO_2 abatement game: Costs, incentives, and the enforceability of a sub-global coalition. J Econ Dyn Control, 2001, 25: 1–34
9 Caparros A, Pereau J C, Tazdait T. North-south climate change negotiations: A sequential game with asymmetric information. Public Choice, 2004, 121: 455–480
10 Kemfert C, Lise W, Tol R S J. Games of climate change with international trade. Environ Resour Econ, 2004, 28: 209–232
11 Haurie A, Moresino F, Viguier L. A Two-level Differential Game of International Emissions Trading. Boston: Cambridge Birkhauser, 2006
12 Tavoni A, Dannenberg A, Kallis G, et al. Inequality, communication, and the avoidance of disastrous climate change in a public goods game. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 11825–11829
13 Fankhauser S, Kverndokk S. The global warming game: Simulations of a CO_2-reduction agreement. Resour Energy Econ, 1996, 18: 83–102
14 Yang Z, Sirianni P. Balancing contemporary fairness and historical justice: A 'quasi-equitable'proposal for GHG mitigations. Energ Econ, 2010, 32: 1121–1130
15 Wang Z, Liu X, Liu C X, et al. Several issues of climate change ethics (in Chinese). Chin Sci Earth Sci, 2014, 44: 1600–1608 [王铮, 刘筱, 刘昌新, 等. 气候变化伦理的若干问题探讨. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 1600–1608]
16 Lessmann K, Marschinski R, Edenhofer O. The effects of tariffs on coalition formation in a dynamic global warming game. Econ Model, 2009, 26: 641–649
17 Wang Z, Zhang S, Wu J. A new RICEs model with the global emission reduction schemes. Chin Sci Bull, 2012, 57: 4373–4380 [王铮, 张帅, 吴静. 一个新的 RICE 簇模型及其对全球减排方案的分析. 科学通报, 2012, 26: 2507–2515]
18 Nordhaus W D, Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. Am Econ Rev, 1996, 86: 741–765
19 Mendelsohn R O. A Critique of the Stern Report. Regulation, 2006, 29: 42–46
20 Stern N. Review on the economics of climate change. London: HM Treasury, 2006
21 Nordhaus W. Critical assumptions in the Stern Review on climate change. Science, 2007, 317: 201–202
22 Weitzman M L. A review of the Stern Review on the economics of climate change. J Econ Lit, 2007, 45: 703–724
23 Beckerman W, Hepburn C. Ethics of the discount rate in the Stern Review on the economics of climate change. World Econ J, 2007, 8: 187–210
24 Ramsy F P. A mathematical theory of saving. Econ J, 1928, 38: 543–559
25 Davidson M D. A social discount rate for climate damage to future generations based on regulatory law. Clim Change, 2006, 76: 55–72

Global cooperation on carbon mitigation by applying game theory

LIU ChangXin, WANG Zheng & TIAN Yuan

Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

The global carbon emission mitigation schemes would mainly determine the trends of global climate change and the global economic growth. Although many mitigation schemes were proposed by scholars and institutions, seldom of the schemes seem to satisfy countries all around the world. It is quite urgent to find a solution to mitigate climate change, which should also be acceptable by the world. Therefore, a global carbon mitigation scheme is proposed and simulated in this paper by employing game theory and using the integrated assessment model, EMRICES. Game theory is used to analysis the "free-riding" behaviors for setting the mitigation scheme. The mitigation scheme firstly grantees that the increase of global temperature is no more than 2°C till 2100. Secondly, every country participating in the scheme would benefit from the scheme comparing with the situation when there is no carbon reduction request, which is called Pareto improvement principle. Accumulated welfare is used as the index and it is a function of consumptions. Thirdly, the fairness of mitigation scheme is taken into consideration as well in the scheme according to the "common but differentiated responsibilities" principle. The Pareto improvement principle and the common but differentiated responsibilities principle may be incompatible sometimes. If developed countries' interest is adequately safeguarded, developing countries would usually bear more carbon reduction. Thus, when searching for the mitigation scheme, the two principles both as objectives are given different priorities. The Pareto improvement principle is given the primary priority. As for the common but differentiated responsibilities principle, we try to minimize the developed countries' accumulated welfares improvement and maximize the developing countries'. The scheme was searched as following: China should reduce 20% carbon emissions of 2005's level by 2050; USA should reduce 63% carbon emissions of 1990's level by 2050; Japan should reduce 85% carbon emissions of 1990's levels by 2050; EU should reduce 85% carbon emissions of 1990's levels by 2050; high developed countries should reduce 50% carbon emissions of 2005's levels by 2050; middle developed countries should reduce 20% carbon emissions of 2005's levels by 2050; developed countries should reduce 82% carbon emissions of 1990's levels by 2050. All the countries should keep the carbon emission level no more than 2050's after 2050. As the result shows, the global temperature increases by 1.996°C in 2100. The global temperature increment can be controlled within 2°C. All the countries' or regions' accumulated welfares are improved and developing countries obviously improve more than developed countries. In a word, we find a scheme that satisfies the three requirements. Finally, sensitive analysis is conducted for the important parameters. The results show that the variation of discount rate will not change the no-cooperation Nash equilibrium but it does affect the Pareto improvement solution. The higher the discount rate is, the harder would be to achieve the Pareto improvement. Developing countries' discount rates are generally higher than developed countries' due to the different economic consumption's growth rate among the countries. Thus, this factor should be considered as well in global climate negotiations for fairness.

climate protection, climate games, international cooperation, carbon mitigation

doi: 10.1360/N972015-00817