

# 基于自主体的全球碳交易模拟

朱潜挺<sup>1,2</sup>, 吴 静<sup>1</sup>, 王 铮<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 碳交易是未来全球应对气候变化的重要组成部分之一。基于 Agent 建模技术, 开发了一个包含中国、美国、日本、欧盟、前苏联地区以及世界其他地区的全球碳交易模拟系统, 并且根据人均累积排放权均等和减排目标控制原则, 设置了“丁标准”情景和“2℃目标”情景, 对全球碳交易行为展开了模拟研究。研究发现: (1) 随着碳排放权的逐年减少, 未来碳交易价格将呈上升趋势; (2) 碳交易将有助于资金从发达国家向发展中国家转移; (3) 由于碳交易允许配额缺口区域向配额盈余区域购买碳排放权, 未来发达国家的人均碳排放量仍将高于发展中国家; (4) 虽然碳交易能提高全球累计拉姆齐效用, 但无论从中国在未来碳市场中的收支情况, 还是全球福利水平的改善程度来看, “2℃目标”情景均将优于“丁标准”情景。

**关键词:** 碳交易; Agent 建模; 配额交易机制; 减排方案

**文章编号:** 1000-0585(2012)09-1547-12

## 1 引言

1997 年 12 月《京都议定书》在日本京都通过, 议定书规定, 在 2008 年至 2012 年间(即第一承诺期), 全球主要工业国家的工业二氧化碳排放量要比 1990 年降低 5.2%; 并允许这些国家在履行温室气体减排义务时可采用的三种市场交易机制: 联合履行机制(JI), 清洁发展机制(CDM)和排放贸易机制(ET)。在此基础之上, 基于配额的碳排放权交易市场在发达国家之间迅速发展起来。欧盟气候交易所于 2005 年推出了首个区域性碳排放权交易市场(EU-ETS), 并在区域碳总量控制方面起到积极作用。Stern<sup>[1]</sup>认为, 后京都时代应大力推行配额交易机制。那么, 配额交易机制是否能够在保证有效、高效和公平的原则下实现全球气候保护, 这就需要对碳排放权配额和碳排放权交易两个方面开展定量研究。

在碳排放权配额研究方面, Bohm 等<sup>[2]</sup>研究表明净人均减排费用均等化的初始配额分配方案有利于形成短期公平, 而基于人口规模的初始配额分配方案有利于形成长期公平。Kverndokk<sup>[3]</sup>研究认为按照人口规模来分配碳排放权配额是一个较好的方案, 它兼顾了公平性和可行性。Janssen 等<sup>[4]</sup>在人均碳排放权均等方案的基础上, 考察了人口规模、GDP 水平和能源使用量三个要素对区域碳排放权配额的影响。Cramton 等<sup>[5]</sup>分析了基于拍卖形

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-04-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB955804); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05150900); 国家自然科学基金资助项目(40901196)

作者简介: 朱潜挺(1981-), 男, 浙江人, 博士研究生, 主要从事政策模拟研究。

E-mail: eteng0122@foxmail.com

通讯作者: 王铮(1954-), 男, 云南人, 博导, 教授, 研究员, 主要从事政策模拟、区域科学与管理研究。

E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn

式来分配碳排放权的含义,认为拍卖式配额原则优于世袭制配额原则。然而,这些研究主要是从公平性的角度来比较配额方案优劣,缺乏对总量控制约束的研究。作为第一个具有法律约束力的国际减排协议,虽然京都议定书对主要工业国家的碳排放做出约束,但即使第一期承诺目标能够实现,其效力也相当有限<sup>[6,7]</sup>。多数学者认为,后京都时代的全球减排方案必须综合考虑发展中国家具体情况,包括历史责任、缓解行动以及对最易受影响的国家或地区的援助<sup>[8~10]</sup>。相对于国际上著名的 Stern 方案<sup>[1]</sup>、Sørensen 方案<sup>[11]</sup>等,国内学者,如丁仲礼等<sup>[12]</sup>、王铮等<sup>[13]</sup>、姜克隽等<sup>[14]</sup>也对中国及其他发展中国家参与下的全球减排方案展开了多方面研究。

在碳排放权交易研究方面, Nordhaus<sup>[15]</sup>在对经济增长与气候间相互关系的研究中指出,温室气体排放的经济问题主要表现为其具有外在性,而解决温室气体外在性问题的途径主要包括,碳税,碳交易以及管制措施。Zhang<sup>[16]</sup>认为碳交易和碳税在控制温室气体方面优于管制措施,而碳交易则优于碳税。目前,针对碳交易的建模主要有两种方法:基于 CGE 建模方法和基于 Agent 建模方法。基于 CGE 建模的相关研究有, Manne 等<sup>[17]</sup>通过建立一个五区域跨期一般均衡模型,来考察碳排放控制对国际油价、碳泄漏、碳交易的影响。Ellerman 等<sup>[18]</sup>基于 EPPA 模型(MIT 开发的一个 CGE 模型)导出边际减排成本曲线,就京都议定书框架下碳交易进行情景分析。McLibbin 等<sup>[19]</sup>采用多区域多部门跨期一般均衡模型来考察碳交易及其资金流。Szabo' 等<sup>[20]</sup>建立一个水泥行业全球动态模拟系统(CEMSIM)对欧盟以及附件 B 国家 CO<sub>2</sub> 排放交易进行模拟分析。可惜的是,这些模型都基于一个共同假设,即经济总处于均衡增长的稳态。然而均衡增长稳态的假设通常只在单一区域或者是不存在交易的情况下才能成立,在多区域交易模型中,这种假设是存在问题的<sup>[21]</sup>。与采用 CGE 建模方法对碳交易开展的研究相比,基于 Agent 建模方法的研究相对较少。Mizuta 等<sup>[22]</sup>建立了一个拍卖机制下的国际温室气体排放交易模型。Chappin<sup>[23]</sup>基于 Agent 技术来模拟欧盟碳交易对荷兰电力部门投资的影响。这些研究提供了一个基于 Agent 动态市场交易机制对复杂经济和社会环境开展模拟研究的基础,而无需依赖传统经济理论中的均衡状态假设。

