

# 碳强度与总量约束的绩效比较： 基于 CGE 模型的分析

张友国\*

**内容提要** 选择强度约束还是总量限制作为温室气体减排目标,是后《京都议定书》时代有关气候变化协议的一个重要议题。本文用一个简单的理论框架比较了碳排放强度约束和总量限制的绩效,并进一步结合可计算一般均衡模型和蒙特卡洛方法,模拟了要素-能源替代不确定情形下这两种约束对中国经济总量、碳排放总量、碳排放强度及边际碳减排成本的影响。通过分析,本文认为中国的碳强度约束是一个合适且有诚意的温室气体减排目标,国际气候变化协议应当允许发展中国家采用可调节的碳强度减排目标。

**关键词** 强度减排 总量减排 不确定性 CGE 模型

## 一 引言

对碳排放进行强度约束和总量限制是两种常用的环境规制手段。强度约束是指设定单位产出的资源消耗或污染物排放控制标准,如中国提出的单位国内生产总值(GDP)的能耗下降和碳排放减排指标。而总量限制是指设定污染物排放总量的控制标准,如中国提出的主要污染物减排指标。在确定情形下,它们能够以同样的经济代价实现同样的环境目标,是等价的。然而,在不确定情形下,它们会对经济和环境目标

\* 张友国:中国社会科学院数量经济与技术经济研究所 中国社会科学院环境与发展研究中心 北京市建国门内大街5号 100732 电子信箱:zhyouguo@cass.org.cn。

本文是中国社会科学院重点课题“生态经济效率评价方法及其应用研究”(1100000284)的阶段性的研究成果,同时得到中国社会科学院经济政策模拟重点实验室的资助。作者感谢贺菊煌、张晓、郑易生、郑玉歆、李雪松以及樊明太的讨论和宝贵建议,感谢两位审稿人全面和富有建设性的评论,当然文责自负。

产生不同的影响。尽管 2012 年召开的联合国气候变化框架公约第十八次缔约方会议(多哈会议)仍将总量限制确定为温室气体减排目标,<sup>①</sup>但这并未得到广泛认同,相关的争论从未停息,因为现实世界中与温室气体减排相关的许多因素都是不确定的。选择强度约束还是总量限制作为温室气体减排目标已然成为后《京都议定书》时代有关气候变化协议的一个重要议题。

就现实情况来看,一些国家已经出于实际国情的考虑,没有将总量限制确定为国家温室气体减排目标。阿根廷早在 1999 年就提出了自己的指数减排目标,其实质是一个基于 GDP 的强度约束目标;2002 年,美国拒绝了《京都议定书》为其确定的总量减排目标,并重新为自己设定了一个强度约束目标;2009 年底,中国和印度也相继宣布将降低基于 GDP 的碳排放强度作为碳减排目标;此外,继美国退出《京都议定书》后,在 2012 年多哈会议上,加拿大、日本、新西兰及俄罗斯已明确表示不参加该协议的第二期承诺。

学术界也试图对这两种碳减排方式的绩效作出评价。Ellerman 和 Sue Wing (2003)、Kolstad (2005) 以及 Jotzo 和 Pezzey (2007) 认为事先设定的总量减排目标虽然能更直接地约束温室气体排放,但那些经济增长超过预期水平的国家需要付出额外成本以实现既定的减排目标,因而总量限制会妨碍经济增长并难以被一些国家(尤其是需要优先考虑经济和社会发展的发展中国家)接受。而强度约束虽然可能会带来实际减排量的不确定性,但它能够为经济增长留有余地并灵活地调整温室气体排放量,且有助于降低减排成本的不确定性,尤其是长期内发展中国家减排成本的不确定性,因而也更有利于调动各国参与温室气体减排行动的积极性。

从已有文献的研究方法来看,除了定性描述外,研究者主要通过建立数理经济模型或数值模拟来比较这两种减排方式的经济和环境影响。建立数理经济模型来比较不同环境政策工具的研究由来已久,一般认为这类研究始于 Weitzman (1974) 对环境规制中价格手段(如税收)和数量手段(总量减排)的经典分析。而近年来 Quirion (2005)、Newell 和 Pizer (2008) 以及 Webster 等 (2010) 将强度约束也纳入到这类比较研究中。他们的基本思路仍是沿用 Weitzman (1974) 提出的局部均衡分析框架,而其分析的起点一般都是事先对关键变量之间的关系(如 GDP 与污染排放的相关关系)及相关的确定性进行假定 (Peterson, 2008)。

采用数值模拟方法来评价不同政策工具的研究主要基于可计算一般均衡 (Com-

<sup>①</sup> 这次会议对《京都议定书》第二期承诺(2013~2020 年)做出决定,要求发达国家在 2020 年前大幅减排温室气体。

putable General Equilibrium, CGE)模型展开。Goulder 等(1999)用一个 CGE 模型比较了基于产出的排放强度约束与总量限制、污染税及能源税的成本有效性。Parry 和 Williams(1999)的工作与 Goulder 等(1999)类似,但他们考察了更多的政策工具,且比较了不同政策工具的福利效应。Dissou(2005)基于一个加拿大的 CGE 模型专门比较了碳排放强度约束和总量限制的一系列经济和环境影响。考虑到参数取值的不确定性,这些研究者都通过合理改变参数的取值,对模拟结果进行了灵敏度分析(sensitivity analysis)以检验结果的稳健性。最近,Webster 等(2010)将蒙特卡洛方法(Monte Carlo approach)与一个美国的 CGE 模型结合起来比较了碳排放强度约束、总量限制、碳税以及安全阀(safety valve)<sup>①</sup>等四种政策工具的成本与收益。

不过,无论是基于局部均衡框架还是一般均衡框架的研究都主要专注于考察不同政策工具对减排成本方差(衡量不确定性大小的指标)的影响以及相应的成本收益,并将其作为判别不同政策工具优劣性的重要依据,但很少考察这些政策工具对经济增长及其他重要宏观经济指标的影响,而后者才是人们真正感兴趣的问题(Peterson, 2008; Fischer 和 Springborn, 2011)。虽然最近也有一些学者在这方面进行了探索,如 Fischer 和 Springborn(2011)采用动态随机一般均衡模型(Dynamic Stochastic General Equilibrium, DSGE)对税收、总量限制和强度约束的宏观经济影响进行了比较,但这方面的研究显然还十分缺乏。

由于具有良好的理论基础和强大的政策分析能力,近年来 CGE 模型在有关中国经济问题的研究中也得到了广泛应用。其中与中国碳排放问题相关的研究主要是分析征收碳税对中国经济的影响(Zhang, 1996; 马纲等, 1998; 贺菊煌等, 2002; 姚昕和刘希颖, 2010)。值得指出的是,王灿和陈吉宁(2006)分析了碳总量减排的经济影响,且他们的研究也是结合 CGE 模型与蒙特卡洛方法展开的,但他们仅关注了不确定情形下碳总量减排的影响。Wang 等(2009)分析了存在和不存在 R&D 补贴这两种情形下,实现既定的碳强度减排目标、人均碳排放量减排目标和碳排放总量减排目标对中国经济的影响。不过,他们强调的是技术进步因素的重要性,而不是基于不确定性来比较这些减排目标。

本文的目的则是比较不确定情形下碳排放强度约束和总量限制的宏观经济环境影响。为此,本文构建了一个简单的理论分析框架对两种减排方式的绩效进行了比

① 所谓安全阀是指一种可交易排污权与价格管制相结合的政策工具。当市场上的可交易排污权价格因为排污权需求的激增而超过政府设定的价格限制即触发价格(trigger price)时,相关市场主体可按上述触发价格向政府购买额外的排污权,从而保证市场上的排污权价格不超过触发价格。

