

碳减排成本代际均等化:理论与证据^{*}

郑新业 吴施美 郭伯威

内容提要:碳中和目标下减排任务的远近统筹是中国实现经济高质量发展的重要议题。本文基于 Hotelling 法则,以代际贴现效用之和最大化为目标,减排总量为约束,构建代际减排模型。研究发现减排代际均等化是使社会总效用最大化的必要条件,即在排除经济增长的影响后减排的边际效用、净收益(影子价格)以及碳排放价格的现值在不同时期均应相等,并进一步分析了温升目标、贴现率、技术进步等相关参数变化对减排路径以及碳定价的影响。最后,以中国为研究对象,探究了为实现碳中和的最优减排路径,提出应当在前期少减排,将更多的减排任务留给后期,从而将碳中和目标伴生的经济损失控制在 GDP 总量的 0.2%—0.4%,并基于此探讨了不同减排轨迹下的产业结构调整路径。

关键词:碳中和 经济模型 代际均等 产业结构调整

一、引言

党的二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和……立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步骤实施碳达峰行动”。这既体现了双碳目标的长期性和系统性,也强调了科学合理的计划在双碳目标实现过程中的重要性。作为世界上最大的发展中国家,中国发展过程中的不充分不平衡问题十分突出,碳中和目标的实现面临着降碳与经济发展以及公正转型等多项权衡取舍。因此,统筹考虑不同阶段的减排成本,研究设计科学合理的碳中和路径具有重大的政策价值和学术价值。

首先,在碳中和目标的约束下,如何平衡经济发展与减排的关系是亟需解决的重要问题。探索出一条适合中国的最优减排路径,使当前减排任务和长远发展紧密衔接,将是双碳目标和第二个一百年目标双达标的重要保障。已有研究表明,发展中国的经济增长与碳排放之间通常存在正相关关系(冯相昭和邹骥 2008; Ang 2009; 王锋等 2010)。若政府过度约束碳排放总量,将不可避免地对经济发展产生负面影响(Stern 2006; 林伯强等 2010)。虽然部分国家已经通过加快能源结构转型、征收碳税或者完善碳交易体系等手段措施逐渐淘汰了高耗能、高排放产业,并实现了大规模减排,但考虑到各国国情的差异,中国碳中和的实现路径不能盲目借鉴其他国家经验,否则可能导致减排成本过高,阻碍经济发展。若将中国和英国作对比,2019年两国的恩格尔系数分别为 28.2% 和 10.6%,说明当前中国消费者对于减排成本向下传导的承受能力较弱,现阶段过于激进的减排政策或将给消费者带来沉重的经济负担。^①因而,碳中和目标的紧迫性要求中国的减排方案只有从基本国情出发,才能在实践中有效破解经济发展与减排的双重困境(林伯强 2022),进而实现整个社会福利的最大化。

其次,减排的先后缓急将关乎不同世代的福利以及后代的权利(Stern & Stiglitz 2022),这意味着气候政策的制定需要从时间维度上进行充分考虑,并对减排任务进行阶段分解和科学分配。碳排放在大气

^{*} 郑新业,中国人民大学应用经济学院,邮政编码:100872,电子信箱:zhengxinye@ruc.edu.cn;吴施美,湖南大学经济与贸易学院,邮政编码:410079,电子信箱:wushimei@hnu.edu.cn;郭伯威(通讯作者),中国人民大学应用经济学院,邮政编码:100872,电子信箱:b.guo@ruc.edu.cn。本研究得到国家自然科学基金项目(72141308,72103061,72203218)的资助。作者感谢王春华、宋枫、林伯强、黄阳华、谢伦裕等人以及特别感谢匿名审稿人的有益建议。作者为可能的错误和遗漏负责。

^① 中国为 2019 年数据,来源:中国商务部;英国为 2018—2019 财年数据,来源:英国国家统计局。

中的长期存留性以及中国应对气候变化行动的长期性,决定了气候变化模型研究的时间尺度是长期多代的,当前关于气候行动的任何决定都会影响未来世代的福利。随着经济发展,后代将更加富裕,当前对于减排的支出实际上是减少当代人的消费,将财富转移给后代人。简言之,当下减排意味着将穷人的财富向富人转移(Gollier & Hammit 2014)。碳中和作为一个跨期四十年的宏伟目标,其减排时间表设定直接关系到不同代际的福利情况,因此中国气候变化政策的制定必须要充分考虑减排带来的中长期影响。