纵观相关研究,国内关于碳交易的研究尚处在起步阶段,尤其是在将全球配额分配与碳交易相结合方面的定量研究相对较少。由于目前被普遍所采用的 CGE 建模方法仍无法克服其不能长期动态化的缺陷,故亟待新的研究。本文将借助 Agent 建模技术,通过建立一个全球范围的碳交易模拟系统,来探索基于配额交易机制的全球碳交易行为及其在全球气候保护中的作用。

## 2 研究方法 with 数据来源

基于 Agent 建模技术,本文构建了一个全球碳交易模型。该模型将全球划分为 6 个区域,包括:中国、美国、欧盟、日本、前苏联地区以及其他地区<sup>①</sup>,这些区域各自作为独立 Agent 参与到全球碳交易市场中。结合配额交易机制,全球碳交易模型包含两个模块,分别是配额分配模块和碳交易模块。

### 2.1 配额分配模块

配额分配模块负责对碳排放权配额的计算,包括全球碳排放权总配额、全球碳排放权

① 本文提到的“其他地区”均作为专有名词特指除中国、美国、欧盟、日本、前苏联地区以外的世界其他地区。

年配额、区域碳排放权总配额和区域碳排放权年配额。考虑到目前全球尚未形成一个统一的关于总配额计算及其分配的方法, 配额分配模块分别以基于大气二氧化碳浓度和基于全球减排方案的目标控制方法对碳排放权配额进行模拟分配。

(1) 基于大气二氧化碳浓度的目标控制方法, 假设人类向大气中排放的二氧化碳主要由化石燃料排放和土地利用排放两大部分组成, 而进入大气的一部分二氧化碳将会被海洋、陆地生态系统吸收<sup>[24, 25]</sup>。于是, 在给定目标年份大气二氧化碳浓度的条件下, 我们就能够对相关的碳排放权配额进行分配。具体计算步骤为:

第一步, 根据起始年份与目标年份的大气二氧化碳浓度差值计算全球碳排放权总配额  $R^n$ , 用方程表示为:

$$R^n = \frac{2.12(D^f - D^s)}{1 - \beta} - \epsilon n \quad (1)$$

式中, 2.12 为二氧化碳浓度与质量的转换系数<sup>[24]</sup>;  $s$  和  $f$  分别代表起始年份和目标年份;  $D^s$  和  $D^f$  代表起始年份和目标年份的大气二氧化碳浓度;  $n$  代表起始年份至目标年份的总年数;  $\beta$  为排放出一单位二氧化碳在被陆地、海洋生态系统吸收之后, 滞留在大气中的二氧化碳比例;  $\epsilon$  为土地利用导致的年平均排碳放量。  $D^s$  数据来源于 CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)<sup>①</sup>, 参数  $\beta$  和  $\epsilon$  的取值参照参考文献 [24], 分别取 0.54GtC/a 和 1.5GtC/a<sup>②</sup>。

第二步, 根据不同的配额分配原则对全球碳排放权总配额进行分配, 计算出区域碳排放权总配额。考虑到发达国家和发展中国家的历史碳排放量存在巨大差距, 历史碳排放是配额分配必须面对的问题。配额分配模块将区分不考虑历史碳排放和考虑历史碳排放的两种情况:

如果不考虑各区域的历史累计碳排放量, 那么区域碳排放权总配额可直接根据配额分配原则对全球碳排放权总配额进行分配得出。假设以人口作为配额分配指标, 则  $i$  区域碳排放权总配额  $R_i^n$  可表示为:

$$R_i^n = \frac{L_i R^n}{\sum L_i} \quad (2)$$

式中,  $L_i$  代表  $i$  区域基准年份人口, 数据来源于世界银行<sup>③</sup>。

如果考虑各区域的历史累计碳排放量, 那么区域碳排放权总配额应等于包括历史排放在内的区域碳排放权总配额减去该区域历史累计已排放的碳排放量。于是,  $i$  区域碳排放权总配额  $R_i^n$  表示为:

$$R_i^n = R_i^{n'} - E_i^{(n'-n)} \quad (3)$$

式中,  $n'$  代表历史排放起始年份至目标年份的年份数,  $R_i^{n'}$  可通过方程 (2) 计算得出区域碳排放数据取自 CDIAC<sup>④</sup>。

第三, 将区域碳排放权总配额分配到具体年份, 计算出区域碳排放权年配额。显然,  $i$  区域碳排放权总配额  $R_i^n$  等于其所有年份的碳排放权年配额  $R_{i,t}$  之和, 即:

$$\sum_{t \in [s, f]} R_{i,t} = R_i^n \quad (4)$$

① <http://cdiac.ornl.gov/>

② GtC/a 表示单位十亿吨碳每年, 其中 GtC 表示十亿吨碳

③ <http://databank.worldbank.org/ddp/home.do>

④ <http://cdiac.ornl.gov/>

假设区域碳排放权总配额按照逐年均匀减少的速率分配到所有年份, 于是有:

$$R_{i,t} = E_{i,s} + d(t-s) \quad (5)$$

式中,  $d$  是区域碳排放权总配额变化速率。结合方程 (4) 和方程 (5),  $i$  区域  $t$  时期的碳排放权年配额  $R_{i,t}$  可表示为:

$$R_{i,t} = E_{i,s} + (t-s) \frac{2R_i^n / (f-s+1) - 2E_{i,s}}{f-s} \quad (6)$$

式中, 下标  $t$  代表起始年份至目标年份之间的某一年份;  $E_{i,s}$  代表  $i$  区域起始年份的碳排放量。

(2) 基于全球减排方案的目标控制方法, 通过目标年份碳排放量比基准年份减排的百分比来计算区域碳排放权年配额。与基于大气二氧化碳浓度的目标控制方法相比, 该方法相对简单。同样假设区域总碳排放权总配额按照逐年均匀减少的速率分配至所有年份, 则  $i$  区域  $t$  时期的碳排放权年配额  $R_{i,t}$  可表示为:

$$R_{i,t} = E_{i,s} - (f-t) \frac{E_{i,s} - (1-P_i)E_{i,b}}{t-s-1} \quad (7)$$

式中,  $R_{i,b}$  代表  $i$  区域的基准年份的碳排放量,  $P_i$  为  $i$  区域至目标年份的碳减排百分比。

## 2.2 碳交易模块

碳交易模块负责对各区域碳交易行为进行模拟并最终获得碳交易均衡价格。由于全球碳交易的过程是多国相互交互的过程, 既需要多国的独立决策又需要全局的交易信息整合, 因此适合用基于 Agent 技术进行建模模拟。根据各 Agent 在模型中所负责的任务差别, 本模块主要包含三类 Agent, 即市场 Agent, 区域 Agent 和观察 Agent。通过这三类 Agent 的相互联系、信息传递, 最终完成全球碳交易的过程。三类 Agent 的交互过程如图 1 所示。

市场 Agent 是本模块的核心, 它具有三个重要的职责, 一是负责在每个时间节点上迭代地向区域 Agent 发送价格信息, 二是接收区域 Agent 向其反馈的碳排放权交易额度信息, 三是衡量全球范围内碳交易供需是否平衡, 并最终寻找每年的碳交易均衡价格。区域 Agent 根据国别不同, 分为中国 Agent、美国 Agent、日本 Agent、欧盟 Agent、前苏联 Agent、其他地区 Agent, 以上 6 个区域 Agent 也具有三个

职责, 一是接收来自市场 Agent 的当前交易价格信息, 二是根据区域内部经济发展状况和碳排放权配额对参与碳交易的行为做出理性的经济决策, 即区域的碳交易行为总是在边际减排成本大于碳交易价格时发生, 因为此时通过碳交易实现配额控制目标要比区域内减排更经济, 三是将各自的交易信息反馈给市场 Agent。最终观察 Agent 负责对全球数据信息进行统计, 包括全球碳交易的价格、碳交易量、买卖双方信息等。

市场 Agent 寻找碳交易均衡价格的过程包括 6 个步骤: 第一步, 市场 Agent 初始化碳交易价格; 第二步, 各区域 Agent 计算碳减排率; 第三步, 各区域 Agent 根据碳减排率

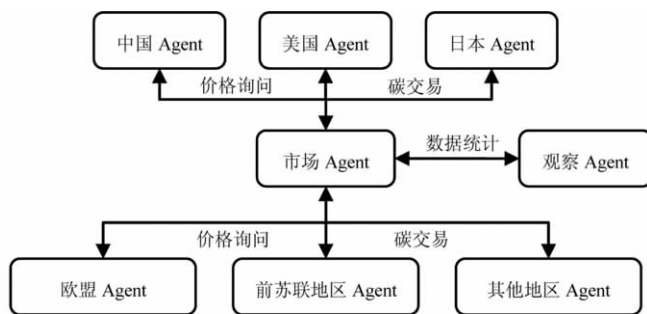


图 1 碳交易结构

Fig 1 Carbon trading structure

计算年碳排放量；第四步，市场 Agent 计算全球年碳排放量；第五步，判断全球年碳排放量是否等于全球年配额；如果相等，此时碳交易价格即为均衡价格，当年碳交易模拟结束，否则，进入下一步；第六步，如果全球年碳排放量大于全球年配额，则碳价格略微上涨，否则碳价格略微下降，返回第二步。其流程图如图 2 所示。本研究将采用 C# 进行系统实现。

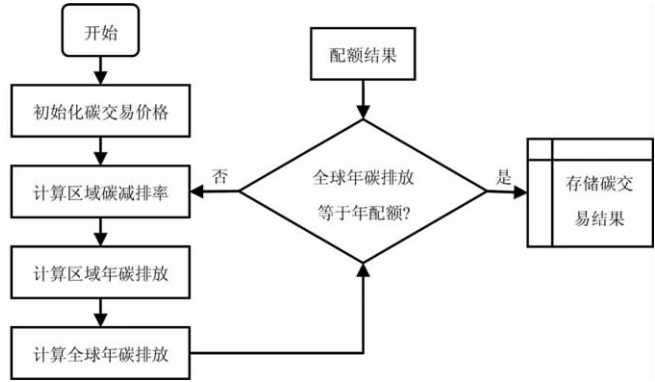


图 2 均衡价格流程

Fig. 2 Equilibrium price formation

碳交易模块中最关键的问题是对边际减排成本的计算。根据 Pizer<sup>[26]</sup> 提出的减排率与边际减排成本之间的关系。可以建立  $i$  区域  $t$  时期碳减排率  $\mu_{i,t}$  与边际减排成本  $MAC_{i,t}$  之间关系，即：

$$MAC_{i,t} = \frac{a_i b_i}{\sigma_{i,t} (1 + c_i T_t^2 / 9)} \mu_{i,t}^{b_i - 1} \quad (8)$$

式中， $a_i$ 、 $b_i$  为  $i$  区域的减排成本函数参数， $c_i$  为温度上升对  $i$  区域的经济破坏参数。 $T_t$  代表自工业化以来全球  $t$  时期温度上升度数， $\sigma_{i,t}$  代表  $i$  区域  $t$  时期的碳排放强度。参数  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  的取值参照参考文献 [26]，全球温度上升数据来源于 CDIAC<sup>①</sup>。

因此，在给定  $i$  区域  $t$  时期边际减排成本  $MAC_{i,t}$  的条件下，所需的区域碳减排率  $\mu_{i,t}$  可表示为：

$$\mu_{i,t} = {}^{(b_i - 1)} \sqrt{\frac{MAC_{i,t} \sigma_{i,t} (1 + c_i T_t^2 / 9)}{a_i b_i}} \quad (9)$$