较,并结合 CGE 模型与蒙特卡洛方法进行了数值模拟。需要指出的是,影响碳排放强度约束和总量限制的不确定性因素是多方面的,如各种要素供给量、技术进步、各种投入间的替代弹性、供给和需求的价格弹性以及国际资源价格等。采用 CGE 模型模拟不确定情形下相关政策的影响时,通常需要考虑研究目的和相关参数取值的可获得性。本文旨在比较不确定性下两种碳减排政策的绩效,任何一种因素的不确定性都可作为一个特例来说明理论分析的结论。由于要素-能源替代不确定性通常被类似研究(Webster 等, 2010)选来进行随机模拟,因此本文的数值模拟也基于要素-能源替代的不确定性展开。本文第二部分从理论上对碳排放强度和总量约束的经济、环境影响进行比较;第三部分交代数值模拟方法和数据;第四部分报告模拟结果;第五部分为结果讨论和本文结论。

## 二 不确定性下碳排放强度和总量约束的经济-环境影响差异

GDP 可以看做是资本、劳动和能源的生产函数,即  $Y=f_Y(\bar{K}, \bar{L}, EN)$ , 其中,  $Y$ 、 $\bar{K}$ 、 $\bar{L}$  和  $EN$  分别表示实际 GDP、不变的资本投入、不变的劳动投入和能源消耗量。同时令  $I$  和  $C$  分别表示碳排放强度和碳排放总量。假定能源供给能够得到保障,且碳排放  $C$  与能源消耗量  $EN$  呈正比。为了简化分析,不妨假定这一比例为 1:1,即  $C=EN$ 。这样 GDP 也可以等价地表示为资本、劳动和碳排放的生产函数,即  $Y=f_Y(\bar{K}, \bar{L}, C)$ 。经典的生产理论表明:在技术水平和其他投入保持不变的条件下,一种生产要素的投入具有“边际报酬递减规律”,即在连续追加该生产要素的投入量时,总存在一个临界点,超过这一点之后,其边际产量将出现递减的趋势,直至出现负值。对于一种生产要素可变的生产过程,可以根据要素边际产量变化的特征,将其划分为三个阶段:平均产量递增阶段,此阶段中边际产量大于平均产量;平均产量递减阶段,此阶段中边际产量为正值但小于平均产量;总产量递减阶段,此阶段中边际产量为负值即总产量随投入增加而减少。一般而言,生产不会停留在平均产量递增阶段,也不会进入总产量递减阶段,而是会推进到平均产量递减阶段(杨春学,1997)。

据此,在资本量、劳动量和生产技术给定的情况下,我们可以不失一般性地假定整个国民经济生产活动也会进入碳排放的平均产量递减阶段,此阶段中碳排放的边际产量大于零,但其边际产量小于其平均产量。这意味着如果资本和劳动投入不变,随着碳排放的增加,GDP 也将增加,但 GDP 与碳排放的比值即碳排放的平均产量将越来越小,而这一比值的倒数即碳排放强度越来越大。我们可以更正式地将上述假定条件表述如下:如果  $C_1 < C_2$ , 则  $Y_1 < Y_2$ , 但  $Y_1/C_1 > Y_2/C_2$ 。

**推论 1:**假定在预期的生产技术条件(如要素间的替代弹性、要素投入效率等)下, GDP 与碳排放的函数关系为  $Y^e = f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C)$ , 且在此前提下, 最优的碳排放量为  $C_o$ , 相应的 GDP 为  $Y_o^e = f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C_o)$ , 碳排放强度为  $I_o = C_o/Y_o^e$ 。如果施加一个小于  $I_o$  的碳排放强度约束  $I_a$ , 则  $I_a$  对应的碳排放量( $C_a$ )小于  $C_o$ , 继而  $I_a$  对应的 GDP( $Y_a^e$ )小于  $Y_o^e$ 。同时, 如果将强度约束  $I_a$  改为总量约束  $C_a$ , 则得到的 GDP 和碳排放强度仍分别为  $Y_a^e$  和  $I_a$ 。

证明:假定  $C_a \geq C_o$ 。当  $C_a = C_o$  时,  $Y_a^e = f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C_a) = f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C_o) = Y_o^e$ , 于是  $I_a = C_a/Y_a^e = C_o/Y_o^e = I_o$ , 与假设前提( $I_a < I_o$ )矛盾。当  $C_a > C_o$  时, 由“边际报酬递减”规律可知  $Y_o^e/C_o > Y_a^e/C_a$ , 即  $C_o/Y_o^e < C_a/Y_a^e$ , 亦即  $I_o < I_a$ , 与假设前提( $I_a < I_o$ )矛盾。因此,  $I_a < I_o$  时  $C_a \geq C_o$  不成立, 此时必有  $C_a < C_o$ 。同时, 由于 GDP 是碳排放的递增函数, 因此  $Y_a^e < Y_o^e$ 。如果将强度约束  $I_a$  改为总量约束  $C_a$ , 易知所得的 GDP 为  $f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C_a) = Y_a^e$ , 碳排放强度为  $C_a/Y_a^e = I_a$ 。证毕。

**推论 2:**假定技术因素的实际值不同于预期值, 使 GDP 与碳排放的函数关系变为  $Y' = f_Y'(\bar{K}, \bar{L}, C)$ , 且对于同等的碳排放量有  $Y' > Y^e$ 。在此前提下, 令施加碳排放总量约束  $C_a$  所得到的 GDP、碳排放强度和碳边际减排成本分别为  $Y'_b$ 、 $I_b$  和  $\tau_b$ , 施加碳排放强度约束  $I_a$  所得到的 GDP、碳排放量和碳边际减排成本分别为  $Y'_f$ 、 $C_f$  和  $\tau_f$ , 则  $C_a < C_f$ 、 $Y'_b < Y'_f$ 、 $I_b < I_a$ , 但  $\tau_b > \tau_f$ 。

证明:由于假定对于同等碳排放量有  $Y' > Y^e$ , 因而有  $Y'_b = f_Y'(\bar{K}, \bar{L}, C_a) > f_Y^e(\bar{K}, \bar{L}, C_a) = Y_a^e$ , 继而有  $I_b = C_a/Y'_b < C_a/Y_a^e = I_a$ 。由推论 1 可知, 较低的碳排放强度对应的碳排放量和 GDP 也较小。由于  $I_b < I_a$ , 因而  $C_a < C_f$ 、 $Y'_b < Y'_f$ 。由于  $C_a < C_f$ , 同时生产函数满足碳排放边际产量递减的规律, 而碳边际减排成本就是碳排放的边际产量, 因此  $\tau_b > \tau_f$ 。证毕。

**推论 3:**假定技术因素的实际值不同于预期值, 使 GDP 与碳排放的函数关系变为  $Y'' = f_Y''(\bar{K}, \bar{L}, C)$ , 且对于同等的碳排放量有  $Y'' < Y^e$ 。在此前提下, 令施加碳排放总量约束  $C_a$  所得到的 GDP、碳排放强度和碳边际减排成本分别为  $Y''_d$ 、 $I_d$  和  $\tau_d$ , 施加碳排放强度约束  $I_a$  所得到的 GDP、碳排放量和碳边际减排成本分别为  $Y''_g$ 、 $C_g$  和  $\tau_g$ , 则  $C_a > C_g$ 、 $Y''_d > Y''_g$ 、 $I_d > I_a$ , 但  $\tau_d < \tau_g$ 。