基于此,构建具有中国特色的气候变化减排模型,需要统筹发展与减排、中长期与短期以及整体与局部这三对关系,立足国情、发展阶段和实际能力探索出一条适合中国的最佳减排路径,并对减排任务作出系统性安排。这不仅对碳中和目标的高效实现和经济的持续高质量发展具有重要意义,也是保障世代福利最大化的题中之义。

本文对中国实现碳中和目标的最佳减排路径进行研究,重点回答“什么时候减排?减排多少?如何减排?”的问题,将减排总量作为负的可耗竭资源,构建以社会总效用最大化为目标,特定温升目标下减排总量下限为约束的减排模型。模型推导结果表明,实现社会总效用最大化的必要条件是保证每代人支付的边际减排成本(或碳价格)随着贴现率以及经济增长逐年上升,即“减排成本代际均等”。换言之,在排除掉贴现率以及经济增长的影响后,应当保证每代人支付的边际减排成本均等。“减排成本代际均等”意味着对减排投入的成本应当以不过度损害当代人的权益为前提,平衡不同时期减排的成本收益差异。本文在理论创新和实践指导两方面对现有研究进行了边际补充。

首先,实现了将代际均等引入减排模型的理论创新。目前国内外学者利用不同研究方法,从减排政策、机制与技术等角度对中国碳中和目标下的减排轨迹进行了分析,并产出了大量有价值的成果(解振华等 2020; Duan et al. 2021; 张希良等 2022)。然而,国外研究对中国问题探讨有限,且现阶段的研究鲜有探讨并解决减排力度的中长期差异问题。本文旨在填补这一空白,创新性地基于可耗竭资源开采模型及 Hotelling 法则,为中国碳中和目标下减排轨迹的探索构建了新模型,提出了在社会总效用最大化目标下实现碳中和的必要条件。

其次,为中国碳中和目标最优实现路径的制定提供了新的思路。一方面,将碳交易体系作为减排的主要政策工具,基于代际成本均等化这一必要条件,讨论了碳定价机制的路径选择问题。另一方面,为碳中和目标下的经济转型升级提供了新视角,采用因素分解法模拟出在社会效用最大化的情况下实现碳中和所需的产业结构调整路径。因此,为中国以碳交易和产业结构调整为主的长期减排规划提供了参考。

余文部分结构安排如下:第二部分为文献综述,第三部分为模型构建、扩展及推导,第四部分为研究命题及比较静态分析,第五部分为模型参数校准及拟合,第六部分探讨为实现碳中和目标所需的产业结构调整路径,第七部分总结并提出政策建议。

二、文献综述

目前欧美国家在气候变化建模领域处于前沿,大多数发达国家从各自立场出发,自主构建了气候变化评估模型,并用于指导气候政策的制定以及应对国际气候变化谈判。气候变化综合评估模型(integrated assessment models, IAMs)是目前评价气候政策最主流的分析工具(魏一鸣等 2013),最常见的气候与经济动态综合模型(dynamic integrated model of climate and economy, DICE)、气候与经济区域综合模型(regional integrated model of climate and economy, RICE)、温室气体政策效应分析(policy analysis of greenhouse effect, PAGE)、气候综合评估模型(integrated climate assessment model, ICAM)等模型均属于 IAMs。该模型被广泛用于减排政策的成本收益评估,通过对政策效果进行成本收益评价,确定最优的碳减排路径。Nordhaus 最早构建 DICE 模型对温室气体减排的行动缓急问题进行分析,并在与 Stern 的学术争论中提出“诺德豪斯之问”,即为何现在的“穷人”要为未来的“富人”买单。这直接引发了关于碳减排时段安排的争论。争论目前主要分为两派,一派是以

Nordhaus 为代表的渐进式减排方案(Nordhaus, 1992, 1993),即主张现阶段小规模减排,到中长期再逐步增加减排力度的气候政策斜坡理论;另一派是以 Stern 为代表的激进式减排方案(Stern, 2006),主张立刻采取坚决有力的减排行动。基于不同的政策主张,不同学者对减排行动的损失估计也大相径庭。Tol(2009)对13项IAMs的结果进行分析,发现减排行动造成的全球GDP损失平均在-4.8%—-2.5%之间;而Stern(2006)估计在不采取减排行动的情况下,气候变化带来的损失相当于每年全球GDP的至少5%,而立即采取有效减排措施,成本损失会降低到1%。两类气候政策主张的分歧主要源于不同学者对贴现率和技术进步等不确定性看法的差异。