此时， $i$  区域  $t$  时期二氧化碳排放  $E_{i,t}$  为：

$$E_{i,t} = \sigma_{i,t} Y_{i,t} (1 - u_{i,t}) \quad (10)$$

式中  $Y_{i,t}$  代表  $i$  区域  $t$  时期的 GDP。

对于任意给定的  $i$  区域  $t$  时期碳排放权年配额  $R_{i,t}$ ，可以得到  $i$  区域  $t$  时期的碳交易量  $T_{i,t}$ ：

$$T_{i,t} = R_{i,t} - E_{i,t} \quad (11)$$

$$\sum_i T_{i,t} = 0 \quad (12)$$

当所有区域  $t$  时期边际减排成本  $MAC_{i,t}$  均相等时（设为  $MAC_t$ ），碳交易均衡价格  $P_t^*$  确定，即：

$$P_t^* = MAC_t \quad (13)$$

需要说明的是，配额模块和交易模块均以王铮等<sup>[27]</sup> 构建的 MRICES 模型为基础。由于篇幅有限，本文省略了对 MRICES 模型的介绍。有关交易模块和配额模块与 MRICES 模型之间的整合关系如图 3 所示。其中，交易模块，一方面通过减排率和碳排放量与 MRICES 模型的气候响应模块建立联系；另一方面，通过碳交易量和碳交易价格对

① <http://ciac.ornl.gov/>

MRICES 模型的宏观经济产生影响。配额模块仅与交易模块建立联系。

### 3 碳交易模拟分析

#### 3.1 情景设置

为了分析碳交易对全球气候保护的作用,本文设置了以下 3 个情景。

情景 0:“自由排放”情景,即假设各区域均不采取任何减排措施,并将实际碳排放量作为其配额。该情景为其他减排情景提供了比较的基准。

情景 1:“丁标准”情景,即根据丁仲礼等<sup>[24]</sup>提出的在大气二氧化碳浓度的目标控制方法下,将至 2050 年全球二氧化碳浓度控制在 470ppmv 以内,并以人均累计碳排放量相等原则来分配各区域的碳排放权配额。考虑到各区域历史累计碳排放的差异,本情景假设以 1861 年作为历史排放时间起点,并实现至 2050 年全球人均累计碳排放量相等,2050 年后各区域人均碳排放权保持一致。

情景 2:“2℃ 目标”情景,即根据王铮等<sup>[28]</sup>提出的 2℃ 减排方案,中国与其他地区从 2025 年开始总量减排,至 2050 年,发达国家(包括美国、日本、欧盟)碳排放量比 1990 年减少 80%,中国比 2005 年减少 28%,前苏联地区比 1990 年减少 50%,其他地区比 2005 年减少 20%;2050 年之后各区域碳排放量保持在 2050 年水平。

#### 3.2 配额分析

基于 3.1 小节的情景设置,配额分配模块计算出 3 种情景下的全球碳排放权配额(表 1~3)。可以看出,“自由排放”情景下 2010~2100 年全球总配额最大;“2℃ 目标”情景次之;“丁标准”情景最小。需要注意的是,在“丁标准”情景中,2010~2050 年美国、日本、欧盟和前苏联地区均出现了负值,而这些负值的出现表明其历史排放已经透支了未来的配额。这使得 1861~2100 年美国的总配额只有 13.41GtC,小于其他所有区域。在人均累计碳排放量相等的原则下,如果某区域(如美国)用减少等量的未来人均碳排放量来弥补历史多排的人均碳排放量,就意味着在人口更多的未来需要减排更多碳排放总量,结果使得该区域的总配额减少。可以看出,虽然“丁标准”情景下的全球总配额最小,但由于美国、日本、欧盟和前苏联地区负配额的出现,使其在国际减排方案谈判中难以获得多数发达国际的支持。

表 1 “自由排放”情景下碳排放 (GtC)

Tab 1 Carbon emissions under Baseline scenario (GtC)

期限	全球	中国	美国	日本	欧盟	前苏联地区	其他地区
2010~2100	1264.75	304.5	209.39	43.92	146.59	86.32	474.04

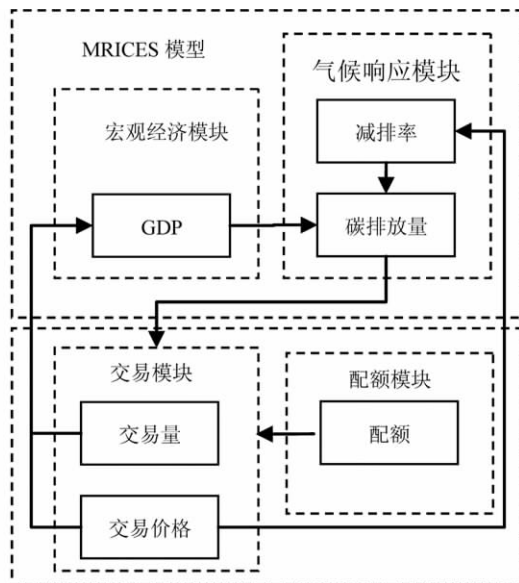


图 3 碳交易模块与 MRICES 模型的整合

Fig 3 Carbon trading module and MRICES model integration

表 2 “丁标准”情景下碳排放权配额 (单位: GtC)

Tah 2 Carbon emissions quota under “Ding standard” scenario ( GtC )

配额期限	全球	中国	美国	日本	欧盟	前苏联地区	其他地区
1861~2100	754. 31	159. 36	13. 41	14. 99	54. 53	30. 89	481. 12
1861~2009	352. 07	33. 14	95. 77	14. 54	84. 89	42. 63	81. 11
2010~2050	238. 58	93. 69	-89. 80	-2. 66	-42. 37	-18. 71	298. 44
2051~2100	163. 66	32. 53	7. 44	3. 11	12. 02	6. 98	101. 58
2010~2100	402. 24	126. 22	-82. 36	0. 45	-30. 36	-11. 73	400. 02