证明:由于假定对于同等的碳排放量有  $Y'' < Y^e$ , 因而有  $Y''_d = f_Y''(\bar{K}, \bar{L}, C_a) < f_Y^e(\bar{K},$

$\bar{L}, C_a) = Y_a^e$ , 继而有  $I_d = C_a/Y_d' > C_a/Y_a^e = I_a$ 。由推论 1 可知, 较高的碳排放强度对应的碳排放量和 GDP 也较大。由于  $I_d > I_a$ , 因而  $C_a > C_g, Y_d' > Y_g''$ 。类似地, 由碳排放边际产量递减的规律可知, 由于  $C_a > C_g$ , 因此  $\tau_d < \tau_g$ 。证毕。

推论 1 意味着较强的碳排放强度约束或总量限制在减少碳排放的同时, 也会减少 GDP, 并产生边际减排成本; 而且在确定情形下两种约束完全可以实现等价效应。推论 2 意味着当资本和劳动投入不变, 其他因素导致实际经济增长水平高于预期水平时, 在确定情形中等价的碳排放强度和总量约束将产生差异: 强度约束下的 GDP 更高、碳排放量更大、碳排放强度也更高, 而边际减排成本更小。推论 3 意味着当实际经济增长低于预期水平时, 在确定情形中等价的碳排放强度和总量约束也将产生差异: 强度约束下的 GDP 更低、碳排放量更小、碳排放强度也更低, 而边际减排成本更大。

### 三 数值模拟方法和数据

为了量化分析碳排放强度和总量约束的绩效差异, 尤其是为了评估在不确定情形下这两种约束对中国经济和碳排放的影响, 下面将进一步对这两种约束展开随机数值模拟分析。

#### (一) 经济-能源-环境 CGE 模型

我们建立一个关于中国的经济-能源-环境模型(CN3EM), 其本质是一个 CGE 模型。所有 CGE 模型的基本理论框架都是一样的, 但不同的模型在具体结构和一些前提假定上存在差异。建模者可以根据研究需要和数据可获得性增加并细化某些模块, 同时删除或简化与研究目的关联程度不大的模块。

CN3EM 的特色在于它对不同用途的化石燃料作了不同刻画。具体的, 在洗选煤、炼焦、炼油及制气等能源转换过程<sup>①</sup>中作为原材料的化石能源与其他非化石能源产品一起以里昂惕夫(Leontief)函数(相互不能替代)形式进入生产函数, 而发电和发热用到的化石能源产品及作为终端能源使用的化石能源产品则与生产要素以固定替代弹性(Constant Elasticity of Substitution, CES)函数形式相结合进入生产函数。

假定国民经济系统有  $n$  个生产部门, 每个部门提供一种产品或服务, 其中提供化石能源产品的  $m$  个部门构成集合  $F$ , 其他  $n-m$  个部门提供非化石能源产品。表 1 示

<sup>①</sup> 主要涉及除电力和热力的生产和供应业之外的能源转换部门, 包括煤炭开采和洗选业、石油加工、炼焦及核燃料加工业以及燃气生产和供应业。

意性地描述了 CN3EM 静态形式的基本结构,包括本国生产的产品(后面简称国产品)和要素供给、产品和要素需求、价格、市场均衡条件及相关的总量定义;表 2 描述了 CN3EM 的内生变量和外生变量。为了方便行文,我们将第  $i$  个部门提供的产品或服务简称为“第  $i$  类国产品”,相对应的进口品简称为“第  $i$  类进口品”。

国产品和要素供给模块由方程(1)~(3)构成。假定每个生产部门根据产品的国内销售价格和出口价格决定其产品或服务的国内供给量和出口量以实现收入最大化。可以用固定转换弹性(Constant Elasticity of Transformation, CET)函数来刻画上述产品或服务的总供给量与其国内供给量和出口量的关系。<sup>①</sup> 根据收入最大化的一阶条件能够得到每种产品或服务的国内供给量和出口量。如方程(1)和(2)所示,它们是每个部门总产出、国内销售价格及出口价格的函数。假定资本总供给也是各部门资本供给的 CET 函数。根据资本平均收益率最大化的一阶条件,可得各部门的资本供给量。方程(3)表明它是资本总供给、各部门资本回报率和平均资本回报率的函数。<sup>②</sup> 同时,本文假定劳动可在各部门自由流动,且各部门以劳动投入衡量的工资率相等。

在产品和要素需求模块中,假定居民在一定的支出预算约束下追求效用最大化,而其效用是各类合成商品或服务的克莱因-鲁宾(Klein-Rubin)函数;<sup>③</sup>政府按比例消费各类合成商品;各部门按其资本存量在全社会总资本存量中的份额获得新增的总投资品(实际固定资本形成总量),且各部门中新增固定资本又是各类投资品的 Leontief 函数(各类投资品的构成比例固定);各部门存货与其总产出成比例变化;每个生产部门希望以最小成本获得既定的总产出,而总产出既是劳动、资本以及与它们相结合的化石能源合成商品的多层嵌套 CES 函数,又是中间投入(包括各种非化石能源商品和服务以及用于生产二次化石能源产品的化石能源)的 Leontief 生产函数;合成商品则是相应国产品和进口品的 CES 函数。

在这些假定下,根据成本最小化和效用最大化的一阶条件,能够得到各种国产品

① 第  $i$  类国产品的销售总量  $X_i$  可表示为国内销售量  $D_i$  与出口量  $E_i$  的 CET 函数:  $X_i = [\alpha_{D_i} D_i^{(\eta+1)/\eta} + \alpha_{E_i} E_i^{(\eta+1)/\eta}]^{\eta/(\eta+1)}$ , 其中  $\alpha$  是相应的份额系数,  $\eta$  为转换弹性系数。在上述产出约束下,由收入  $P_{X_i} X_i = P_{D_i} D_i + P_{E_i} E_i$  最大化的一阶条件可得,  $D_i = \alpha_{D_i}^{-\eta} (P_{D_i}/P_{X_i})^{-\eta} X_i$  及  $E_i = \alpha_{E_i}^{-\eta} (P_{E_i}/P_{X_i})^{-\eta} X_i$ , 其中  $P_{X_i}$ 、 $P_{D_i}$  和  $P_{E_i}$  分别是与  $X_i$ 、 $D_i$  和  $E_i$  相对应的价格。同理可得各部门的资本供给函数。

② 由于本文拟采取比较静态长期模拟,故假定资本总供给是各部门资本存量的 CET 函数。可以剔除资本供给方程及总资本供给量,并假定各部门资本存量外生不变以进行比较静态短期模拟;或假定当期的资本总供给等于前期的资本总供给减去资本折旧加上当期的资本形成总量,从而进行逐年递归动态(recursive dynamic)模拟。

③ 受数据限制,本文采用克莱因-鲁宾函数作为消费者效用函数,未充分考虑收入对消费者偏好的影响,这需要在今后的研究中加以克服。

和进口品的国内需求量以及各部门的劳动和资本需求量。如方程(4)所示,居民对各类合成商品的需求是居民总支出、各类合成商品的价格、居民对各类合成商品的偏好以及人口总数的函数(线性支出系统)。方程(7)、(10)和(13)表明各类合成商品在政府消费、资本形成和存货中分别按上述假定的各种比例关系进行分配。本文部分放松小国开放假定,即允许本国产品出口价格与国际市场价格不同。此时,如方程(16)所示,出口需求是出口价格与国际市场价格比值的减函数。