贴现率选择的不一致是导致IAMs估计结果存在较大差异的重要原因之一,也被认为是造成Stern结论与其他学者截然不同的关键因素(Weitzman, 2007)。目前对贴现率这一参数取值的争议主要体现在公平和效率的权衡取舍上。Arrow(1999)将争论的观点分为伦理派和市场派。伦理派大多主张低贴现率,即接近于零的纯时间偏好率、非常低的相对风险厌恶和较低的消费增长率。Stern(2006)与Stern & Stiglitz(2022)认为气候变化过程中存在巨大的不确定性,较高的市场贴现率可能会低估气候变化带来的损失,因而建议在减排模型中采用较低的贴现率,《斯特恩报告》中采用的就是1.4%的低贴现率水平。但许多学者对如此低的贴现率并不认可,因为接近于零的纯时间偏好率与家庭在储蓄行为中显示出来的跨期偏好并不一致。市场派强调以市场中的实际回报率决定贴现率,这是因为减排决策是基于当前减排的边际成本与未来由减少的气候变化损失带来的边际消费收益进行比较得出的,因而主张渐进式的减排力度。例如,Nordhaus(2007)以及Tol & Yohe(2006)均主张较高的纯时间偏好率,因为较低的贴现率会使当前决策对于未来不确定性事件变得更为敏感,从而导致过度牺牲当期消费。Dasgupta(2007)虽主张较低的纯时间偏好率,但其同时主张较高的边际效用弹性,所以认为贴现率并不应该太低。以Nordhaus(2007)和Stern(2006)为代表的上述研究均主张固定贴现率,而Weitzman(2009)认为气候灾难具有小概率、大影响的厚尾属性,提出了随时间递减的动态贴现理论。可见,对于贴现率这一参数的选择,现有研究并未达成一致。

气候影响和损害成本以及技术进步也是气候变化经济模型中十分关键的参数。IAMs同时纳入了气候系统和经济系统两大系统,并利用模型工具对碳循环、水循环等复杂地球系统模式进行描述和刻画。其中对气候模块的设定与估计直接决定了研究中所采用的温升目标,这使得估计结果存在极大的气候敏感性。而气候影响和损害成本的不确定性主要来自气候敏感性,这就进一步涉及到对气候政策目标的设定。例如,究竟是 3.5°C — 4°C 更合理(Nordhaus, 2019),还是《巴黎协定》中的 1.5°C — 2°C 更为合理。之前大多研究均基于气候敏感性的细尾分布进行分析,而Weitzman(2009)认为细尾分布会低估气候灾难的可能性和损害程度,并认为人类社会在当前决策时应当依据预防原则,将当前的减排投资视为减缓未来气候灾难所支付的保险。近年来,部分学者提出温度上升对经济的影响是非线性的(Burke et al., 2015),越多越来的学者在研究中纳入更为现实的损害函数,并将气候和社会临界点考虑到IAMs中(Carleton & Hsiang 2016; Ciscar et al. 2019; Diet et al. 2021)。虽然对损害函数进行新的考虑可能会使IAMs更合理,但这些研究并没有解决模型中结果的敏感性(Stern & Stiglitz 2022)。除此之外,传统IAMs中的另一个问题在于未充分考虑技术进步,忽略了能耗降低可能带来的协同收益或双重红利,忽视了学习效应和技术扩散效应等问题,未考虑监管激励和碳价格等对技术进步的影响。因此,技术进步虽对气候变化至关重要,但对其进行准确的刻画却十分困难。

综上,IAMs通过采用成本收益分析的方法,利用边际损害函数和边际减排成本函数探索碳减排的最优路径,给发达国家气候政策的制定提供了一定的指导,但目前现有的IAMs模型大多是发达国家基于自身利益需求所构建的,难以满足中国经济社会发展的实践需要。同时,Pindyck(2013)指出IAMs模型对气候变化影响的描述缺乏理论基础,并且由于风险和不确定性的存在,包括温升目标的不确定性、时间偏好的不确定性和技术进步的不确定性等,不同的参数和函数形式的设定使得IAMs的结论非常敏感。