表 3 “2℃目标”情景下碳排放权配额 (单位: GtC)

Tah 3 Carbon emissions quota under “2℃ target” scenario ( GtC )

配额期限	全球	中国	美国	日本	欧盟	前苏联地区	其他地区
2010~2024	107. 20	22. 38	21. 01	4. 04	13. 72	10. 41	35. 64
2025~2050	125. 54	27. 84	18. 32	3. 51	12. 15	15. 81	47. 91
2051~2100	208. 09	50. 91	13. 27	3. 14	11. 44	25. 88	103. 44
2010~2100	440. 83	101. 13	52. 60	10. 69	37. 30	52. 11	187. 00

将表 1~3 中的 2010~2100 年全球总配额按逐年均匀减排的方式分配到具体年份, 可以得出各区域用于碳交易模拟的年配额。

3. 3 碳交易结果分析

鉴于目前全球尚未形成一个统一的碳交易市场, 本文假设将 2025 年作为全球碳交易的起始年份, 来对各情景进行模拟分析。

从全球温度上升角度来看 (图 4), “自由排放”情景下, 至 2100 年全球温度将上升 2. 99℃, 这比 IPCC 提出的“2℃ 阈值”<sup>[29]</sup> 超出了将近 1℃; “丁标准”情景和“2℃目标”情景下, 至 2100 年全球温度将分别上升 1. 93℃ 和 2. 00℃。可以看出, 在给定配额的前提下, 至 2100 年全球实现 2℃ 目标是可行的。

由于“自由排放”情景下, 各区域不存在碳交易行为, 下文仅针对“丁标准”情景和“2℃目标”情景下的碳交易价格、碳交易量和碳交易额进行分析。

从全球碳交易价格来看 (图 5), 在“丁标准”情景和“2℃目标”情景下, 全球碳交易价格分别从 2025 年的 183 \$/tC 和 300. 5 \$/tC 上升至 2100 年的 3630. 8 \$/tC 和 3272. 3 \$/tC。可以看出, 随着未来全球年配额的持续减少, 各区域的减排力度 (相对于“自由排放”情景) 需不断增加, 进而增加了

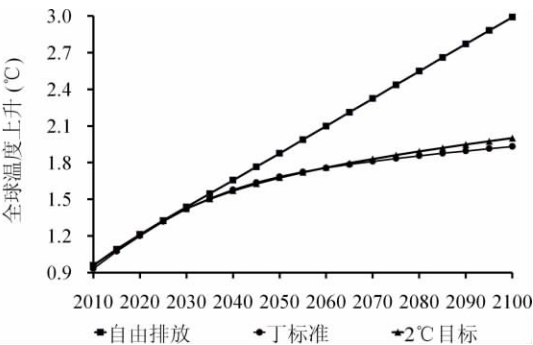


图 4 全球温度上升

Fig 4 Global temperature rise

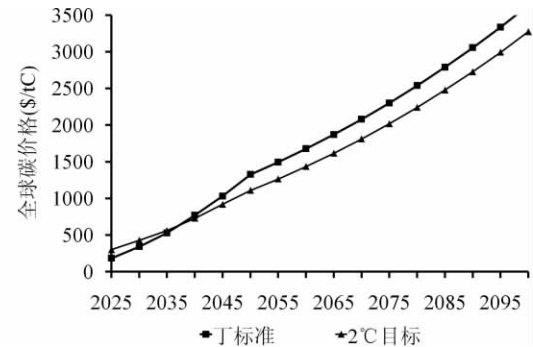


图 5 全球碳交易价格

Fig 5 Global carbon trading price

区域边际减排成本,并最终导致了全球碳交易价格不断攀升。从碳交易价格的走势来看,在碳交易初期,由于“丁标准”情景下的全球年配额大于“2℃目标”情景,其初始的碳交易价格相对较小。之后,为了实现至2050年全球人均累计碳排放量相等,“丁标准”情景下的全球年配额减少速度需大于“2℃目标”情景,从而加大其对碳排放权的需求量,并使得碳交易价格的上升速度加快。在2037年(图5中的交叉点)之后,“丁标准”情景下的碳交易价格开始超过“2℃目标”情景。在2050年之后,两种情景下碳交易价格走势保持相对稳定。

从区域碳交易量来看,在“丁标准”情景和“2℃目标”情景下,2025~2100年全球累计碳交易量分别为177.14GtC和63.27GtC。两种情景下的区域碳交易量分别如图6、图7所示,其中正值表示区域碳排放权年配额大于区域年碳排放量,为碳排放权出售方(存在配额盈余);负值表示该区域碳排放权年配额小于区域年碳排放量,为碳排放权购买方(存在配额缺口)。

由图6看出,在“丁标准”情景下,在2025~2050年期间,碳排放权出售方包括中国和其他地区;碳排放权购买方包括美国、日本、欧盟和前苏联地区。在2051~2100年期间,中国国内年碳排放量于2051年超过其配额,由碳排放权出售方转变为碳排放权购买方,而欧盟则在2072年由碳排放权购买方转变为碳排放权出售方。

由图7看出,在“2℃目标”情景下,在2025~2050年期间,碳排放权出售方主要为中国、前苏联地区;碳排放权购买方主要为美国、日本和欧盟。比较特殊的是,由于实施了总量减排,其他地区初始阶段的碳排放权配额存在缺口,为碳排放权购买方,但在2034年之后其他地区将由碳排放权购买方转变为碳排放权出售方。在2051~2100年期间,其他区域配额盈余不断增加,在国际碳交易市场中扮演了主要碳排放权出售方的角色,