方程(17)和(20)意味着各生产部门使用的各种非化石能源合成成品和用作原材料的化石能源合成成品以及生产要素-化石能源合成成品与其总产出成比例。方程(21)和(22)表明各部门劳动和资本-能源合成成品的需求是生产要素-化石能源合成成品需求、生产要素-化石能源合成成品价格及其各自的价格和技术进步的函数。方程(23)和(24)表明各部门对资本和合成燃料的需求是资本-能源合成成品需求、资本-能源合成成品价格及其各自价格和技术进步的函数。方程(25)表明各生产部门燃烧的各类化石能源合成成品是其总燃料需求、各类化石能源合成成品价格指数及其技术进步的函数。

而方程(5)、(6)、(8)、(9)、(11)、(12)、(14)、(15)、(18)、(19)、(26)以及(27)则表明各类国产品和进口品是相应合成商品需求、合成成品价格、国产品和进口品价格及其技术进步的函数。

市场均衡条件由方程(28)~(33)构成。其中方程(28)~(31)分别意味着国内市场上非化石能源国产品、非化石能源进口品、化石能源国产品、化石能源进口品的供需平衡。方程(32)表示劳动总供给与总需求平衡。而方程(33)则意味着各部门资本的供需相等,即资本市场均衡条件已经得到满足。

价格模块包含方程(34)~(52),它们描述了各种销售价格与成本价格及各种税率的关系以及合成投入品价格与其下层投入品价格的关系。方程(34)表明各类国产品的销售价格是其成本价格、从价税率、产品的碳排放系数和从量碳税税率的函数。<sup>①</sup>方程(35)表明进口品的销售价格是其国际市场价格、汇率、关税税率及产品碳排放系数和从量碳税税率的函数。不同国内使用(作为原材料的中间投入、作为燃料的中间投入、居民消费、政府消费、投资)中的同类国产品(或进口品)具有相同的成本价格(或离岸价格)和从量碳税税率,但它们具有不同的从价税率和碳排放系数,因而其销售价格也不同。而方程(36)表明国产品的出口价格仅由相应的成本价格和出口税(或补贴)率构成并不包含碳税。

① 这里的“碳排放系数”和“从量碳税税率”仅对化石能源产品有意义,其他产品的碳排放系数假定为0。







由于本文假定各部门的产出是其产品国内销售量和出口量的 CET 函数,因而各部门的平均成本价格也可以表示为其国内销售产品的成本价格和出口产品成本价格的 CET 函数。不过,总的(不含税的)销售收入等于(不含税的)国内税后销售收入加上(不含税的)出口税后销售收入,因而(不含税的)平均成本价格也等于(不含税的)国内成本价格与(不含税的)出口成本价格的加权平均值(如方程(37)所示)。同时,在均衡状态下各部门的(不含税的)平均成本价格还应等于其单位产品包含的各种投入成本减去补贴(如方程(38)所示)。同样的,各种国内吸收以及生产中使用的合成投入品都是相应国产品和进口品的 CES 函数,因而其价格也可以表达为相应国产品和进口品销售价格的 CES 函数或加权平均值(如方程(39)~(45)所示),而生产中各种合成投入的价格也是其下层投入价格的 CES 函数或加权平均值(如方程(46)~(48)所示)。此外方程(49)~(52)分别定义了消费者价格指数、政府消费价格指数、GDP 平减指数和平均资本收益率。

在收入模块中,方程(53)将居民收入定义为总劳动报酬与政府对居民的转移支付、居民从企业获得的分红以及净国外汇款的合计;方程(54)表明企业收入是总资本报酬与政府补贴的合计;方程(55)~(58)依次定义了合计的生产税、所得税、关税以及按碳排放量征收的碳税;方程(59)则意味着政府收入是上述各项税收及净国外借款的合计。

方程(60)~(63)构成了储蓄模块,它们依次表明,居民储蓄是外生的居民储蓄率与居民可支配收入的乘积;企业储蓄是企业所有可支配收入,这意味着企业没有消费只有投资;政府储蓄则是政府总收入减去对居民和企业的补贴以及政府消费后的余额,后三者都被假定为外生变量;净国外储蓄等于总进口减去总出口、居民的国外净汇款和政府的国外净借款。而全社会总储蓄则是上述各类储蓄的总计。

在国内吸收模块中,方程(64)表明居民消费等于居民可支配收入减去居民储蓄即居民收支平衡。方程(65)意味着政府消费被假定与居民消费成比例,该比例为外生变量。当然,也可以剔除方程(65)及相应的比例变量而直接将政府消费作为外生变量处理。方程(66)表明总存货变动是各部门存货变动的加总,而各部门的存货变动被假定为与其总产出成比例变化。方程(67)则表明固定资本形成总额等于全社会总储蓄减去总存货变动即全社会投资与储蓄平衡。国内吸收模块反映了模型的宏观闭合(closure)特征——投资内生且由储蓄决定,这是新古典经济模型的基本特征。

最后,方程(68)~(72)对名义 GDP(收入法)、实际 GDP(支出法)、碳排放总量、碳排放强度以及贸易差额进行了定义。需要说明的是,本文暂时仅考虑与化石能源消

耗相关的碳排放,且假定所有非化石能源投入及被当做原材料使用的化石能源的碳排放系数都为 0。由于政府消费、固定资本形成中都没有用到化石能源消费,而存货以及出口不涉及化石能源的燃烧问题,因而方程(69)所刻画的与能源相关的碳排放主要来自生产部门和居民燃烧化石能源所产生的碳排放。

还要说明的是,模型中方程的总数为  $10n^2 + 6n \cdot m + 40n + 24$  (见表 1),比内生变量的总数(见表 2)多 1 个,这意味着模型存在过度识别问题。根据瓦尔拉斯法则,其中必定存在一个多余的方程。可以证明,表示政府收支、国际收支和投资储蓄平衡的 3 个方程即方程(62)、(63)和(67)不是相互独立的,其中任何一个都是另外两个的线性组合。因此,可从这 3 个方程中选择一个剔除,以保证模型能够求解,这就是模型的闭合(closure)问题。本文选择将方程(67)剔除,这意味着在全社会总储蓄给定的情形下,固定资本形成总额将作为一个均衡变量自动调整到储蓄和投资平衡的水平,从而使本文的模型成为一个储蓄驱动(savings-driven)模型。

### (二)基本数据与随机模拟方案

应用 CGE 模型进行模拟需要先行选定研究的基期并编制相应的社会核算矩阵(Social Accounting Matrix, SAM)作为数值模拟的基础。本文以 2007 年为基期而选择 2020 年为报告期,并主要根据国家统计局发布的 2007 年 42 部门<sup>①</sup>投入产出表建立了 SAM 表。<sup>②</sup> 国内吸收和中间投入里国产品和进口品的数额及各种化石能源产品被不同部门使用时的碳排放系数是根据张友国(2010)的方法估计得到的。

选定模型的外生变量对其赋值并给定相关参数的取值后,可以计算出模型所有内生变量的值。外生变量和参数的取值通常通过计量方法估计、参考相关文献或合理假定得到,与它们的真实值有一定偏差。外生变量和参数在合理范围内的不同取值会导致模拟结果(内生变量的取值)相应变化,这便带来了模拟结果的不确定性。如引言部分所述,本文主要考虑劳动、资本和能源之间替代弹性引起的不确定性。

蒙特卡洛方法是分析不确定性问题的主要方法,本文也采用这种方法来分析参数

① 其中提供化石能源产品的部门包括煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业、石油加工、炼焦及核燃料加工业以及燃气生产和供应业等 4 个部门。

② 本文采用 CGE 模型来计算报告期的 SAM 表,这一方法通常采用固定替代弹性(CES)生产函数或柯布-道格拉斯生产函数,即假定 SAM 表中所刻画的各经济主体都会根据产品的相对价格变动作出反应。当外在的政策冲击(如本文中的碳排放强度约束)导致产品的相对价格发生变化时,各经济主体会相应调整其需求结构或产出结构,整个经济系统原有的均衡状态和投入产出结构将会因此发生变化。当经济系统达到新的均衡状态时,就由基期 SAM 表生成了报告期 SAM 表,但报告期 SAM 表中新的投入产出结构很可能已不同于基期 SAM 表原有的投入产出结构。基于投入产出模型进行研究时,SAM 表的投入产出结构通常是外生给定的(假定不变或预先设定其变化规律),而不是内生的。这是投入产出模型与 CGE 模型的根本区别之一。

取值的不确定性对 CGE 模型输出结果的影响。<sup>①</sup> 应用蒙特卡洛方法需要随机抽取具有一定规模的参数样本,这要知道参数的分布形式,而通常人们无法获得有关参数分布形式的精确信息。在信息不充分的情况下,建模者可以事先对模型中参数的分布做出假定。常用的参数分布形态主要有 3 种:均匀分布(uniform distribution)、t 分布和正态分布(normal distribution)。如果建模者知道或能估计出参数取值的大致范围,则假定参数取值服从均匀分布是合适的,此时可以假定参数取值对称地均匀分布于其点估计值两侧。如果建模者能够通过计量方法得到参数的估计值及其标准差或 t 值,则假定参数取值服从正态分布或 t 分布是合适的,可以假定这些参数相互独立,也可以假定它们服从联合分布形式(此时需要估计联合分布的协方差矩阵,故一般较少采用这一假定)(Harrison 和 Vinod,1992; Abler 等,1999)。

基于嵌套的 CES 生产函数形式,本文采用不同的系统估计方法对中国的总量生产函数进行了初步估计,<sup>②</sup>得到了能源与能源之间、能源与资本之间以及能源-资本与劳动之间替代弹性的大致取值范围(如表 3 所示),并假定这些替代弹性服从均匀分布且相互独立。同时,为简化数据处理而又不影响本文研究目的,假定其他参数是确定的。其中,资本供给在不同部门间的转换弹性为 1.2,取自 Verikios 和 Zhang(2000)的研究;各部门产出的转换弹性、出口的价格弹性以及国产品和进口品的替代弹性值则主要取自马纲等(1998)的研究。

在确定参数的分布形式后,接下来需要确定随机抽取的参数样本容量及与之对应的模拟次数以保证估计结果满足一定的可靠性要求。为了确定合适的模拟次数,通常可以采用如下步骤:<sup>③</sup>1. 确定需要分析的一组( $r$  个)指标(模型输出结果);2. 先进行  $m$  次模拟,并得到这些指标的  $m$  组估计值;3. 以这  $m$  组估计值为样本估计出这些指标

---

① 除蒙特卡洛方法以外,还有不少别的方法可用来分析参数的不确定性,如条件系统敏感性分析(conditional systematic sensitivity analysis)、无条件系统敏感性分析(unconditional systematic sensitivity analysis)、贝叶斯方法(Bayesian approach)、高斯积分法(Gaussian quadrature approach)、有限灵敏度分析方法(limited sensitivity analysis)、极值方法(external approach)、置信区间方法(confidence intervals approach)。可参阅 Abdelkhalik 和 Dufour(1998)与 Abler 等(1999)的回顾。

② 鉴于生产要素和能源之间的替代弹性是本文模拟所需的最关键系数,作者没有采用以往学者普遍选取的文献调查法,而是试图采用最近的标准系统方法(León-Ledesma 等,2010)和 CES 生产函数,构造了关于能源之间、资本与能源之间以及资本-能源与劳动之间替代弹性的结构模型,然后结合 1979~2009 年中国的相关数据,并采用不同的系统估计方法(包括非线性 SUR、LM、广义矩等)估计了这些弹性系数。所用数据包括 1979~2009 年中国的国内生产总值及其价格指数、劳动投入及劳动报酬率、资本投入及资本收益率、能源消费量及能源成本、中间产出和总产出及相关的价格指数。由于不同方法获得的估计值均具有良好的统计特性,因此作者根据不同估计方法得到的估计值确定这些弹性系数的上、下限。

③ 可参阅 Abler 等(1999)的论述。

的样本协方差矩阵  $V$ , 令其第  $i$  个对角元素为  $\sigma_i^2$ ; 4. 假定第  $i$  个指标可以接受的估计误差及其发生的概率分别  $\varepsilon_i$  和  $\alpha_i$ ; 5. 根据中心极限定理, 当模拟次数足够大 (大于 30 次) 时, 这些指标估计值的均值服从正态分布, 据此可以计算出确保第  $i$  个指标估计值的可靠性满足既定标准的最低模拟次数  $m_i^* = (z_{\alpha_i/2} / \varepsilon_i)^2 \sigma_i^2$ , 其中  $z_{\alpha_i/2}$  为单变量标准正态分布的分位数; 6. 令  $m^* = \max(m_1^*, m_2^*, \dots, m_r^*)$ , 如果  $m \geq m^*$ , 则模拟的次数已然满足要求, 否则需要重新随机抽取参数样本再次进行模拟或在原来模拟的基础上补充一定数量的模拟次数, 直至  $m \geq m^*$ 。本文通过 EXCEL 软件随机地抽取了 1000 组要素和能源间替代弹性系数的取值并一一输入模型进行初始模拟。

表 3 要素和能源之间替代弹性的取值范围

弹性系数	能源间替代弹性	资本-能源替代弹性	劳动-(资本-能源)替代弹性
最大值	1.370	1.091	2.232
最小值	0.269	0.761	0.944
均值	0.820	0.926	1.588

说明: 电力和热力供应部门中使用的各种能源之间具有较高的替代弹性, 本文假定其上、下限都比表中所列的能源间替代弹性大 1。

### (三) 情景设计

如果整个经济体系在要素和能源之间替代弹性取均值的情形下演进, 不妨称此情形为确定情形。当上述替代弹性围绕其均值随机波动时, 则可称经济体系处于不确定情形中。为了比较强度约束和总量限制的政策影响, 本文设定了三种情景: 基准情景、强度约束情景和总量限制情景。

在基准情景中, 碳税是外生变量且取值为 0, 即不征收碳税, 而碳排放强度和总量为内生变量。其他关键外生变量的取值及来源如表 4 所示。同时, 我们假定政府对居民和企业的补贴随政府收入按比例变动, 企业对居民的分红随企业收入按比例变动; 而其余外生变量 (各种税率、居民储蓄率及存货与产出的比例) 的取值维持在基期水平。

在强度约束情景中, 碳排放强度是外生变量而碳税和碳排放总量为内生变量。中国宣布将使 2020 年单位 GDP 的碳排放量在 2005 年的基础上下降 40% ~ 45%。取上述目标的下限, 这约相当于使 2020 年的碳排放强度比 2007 年低 30%, 这就是此情景中碳排放强度的取值。其他外生变量的取值与基准情景相同。假定经济体系在确定