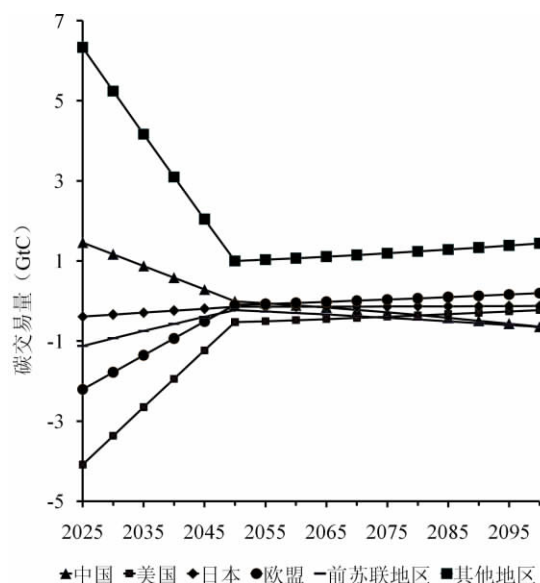


图6 “丁标准”情景下碳交易量

Fig. 6 Trading quantity under “Ding standard” scenario

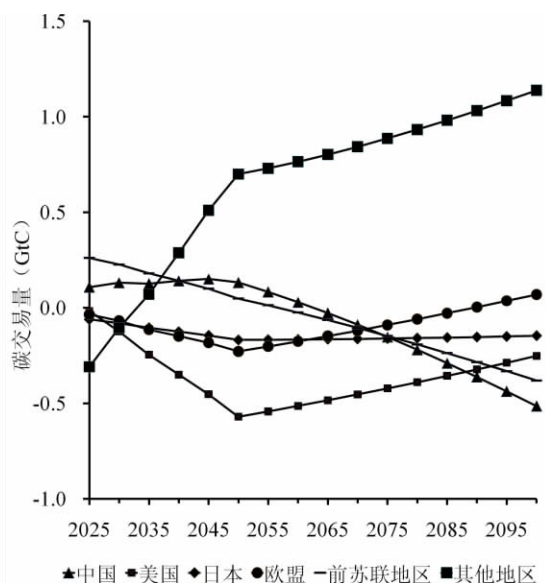


图7 “2℃目标”情景下碳交易量

Fig. 7 Trading quantity under “2℃ target” scenario



中国和前苏联地区分别在 2063 年和 2057 年由碳排放权出售方转变为碳排放权购买方，其它碳排放权购买方主要为美国和日本，欧盟则在 2090 年由碳排放权购买方转变为碳排放权出售方。

图 6 和图 7 表明，碳交易可用于解决在全球减排方案中的区域碳排放权配额与区域年碳排放量不一致问题。存在碳排放权配额缺口的区域可以通过碳交易市场向存在碳排放权配额盈余的区域购买所需碳排放权，从而实现其在全球减排方案中应承担的减排义务。值得一提的是，不论是“丁标准”情景还是“2℃目标”情景，在未来中国均将从碳排放权出售方转变为碳排放权购买方，这意味着未来中国将会出现碳排放权的缺口，如果进一步考虑到碳排放权涨价的预期，那么在面临碳排放权的缺口之前存储一部分碳排放权不失为一个好的选择。当然，若要考虑碳排放权的存储问题，我们的模型也需要做相应的改进，这也是我们下一步的研究内容。

从累计碳交易额来看，“丁标准”情景和“2℃目标”情景下各区域累计碳排放权交易额分别如图 8、图 9 所示。

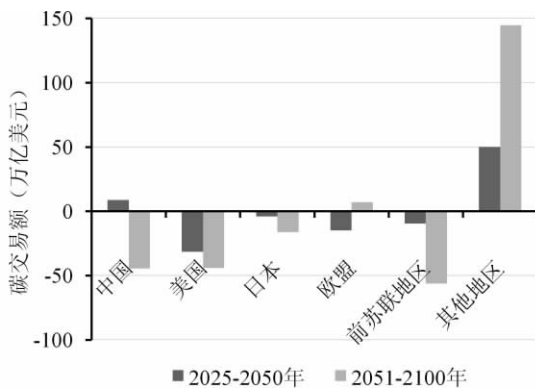


图 8 “丁标准”情景下累计碳交易额

Fig. 8 Accumulated amount under “Ding standard” scenario

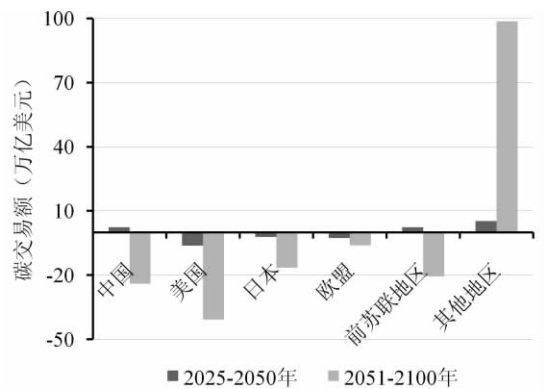


图 9 “2℃目标”情景下累计碳交易额

Fig. 9 Accumulated amount under “2℃ target” scenario

图 8 和图 9 表明，无论是“丁标准”情景还是“2℃目标”情景，其他地区均为主要的碳交易资金流入地，而美国和日本则为主要的资金流出地，中国在 2025~2050 年期间，为碳交易资金流入地，之后转为资金流出地。总的来说，碳交易将有助于资金向发展中国家转移，尤其是经济发展水平较为落后的其他地区将在全球碳交易市场中收益颇多。

就中国而言，在“丁标准”情景下，2025~2050 年期间和 2051~2100 年期间累计碳交易额分别为 8.8 万亿美元和 -44.5 万亿美元。在“2℃目标”情景下，2025~2050 年期间和 2051~2100 年期间累计碳交易额分别为 2.4 万亿美元和 -24.0 万亿美元。可以看出，“丁标准”情景下的中国短时期内碳交易收入较大，而“2℃目标”情景下的中国长时期内碳交易支出较少。综合来看，“2℃目标”情景要优于“丁标准”情景。