情形下演进,通过计算可以得到 2020 年中国经济总量、碳排放总量及其他内生变量的取值。将随机抽取的 1000 组要素和能源间替代弹性的取值依次输入模型,则可得到不确定情形下相应的经济-环境变化状况。<sup>①</sup>

表 4 外生变量取值

变量	取值	来源或依据
人口	2005 ~ 2015 年,年均增长 0.6%; 2015-2030 年,年均增长 0.3%	国际能源署 <sup>a</sup>
劳动总供给	2007 ~ 2020 年,增长 3.76%	根据李善同(2010) 的结果估计
总资本供给	2007 ~ 2020 年,增长 9.0%	
劳动增进型技术进步	年均提高 2.5%	各种技术进步率的 取值根据本文对中 国生产函数的估计 值设定
资本-能源合成投入的技术进步	年均提高 0.5%	
资本增进型技术进步	年均提高 0.1%	
能源增进型技术进步	年均提高 4.0%	
世界石油价格	年均上升 4.1%	世界能源价格变化 根据美国能源信息 署 <sup>b</sup> 的预测设定
世界天然气价格	年均上升 1.2%	
世界煤炭价格	年均上升 1.4%	
其他商品的世界价格	年均上升 2.0%	Zhang(1996)

数据来源:a 国际能源署 (IEA), *World Energy Outlook 2007: China and India Insights*, <http://www.iea.org>, 2007. b 能源信息署 (EIA), *Annual Energy Outlook 2012*, <http://www.eia.gov/forecasts/aeo>, 2012.

在总量限制情景中,碳排放总量外生而碳税和碳排放强度内生。为了使强度约束和总量限制在确定情形下等价,这里取确定情形下强度约束情景中得到的碳排放总量作为总量限制情景中碳排放总量的值。其他外生变量的取值也与基准情景相同。然后依次输入上述替代弹性的均值和随机取值,可以分别计算确定情形和不确定情形下总量限制的经济-环境影响。<sup>②</sup>

<sup>①</sup> 这相当于在同样强度约束下,保持其他参数不变,通过改变基本生产要素和能源之间替代弹性的取值模拟了 1000 种情景。

<sup>②</sup> 本文共选取了 1001 组参数,并分别在每组参数下模拟了两种情景。也就是说,虽然参数发生了变化,但文章始终保证对基本、强度约束和总量控制三种情景采用的参数相同,使其具有可比性。不过,本文只是假定在第 1 组参数即确定情形下强度约束和总量控制具有相同的最终碳排放量,而并不设定两者在后 1000 组参数即不确定情形下等价。而且,由于在后 1000 次模拟中,生产要素和能源之间替代弹性的取值不同于它们在第 1 次模拟即确定情形中的取值,因而,在确定情形中等价的强度约束和总量控制,在这些模拟中可能会产生不同的影响。

## 四 数值模拟结果

### (一) 确定情形下强度约束的影响

表 5 总结了确定情形下 2020 年中国在基准情景和强度约束情景中的经济发展(按 2007 年价格计算)和碳排放状况。在基准情景中由于未采取任何政策措施来限制碳排放,因而,无论是经济总量、碳排放总量还是碳排放强度都较高,而相应的边际碳减排成本即碳排放的影子价格或碳税为 0。在此情景下,2020 年中国的 GDP 约相当于 2007 年的 273%,年均增长约 8.0%。由于存在技术进步,基准情景中 2020 年中国的碳排放只相当于 2007 年的 215%,明显低于 GDP 的增长幅度,因而相应的碳排放强度与 2007 年相比下降了 21% 左右。

在强度约束情景中,要求 2020 年的碳排放强度在 2007 年的基础上下降的幅度(30%)相当于基准情景中的 1.4 倍,因而,此情景中实际 GDP 和碳排放总量也都低于基准情景中的结果。其中,实际 GDP 比基准情景低了约 434 亿元,而减少的碳排放总量约为 3.9 亿吨。由于给经济发展施加了碳排放强度约束,碳排放的影子价格也从 0 增加至 72 元/吨。同时,由于总量限制情景中的碳排放削减幅度直接取自强度约束情景中模拟得到的结果,因而在确定情形下这两种情景是等价的。

表 5 确定情形下 2020 年中国的经济-环境指标

情景	GDP (亿元)	碳排放总量 (百万吨)	碳排放强度 (千克/万元)	边际碳减排成本 (元/吨)
基准	726 410	3469	478	0
强度约束	725 976	3082	424	72

说明:按 2007 年价格计算。

### (二) 不确定情形下的蒙特卡洛模拟结果

在不确定情形下,本文分别对 3 种情景进行了 1000 次模拟,并通过样本检验了模拟次数的有效性。基准情景下以 99% 的概率保证 GDP 和碳排放强度估计值的均值和标准差的误差不超过 1% 所需要的模拟次数分别为 130 次和 752 次,以 95% 的概率保证碳排放总量的均值和标准差的误差不超过 5% 所需要的模拟次数为 32 次。强度约束情景下以 99% 的概率保证 GDP 和碳排放量估计值的均值和标准差的误差不超过 1% 所需要的模拟次数仅为 128 次;以 90% 的概率保证边际碳减排成本估计值的均值

和标准差的误差不超过 10% 所需的模拟次数为 382 次。总量限制情景下以 99% 的概率保证 GDP 和碳排放强度估计值的均值和标准差的误差不超过 1% 所需要的模拟次数分别为 125 次和 130 次;而以 90% 的概率保证边际碳减排成本估计值的均值和标准差的误差不超过 10% 所需的模拟次数为 474 次。因此,本文的模拟次数可以保证 GDP 和碳排放强度的估计误差超过 1% 的概率低于 1%,碳排放总量的估计误差超过 5% 的概率低于 5%,边际碳减排成本的估计误差超过 10% 的概率低于 10%,从而保证模拟结果的可靠性。

1. 不确定情形下进行碳减排的政策影响。表 6 显示了不确定情形下对各个情景进行蒙特卡洛模拟所得的结果。在各个情景中,GDP、碳排放总量以及碳排放强度的标准差都远远小于它们的均值,说明这些变量估计值的均值非常稳健。在不确定情形下,强度减排和总量减排都使 2020 年中国 GDP、碳排放总量及碳排放强度的期望值相对基准情景有所下降。其中,GDP 下降的幅度都在 0.1% 左右,碳排放总量和碳排放强度的下降幅度则都在 10% 左右。

同时,两种减排情景会分别导致边际碳减排成本的期望值从 0 增加至 76 元/吨和 80 元/吨。不过,在后两个政策情景中边际碳减排成本的标准差要大于均值。这意味着要素和能源之间替代弹性的变化使边际碳减排成本具有相当大的不确定性。因而,要素和能源之间替代弹性的取值对边际碳减排成本有较大影响。而且边际碳减排成本甚至有可能为负值,这是因为某些要素和能源之间替代弹性的取值有可能使基准情景下的 GDP 及碳排放总量低于强度减排目标和总量减排目标约束下的 GDP 和碳排放总量。此时,如果要维持设定的减排目标就需要继续增加碳排放,因而相应的边际碳减排成本为负值,这相当于要对能源消耗进行补贴来鼓励碳排放。<sup>①</sup>

2. 强度约束和总量限制的政策效果比较。比较不确定情形中强度约束和总量限制下各宏观指标的期望值可知,GDP 的相对差异只有 1‰左右,碳排放总量的相对差异不到 1%,碳排放强度的相对差异也只有 1% 左右,只有边际碳减排成本的相对差异略高一些,但也只有 5% 左右。由此可知,不确定情形下,强度约束和总量限制各种影