从人均碳排放量来看（图 10），“丁标准”情景和“2℃目标”情景下，至 2100 年美国、日本、中国和前苏联地区的人均碳排放量远高于其他地区和欧盟。显然，“丁标准”情景下的累计人均碳排放量相等原则在碳交易中失效。这是因为基于配额分配原则确定的区域

年配额并不等同于区域年碳排放量。在碳交易过程中,区域年碳排放量还受限于区域边际减排成本。当一区域边际减排成本高于全球碳价格时,该区域便会选择从边际减排成本低的区域购买碳排放权配额,而非自行减排。

为了进一步评估碳交易对全球经济的影响,本文采用拉姆齐效用函数来进行分析。与 GDP 不同的是,拉姆齐效用即考虑了 GDP 的总量,又考虑了人均福利,是一种综合国力的表现。有关拉姆齐效用的内容,参见参考文献 [27]。考虑到目前关于贴现率的取值仍存在争议,本文采用 Nordhaus<sup>[30]</sup> 和 Stern<sup>[1]</sup> 对贴现率  $\rho$  的取值,分别取 0.015 和 0.001。图 11 显示了“丁标准”情景和“2℃目标”情景分别在有碳交易和无碳交易情况下的全球 2025~2100 年累计拉姆齐效用变化率(相对于“自由排放”情景)。

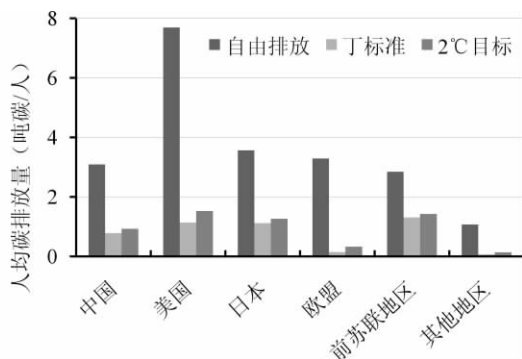


图 10 2100 年人均碳排放量

Fig 10 Per capita carbon emissions by 2100

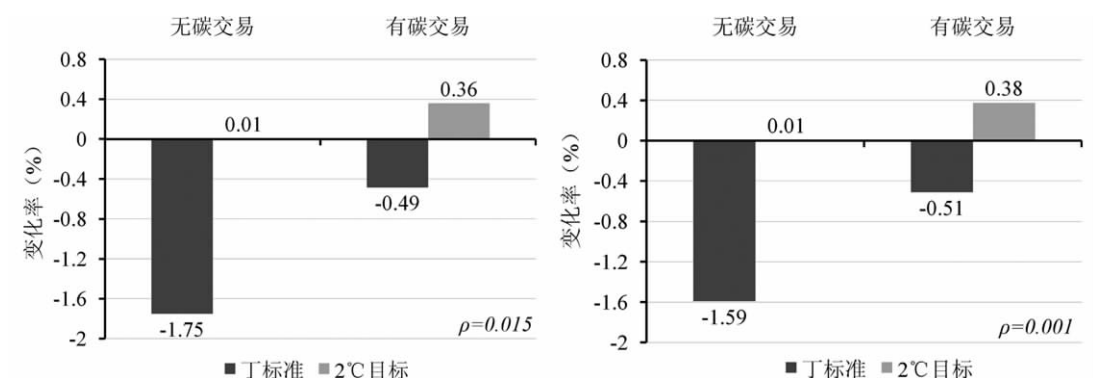


图 11 2025~2100 年累计拉姆齐效用变化率

Fig 11 Change rate of total Ramsay utility from 2025 to 2100

由图 11 可以看出,贴现率的大小并不能改变两种情景下 2025~2100 年累计拉姆齐效用变化率的相对大小。无论是“丁标准”情景还是“2℃目标”情景,碳交易市场均能提高该情景下的累计拉姆齐效用。在碳交易市场存在与否既定的条件下,“2℃目标”情景的累计拉姆齐效用大于“丁标准”情景。这也再次表明,从全球福利改善的角度而言,“2℃目标”情景也将更有利于全球减排行动。

## 4 结论

本文得出以下结论:

(1) 如果在 2025 年之后形成全球碳交易市场,“丁标准”情景与“2℃目标”情景下,全球的碳交易价格都将呈现上升趋势。

(2) 碳交易的实施均有助于将资金向发展中国家转移。其中,其他地区为主要的碳

交易资金流入地; 美国和日本为主要的资金流出地; 中国逐步由碳交易资金流入地转为资金流出地。就中国而言, 未来中国将出现碳排放权配额的缺口, 考虑到碳排放权涨价的预期, 那么存储一部分碳排放权将更有利于国内的可持续发展。

(3) 在全球碳交易过程中, 发达国家将从发展中国家购买大量的碳排放权配额, 使得累计人均碳排放量相等原则失去效用。未来发达国家的人均碳排放量仍将远高于发展中国家。

(4) 无论是“丁标准”情景还是“2℃目标”情景, 碳交易市场的存在均能提高该情景下的累计拉姆齐效用。但从中国在未来碳市场中的收支情况, 以及全球的福利水平改善来看, “2℃目标”情景均将优于“丁标准”情景。