<sup>①</sup> 由于在不确定情形下,要素和能源中间替代弹性的取值发生较大变化,其中某一组弹性取值使得基准情景(即不施加任何碳减排约束)下 2020 年碳排放强度与 2007 年相比发生了很大幅度的下降,降幅超过了本文依据国家目标设定的强度减排情景下的下降幅度(30%),此时,如果仍然将下降 30% 作为碳强度减排目标,这就意味着 2020 年碳排放强度要从基准情景的较低水平上升到强度减排情景的较高水平。因此,在这组弹性取值下,强度减排情景相对于基准情景而言是鼓励碳排放,相应的边际碳减排成本必然为负值,即相当于补贴碳排放。类似地,在这组弹性取值下,总量减排情景下的碳排放也高于基准情景,因而边际碳减排成本也为负值。这些结果正是对碳减排政策影响不确定性的反映。

响的期望值不存在具有统计显著性的差异,或者说它们各种影响的期望值是等价的。不过,就具体的某一次模拟(某种特定的情境)而言,两种减排政策的影响却存在差异,尽管这一差异可能很小。

表 6 蒙特卡洛模拟结果

	GDP		碳排放总量			碳排放强度			边际碳减排成本						
	S0	S1	S2	S0	S1	S2	S0	S1	S2	S0	S1	S2			
均值	719	756	719	091	719	017	3415	3052	3082	473	424	429	0	76	80
标准差	31	752	31	234	31	054	493	133	0	50	0	19	0	81	106
最大值	783	109	780	102	778	958	4632	3311	3082	593	424	476	0	353	465
最小值	648	102	648	064	647	912	2349	2751	3082	362	424	400	0	-49	-51

说明:按 2007 年价格计算。S0、S1 和 S2 分别代表基准情景、强度约束情景和总量限制情景。GDP、碳排放总量、碳排放强度和边际碳减排成本的单位依次为亿元、百万吨碳当量、千克碳/万元和元/吨。

表 7 强度约束和总量限制下主要指标估计值差异的正负值频数

	D-GDP		D-碳排放总量		D-碳排放强度		D-边际碳减排成本	
	正值	负值	正值	负值	正值	负值	正值	负值
实际经济增长水平 超过预期水平 (共 467 次)	392	75	463	4	463	4	3	464
实际经济增长水平 低于预期水平 (共 533 次)	63	470	1	532	1	532	532	1

说明:符号“D-”表示指标差异,即强度约束对各指标的影响减去总量限制对各指标影响。

在随机数值模拟中,实际经济增长水平可以理解为不确定情形下基准情景中可能出现的经济增长水平;而确定情形下基准情景中的经济增长水平则相当于制定政策时预期的经济增长水平。如表 7 所示,在 1000 次模拟中,实际经济增长水平超过预期水平和低于预期水平的次数分别为 467 次和 533 次。当未来实际经济增长水平超过预期的增长水平时,强度约束下 GDP 大于总量限制下 GDP 的频率约为  $392/467 = 0.839$ 。换句话说,此时选择强度约束作为减排目标,获得更高 GDP 的概率约为 84%。相应地,在此情形下强度约束导致更高碳排放量和碳排放强度的概率都高达 99%。而强度约束下的边际碳减排成本则以 99% 的概率低于总量减排目标约束下的

边际减排成本。反之,当未来实际经济增长水平低于预期的增长水平时,强度约束将以 88% 的概率导致更低的 GDP,以 99% 的概率导致更低碳排放总量及碳排放强度,同时以 99% 的概率导致更高边际碳减排成本。这些数值模拟结果与本文推论 2 和 3 一致。

## 五 讨论与结论

现实世界中普遍存在的不确定性是选择温室气体减排目标及制定其他气候变化应对政策时需要考虑的重要因素。由于不确定性的存在,基于预期的经济和技术发展水平而制定的等价碳排放强度约束和总量限制最终会产生不同的经济-环境影响。通过本文的理论分析和基于 CGE 模型的随机数值模拟,我们可以得到如下结论:

### (一) 中国的碳排放强度约束是一个适度、有诚意的温室气体减排目标

中国提出的碳强度约束在国际社会引起了不少争论(Qiu, 2009)。一些分析者认为,上述强度减排目标仅是中国按当前的态势发展(business as usual)不需要付出额外努力就能实现的。本文模拟的结果表明,中国既定碳强度减排目标的实现有赖于中国整体生产技术的提高以及相关政策措施的制定与落实,包括继续实施“十一五”期间形成的一系列节能减排措施、鼓励研发和推广低碳技术与管理手段等。这存在很大的不确定性并会对中国的经济增长造成一定的负面影响。因此,中国要付出一定代价才能实现上述碳强度减排目标。

本文研究结果还进一步表明,在不确定情形下,当未来经济增长水平低于预期水平时,选择强度约束作为减排目标会比总量限制更有效地控制碳排放,但也会产生更大的边际减排成本和 GDP 损失。而各种不确定性的因素乃至突发事件(例如类似 2008 年的全球金融危机)很有可能使中国未来经济增长速度低于预期水平。因此,中国选择强度约束作为碳减排目标实际也面临重大风险,强度约束是一个有诚意的温室气体减排目标。

### (二) 国际气候变化协议应当允许发展中国家采用具有可调性的强度减排目标

对于中国及世界上诸多其他发展中国家而言,发展经济、提高人民生活水平仍是当前的重大战略任务。《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)提出的“共同但有区别的责任”原则指出,“发达国家缔约方应率先对付气候变化及其不利影响”,而“发展中国家缔约方能在多大程度上有效履行其承诺,将取决于发达国家缔约方对其在本公约下所承担的有关资金和

技术转让承诺的有效履行,并将充分考虑经济和社会发展及消除贫困是发展中国家缔约方首要和压倒一切的优先事项。”<sup>①</sup>

本文的分析表明,如果达成的气候变化协议采用总量限制作为减排目标,这不利于那些经济增长超过预期水平的国家。反之,如果协议采用强度约束作为减排目标,则经济增长超过预期水平的国家更容易实现既定目标,而对经济增长低于预期水平的国家来说,其既定目标的实现则变得更难。从现实情况来看,哪些国家的经济增长有可能超过预期水平呢?显然,以中国为代表的发展中国家更有可能成为这样的国家,而工业化国家的增长则更容易低于预期水平。尽管总量目标会更直接地约束温室气体排放,但《京都议定书》所确定的及其他类似的总量减排目标很有可能不利于发展中国家而有利于发达国家。考虑到强度减排目标可能更适合发展中国家,且更容易为发展中国家所接受,新国际气候变化协议应考虑为发展中国家引入强度减排目标。

不过,由此又会产生一个新的问题,即允许发展中国家采取与总量限制等价的强度约束时,如何在实现预期碳减排目标的同时给发展中国家更大的经济增长空间,从而缓解发展中国家与发达国家在减排责任分配上的矛盾?<sup>②</sup>结合本文的分析来看,如果能够在协议中引入如下一种责任调节机制,则有可能解决上述问题。

假定在协议期内,有明显迹象表明发展中国家的实际经济增长水平将高于预期水平,例如该国预期经济增长水平在协议有效期提前实现。此时,可适度强化该国的强度减排目标,或更严格一点,要求该国最终碳排放水平不应超过预期水平。反过来,如果有明显迹象表明该国的实际经济增长水平将低于预期的水平,则应当适度放松该国的强度减排目标。而且,在后一种情形中,考虑到发展中国家要优先发展经济,如果该国拿出更多的资金用于发展经济而降低环保投入,并由此而导致最终的碳排放水平超过预期的水平,这也应当被视为是合理的。当然,最好不超过预期的碳排放水平。