### 参考文献:

- [1] Stern N. The economics of climate change. *American Economic Review*, 2008, 98(2): 1~37.
- [2] Bohm P, Larsen B. Fairness in a tradable-permit treaty for carbon emission reductions in Europe and the Former Soviet Union. *Environmental and Resource Economics*, 1994, 4(3): 219~239.
- [3] Kverndokk S. Tradeable CO<sub>2</sub> emission permits: Initial distribution as a justice problem. *Environmental Values*, 1995, 4(2): 129~148.
- [4] Janssen M, Rotmans J. Allocation of fossil CO<sub>2</sub> emission rights quantifying cultural perspectives. *Ecological Economics*, 1995, 13(1): 65~79.
- [5] Cramton P, Kerr S. Tradable carbon permit auctions: How and why to auction not grandfather. *Energy Policy*, 2002, 30(4): 333~345.
- [6] Malakoff D. Thirty Koyotos needed to control warming. *Science*, 1997, 278(5346): 2048.
- [7] Najam A, Page T. The climate convention: Deciphering the kyoto protocol. *Environmental Conservation*, 1998, 25(3): 187~194.
- [8] Rajan M K. *Global Environmental Politics*. Delhi: Oxford University Press, 1997.
- [9] Sagar A, Kandlikar M. Knowledge, rhetoric and power: International politics of climate change. *Economic and Political Weekly*, 1997, 32(49): 12~19.
- [10] 江志红, 张霞, 王翼. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估. *地理研究*, 2008, 27(4): 787~799.
- [11] Sørensen B. Pathways to climate stabilisation. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3505~3509.
- [12] 丁仲礼, 付博杰, 韩国兴, 等. 中国科学院“应对气候变化国际谈判的关键科学问题”项目群简介. *中国科学院院刊*, 2009, 24(1): 8~17.
- [13] 王铮, 吴静, 李刚强, 等. 国际参与下的全球气候保护策略可行性模拟. *生态学报*, 2009, 29(5): 2407~2417.
- [14] 姜克隽, 胡秀莲, 刘强, 等. 2050 低碳经济情景预测. *环境保护*, 2009, 24(4): 28~30.
- [15] Nordhaus W D. Economic growth and climate: The carbon dioxide problem. *American Economic Review*, 1977, 67(1): 341~346.
- [16] Zhang Z X. Greenhouse gas emissions trading and the world trading system. [http://mpra.ub.uni-muenchen.de/12971/1/MPRA\\_paper\\_12971.pdf](http://mpra.ub.uni-muenchen.de/12971/1/MPRA_paper_12971.pdf), 1998-04-01/2012-04-23.
- [17] Manne A S, Rutherford T F. International trade in oil, gas and carbon emission rights: an intertemporal general equilibrium model. *The Energy Journal*, 1994, 15(1): 57~76.
- [18] Ellerman A D, Decaux A. Analysis of post-Kyoto CO<sub>2</sub> emissions trading using marginal abatement curves. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/3608>, 1998-10-01/2012-04-23.
- [19] McLibbin W J, Ross M T, Shackleton R, et al. Emissions trading, capital flows and the Kyoto Protocol. <http://www.brookings.edu/views/Papers/bdp/Bdp144/bdp144.pdf>, 1999-02-01/2012-03-05.
- [20] Szabo, Hidalgo I, Ciscar J C, et al. CO<sub>2</sub> emission trading within the European Union and Annex B countries: The cement industry case. *Energy Policy*, 2006, 34(1): 72~87.
- [21] Springer K. Climate policy and trade: Dynamics and the steady-state assumption in a multi-regional framework.

- [http://www.ifw-kiel.de/ifw\\_members/publications/climate-policy-and-trade-dynamics-and-the-steady-state-assumption-in-a-multi-regional-framework/kap952.pdf](http://www.ifw-kiel.de/ifw_members/publications/climate-policy-and-trade-dynamics-and-the-steady-state-assumption-in-a-multi-regional-framework/kap952.pdf), 1999-10-01/2012-04-23.
- [22] Mizuta H, Yamagata Y. Agent-based simulation and greenhouse gas emissions trading. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Virginia, 2001.
- [23] Chappin E J L. Carbon dioxide emission trade impact on power generation portfolio: Agent-based modelling to elucidate influences of emission trading on investments in Dutch electricity generation. [http://www.tudelft.nl/live/binaries/b3f1782a-82d1-45f9-ae2f-e83e318fa1f1/doc/chappin\\_msc\\_thesis\\_report\\_final.pdf](http://www.tudelft.nl/live/binaries/b3f1782a-82d1-45f9-ae2f-e83e318fa1f1/doc/chappin_msc_thesis_report_final.pdf), 2006-11-26/2012-04-13.
- [24] 丁仲礼, 段晓南, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO<sub>2</sub> 浓度控制: 各国碳排放权计算. 中国科学, 2009, 39(8): 1009~1027.
- [25] 葛全胜, 王绍武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题. 地理研究, 2010, 29(2): 191~203.
- [26] Pizer W A. The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty. Resource and Energy Economics, 1999, 21(3~4): 255~287.
- [27] 王铮, 吴静, 朱永彬, 等. 气候保护经济学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 王铮, 朱潜挺, 吴静. 不确定性下的中国减排方案研究. 中国科学院院刊, 2011, 26(3): 261~270.
- [29] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007.
- [30] Nordhaus W D. A review of the "Stern review on the economics of climate change". Journal of Economic Literature, 2007, 45(3): 686~702.

## Research on carbon trading market: An agent-based simulation

ZHU Qian-ting<sup>1,2</sup>, WU Jing<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The carbon trading would be one of the most important parts in climate change in future. Based on agent modeling, this paper establishes a global carbon trading simulation system that includes China, the US, Japan, the EU, the Former Soviet Union, and Rest of the World (ROW). According to the principle of accumulative emission per capita equalization and emission reduction targets control, two scenarios simulating global carbon trading are set in this paper, "Ding standard" and "2°C target" scenarios. The study finds that: (1) the global carbon trading price will increase because of the decreasing quota of carbon emissions both in the "Ding standard" and "2°C target" scenarios; (2) Carbon trading market will help to transfer fund from developed countries to developing countries; (3) Since developed countries can buy emission quota from developing countries, carbon emission per capita of developed countries will remain higher than that of developing countries in future; (4) Carbon trading market improves the accumulated global Ramsey's utility in both the "Ding standard" or "2°C target" scenarios. However, "2°C target" scenario can do better than "Ding standard" scenario both in China's future benefit and in improvement of global welfare.

**Key words:** carbon trading; agent modeling; cap and trade; reduction scheme