上述制度设计的一个重要政策含义就是发达国家应当尽量向发展中国家提供资金和技术援助。这些援助有可能在一定程度上促进发展中国家技术水平的提高,从而提高发展中国家实际经济增长水平高于预期水平的几率,以确保预期碳减排目标能够实现。当然,这些援助的作用很可能没那么大,但它们至少能在一定程度上减小实际增长水平低于预期水平的幅度,从而能减少发展中国家为达到预期经济增长水平而过度排放的二氧化碳。

① 见《联合国气候变化框架公约》(中文版)第3条(原则)及第4条(承诺)。

② 这个问题是由一位匿名评审人提出的。

### (三) 进一步研究展望

要指出的是,本文虽然从理论和数值模拟两方面对碳排放强度约束和总量限制进行了分析,但仍具有一定的局限性,值得在进一步研究中加以克服。其一,本文所做的理论分析和数值模拟是在比较静态分析框架下展开的,如何在动态分析框架下更为精确地比较这两种约束,这是本文一个重要拓展方向。其二,CGE 模型输出结果的精度取决于输入参数的精度,一些重要参数的精确估计仍是此类研究需要突破的薄弱环节,本文也具有这样的局限性。同时,为了简化分析,本文仅考虑了要素和能源之间替代弹性的不确定性,虽然这能在很大程度上满足本文的研究目的,但如果能将其他诸多重要参数及变量(如技术进步、国际资源价格)的不确定性纳入数值模拟,这会有利于对强度约束和总量限制的差异做出更为精确的评价。<sup>①</sup>其三,本文只简单讨论了在国际气候变化协议中引入强度约束的一些制度设计问题,而这也值得进一步深入研究。

#### 参考文献:

- 贺菊煌,沈可挺,徐嵩龄(2002):《碳税与二氧化碳减排的 CGE 模型》,《数量经济技术经济研究》第 10 期。
- 李善同(2010):《‘十二五’时期至 2030 年我国经济增长前景展望》,《经济研究参考》第 43 期。
- 马纲,郑玉歆,樊明太(1998):《征收碳税,实行 CO<sub>2</sub> 减排对中国经济影响的分析——中国 CGE 模型应用之二》载于郑玉歆,樊明太等著《中国 CGE 模型及政策分析》,社会科学文献出版社。
- 王灿,陈吉宁(2006):《用 Monte Carlo 方法分析 CGE 模型的不确定性》,《清华大学学报(自然科学版)》第 9 期。
- 姚昕,刘希颖(2010):《基于增长视角的中国最优碳税研究》,《经济研究》第 11 期。
- 杨春学(1997):《生产理论》,载于余永定,张宇燕,郑秉文主编《西方经济学》,经济科学出版社。
- 张友国(2010):《经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响》,《经济研究》第 4 期。
- Abdelkhalak, T. and Dufour, M. J. “Statistical Inference for Computable General Equilibrium Models with Application to a Model of the Moroccan Economy.” *The Review of Economics and Statistics*, 1998, 80, pp. 520–534.
- Abler, D.; Rodrigues, A. and Shortle, J. “Parameter Uncertainty in CGE Modeling of the Environmental Impacts of Economic Policies.” *Environmental and Resource Economics*, 1999, 14, pp. 75–94.
- Dissou, Y. “Cost-Effectiveness of the Performance Standard System to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions in Canada: A General Equilibrium Analysis.” *Resource and Energy Economics*, 2005, 27, pp. 187–207.
- Ellerman, A. D. and Sue Wing, I. “Absolute vs. Intensity-Based Emission Caps.” *Climate Policy*, 2003, 3, pp. S7–S20.

<sup>①</sup> 本文也针对要素投入效率变化的不确定性展开了小规模的数值模拟分析,模拟结果表明本文的结论仍是成立的。因此,本文的结论不会因不确定性范围的扩大而发生变化。尽管能源和要素之间替代弹性的不确定性不能全面涵盖中国经济面临的不确定性,但选取这一不确定性来分析本文讨论的问题却并不失一般性。

- Fischer, C. and Springborn, M. "Emissions Targets and the Real Business Cycle: Intensity Targets versus Caps or Taxes." *Journal of Environmental Economics and Management*, 2011, 62, pp.352-366.
- Goulder, L. H.; Parry, I.; Williams, III R. and Burtraw, D. "The Cost-Effectiveness of Alternative Instruments for Environmental Protection in a Second-Best Setting." *Journal of Public Economics*, 1999, 72, pp.329-360.
- Harrison, G. W. and Vinod, H. D. "The Sensitivity Analysis of Applied General Equilibrium Models: Completely Randomized Factorial Sampling Designs." *Review of Economics and Statistics*, 1992, 74, pp.357-362.
- Jotzo, F. and Pezzey, J. C. V. "Optimal Intensity Targets for Greenhouse Gas Emissions Trading under Uncertainty." *Environmental and Resource Economics*, 2007, 38, pp.259-284.
- Kolstad, C. D. "The Simple Analytics of Greenhouse Gas Emission Intensity Reduction Targets." *Energy Policy*, 2005, 33, pp.2231-2236.
- León-Ledesma, M. A.; McAdam, P. and Willman, A. "Identifying the Elasticity of Substitution with Biased Technical Change." *American Economic Review*, 2010, 100, pp.1330-1357.
- Newell, R. G. and Pizer, W. A. "Indexed Regulation." *Journal of Environmental Economics and Management*, 2008, 56, pp.221-233.
- Parry, I. W. H. and Williams, R. C. "Second-Best Evaluation of Eight Policy Instruments to Reduce Carbon Emissions." *Resource and Energy Economics*, 1999, 21, pp.347-373.
- Peterson, S. "Intensity Targets - Implications for the Economic Uncertainties of Emissions Trading," B. Hansjürgens and R. Antes eds., *Economics and Management of Climate Change: Risks, Mitigation and Adaptation*, New York; Springer, 2008, pp.97-110.
- Quirion, P. "Does Uncertainty Justify Intensity Emission Caps?" *Resource and Energy Economics*, 2005, 27, pp.343-353.
- Qiu, J. "China's Climate Target: Is It a Chievable?" *Nature*, 2009, 462, pp.550-551.
- Verikios, G. and Zhang, X. G. "Sectoral Impacts of Liberalising Trade in Services." Paper presented to the Third Annual Conference on Global Economic Analysis, Melbourne, Australia, June 27-30, 2000.
- Wang, K.; Wang, C. and Chen, J. "Analysis of the Economic Impact of Different Chinese Climate Policy Options Based on a CGE Model Incorporating Endogenous Technological Change." *Energy Policy*, 2009, 37, pp.2930-2940.
- Webster, M.; Sue Wing, I. and Jakobovits, L. "Second-Best Instruments for Near-Term Climate Policy-Intensity Targets vs. The Safety Valve." *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 59, pp.250-259.
- Weitzman, M. L. "Prices vs. Quantities." *Review of Economic Studies*, 1974, 41, pp.477-491.
- Zhang, Z. X. "Integrated Economy-Energy-Environment Policy Analysis: A Case Study for the People's Republic of China." Ph. D. dissertation, Wageningen University, 1996.

(截稿:2013年3月 责任编辑:王徽)