从国内研究来看,中国气候变化经济学模型的相关研究尚不充分。近年来,一些学者对现有气候变化经济模型进行了修正和扩展。例如王铮等(2015)遵循IAM范式,基于一般均衡模型,引入分部门的内生过程技术进步,构建了资本-产业演化和气候变化集成评估(capital, industrial evolution and climate change integrated assessment model, CIECIA)模型,结果发现Stern的方案适合发达国家减排路径的设计,但并不适合发展中国家,而Nordhaus方案更有利于发展中国家的经济发展。石莹等(2015)从经济平稳增长与能源成本最优的角度出发,构建了耦合的能源最优控制模型,考察了能源结构演化路径的选择对碳排放的影响。米志付(2015)将碳配额交易机制引入了RICE模型框架,同时构建了气候与经济综合评估模型(integrated model of economy and climate, IMEC),研究显示提前达峰虽然可以减少1.18%—5.40%的碳排放,但会造成1.41%—12.53%的GDP损失。Mi et al. (2017)基于IMEC得出类似结论,即过早达峰可能会造成GDP衰减。莫建雷等(2018)基于中国能源环境经济系统模型(China energy-economy-environmental model with endogenous technological change by employing logistic curves, CE3METL)考察了碳排放、能源消费及GDP的未来演化趋势,分析了达成各项目标所需的政策措施与成本。在CE3METL框架下,段宏波和汪寿阳(2019)通过引入负排放技术,构建了技术诱导的CE3METL,考察了负排放技术与经济、排放的动态响应关系。

尽管一些学者和机构基于中国国情自主研发了气候政策评估模型,例如中国气候变化综合评估模型(China's climate change integrated assessment model, C³IAM)、CE3METL、IMEC等,但多数仍沿用国外的主流模型框架(张莹, 2017),通过调整个别参数与方程形式对减排的收益和成本进行估计,难以准确反映中国经济社会发展的实践。相较于传统IAMs模型,本文结合了经典的Hotelling法则,从传统的IAMs框架中脱离出来,构建了“减排成本代际均等模型”,重点考察了碳减排路径在短中长期的安排规划问题,着重讨论了温升目标、贴现率和技术进步等附加红利对中国减排路径的影响,并首次提出“代际减排均等化”的概念。此外,不同于部分研究侧重于内生技术进步或能源结构的影响,该模型有机集成了技术进步、资源禀赋、能源效率提升、产业结构调整等因素,综合构建了经济减排指数,全面刻画了经济社会发展过程中各因素的互动关系及其对碳中和的影响。在对碳中和目标的实现路径分析中,针对中国有别于发达国家的现实特点,本文从中国实际情况校准获得关键的参数和数据,科学评估了减缓气候变化所带来的经济成本,使碳减排模型的模拟结果更具有实践指导意义,也对现有研究进行有益补充。

三、减排成本代际均等模型

本文将减排的总量要求作为负的可耗竭资源,基于可耗竭资源开采模型及Hotelling法则(Hotelling, 1931)构建减排模型,模型的目标函数为社会总效用最大化,约束条件为特定温升目标下的减排总量下限。

(一) 基本模型

假设某经济体每时段的社会效用 $V(m_t)$ 与减排量 m_t 负相关,函数形式为关于减排量 m_t 的凹减函数,即 $V_m(m) < 0$ 且 $V_{mm}(m) < 0$ 。换言之,每一时段的社会效用随减排量的增加而降低,且边际效用递减。政府的目标是实现所有时段的贴现效用之和最大化,即:

$$\max_{m_t} \sum_{t=0}^T (1-r)^t \cdot V(m_t) \quad (1)$$

其中 $t=1, 2, \dots, T$ 为总时期数, m_t 是 t 时段的减排量, r 为贴现率。

受《巴黎协定》约束,假设该经济体从第0到第 T 时段的减排总量下限为 S ,^①有:

^① 《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内,并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内,这意味着各国在未来一个世纪的碳排放总量一定。因此《巴黎协定》下的减排量为无政策情境下的排放量与《巴黎协定》下的排放量之差。

$$S - \sum_{t=0}^T m_t \leq 0 \quad (2)$$

在(2)式的约束下对(1)式进行求导,可得:

$$V_{m_t}(\cdot) = (1-r) \cdot V_{m_{t+1}}(\cdot) \quad (3)$$

进一步地,令 p_t 为 t 时段减排的影子价格(或边际净收益)。基于传统可耗竭资源开采模型中的霍特林法则(Hotelling Rule)①,各时段减排的边际社会效用应当等于其影子价格,即 $V_{m_t}(\cdot) = p_t$,代入(3)式,可得:

$$p_t = (1-r) \cdot p_{t+1} \quad (4)$$

(3)式和(4)式表明,为使社会总效用最大化,应保证不同时段减排的边际效用现值相等,且不同时段减排的边际净收益的现值也相等,即应当满足减排边际净收益的代际均等。

(二) 模型扩展

由于中长期经济发展会带来技术进步、能源效率提升、产业结构调整、经济集聚、人力资本提升等附加红利,可大幅度降低减排成本。本文在基本模型的基础上加入指数 g 来体现这一效应,并将 g 命名为经济减排指数,用以模拟在考虑经济发展会带来附加红利的情况下,随时段 t 变化,减排对社会效用 $V(m_t)$ 负面影响的降低。

不可否认,该指数受政策等因素影响较大,具有一定的内生性。但是,若将其作为内生变量,则会极大地增加模型的复杂程度,牺牲简洁性。因此,本文将经济减排指数视作外生变量。随着时段 t 的推移,假设同样的减排量对于社会效用 $V(m_t)$ 的影响将以指数 g 的速率降低,则(3)式和(4)式演变为:②

$$V_{m_t}(\cdot) = (1-r)(1-g) \cdot V_{m_{t+1}}(\cdot) \quad (5)$$

$$p_t = (1-r)(1-g) \cdot p_{t+1} \quad (6)$$

(5)式和(6)式表明,为了使社会总效用最大化,应当在考虑到经济减排指数的影响后,保证不同时期减排净收益的现值均等。在更为复杂的模型中, $(1-g)$ 可以细化为上述各附加红利的相关参数,即:

$$(1-g) = (1-g_{Tech})(1-g_{Eff})(1-g_{Stru}) \cdots \quad (7)$$

其中 g_{Tech} 、 g_{Eff} 、 g_{Stru} 等分别表示技术进步、能源效率提升、产业结构调整对减排边际成本(以及减排的边际净收益和边际效用)的影响程度。

(三) 模型推导

为进一步探究为实现社会总效用最大化所需的减排路径,假设碳定价是唯一的减排激励机制。这是因为,一方面,碳定价工具能够充分内在化碳排放的外部性(Pigou, 1920),且实施成本最低,通常被认为是最高效的减排政策工具(Borenstein, 2012);另一方面,碳定价能从侧面反映减排所需的政策执行力度。③ 碳定价工具通常分为两种:碳税以及碳交易体系。考虑到中国已建成全国统一的碳交易市场,计划逐渐将各行业纳入碳交易体系中,因此可以将本文的碳定价机制理解为碳交易体系。

当社会总效用最大化时,碳定价 c_t 等于减排影子价格的相反数,即 $p_t = -c_t$,代入(7)式有:

$$c_t = (1-r)(1-g) \cdot c_{t+1} \quad (8)$$

① 霍特林法则的推导,留存备索。

② 与之对应的目标函数变为 $\max \sum_{t=0}^T (1-r)^t \cdot (1-g)^t V(m_t)$ 。

③ 其他环境政策,如对绿色产业的补贴(例如,清洁能源补贴、电动汽车补贴等)和对高耗能产业的行政监管(例如,强制关停、设立碳排放标准等)则可视作次佳选择(Gugler et al., 2020)。当然,越来越多的多学者认为碳价格与其他环境政策相辅,能起到加速减排的效果(Rosenbloom et al., 2020; 陈诗一, 2011)。

(8) 式表明为实现社会总效用最大化, 碳定价的增长率应为 $1/[(1-r)(1-g)] - 1$, 同时也表明不同时期的碳定价现值在考虑经济减排指数的影响后应当相等。(3) 式—(6) 式和(8) 式即为本文对“减排成本代际均等”的全面表述。

进一步对(8) 式进行递归替换, 有:

$$c_t = \frac{c_0}{[(1-r)(1-g)]^t} \quad (9)$$

(9) 式体现了社会总效用最大化情况下, 碳定价的变化趋势与贴现率 r 和经济减排指数 g 相关, r 和/或 g 越大, 碳定价的增长速率越高。换言之, 如果政府低估了贴现率以及经济减排指数的影响, 将会导致在前期制定过高的减排目标, 偏离使社会总效用最大化的减排轨迹。

根据(9) 式, 如果对碳定价与减排量之间的关系做出合理假设, 则可以推算出社会总效用最大化情况下减排量随时间的变化轨迹。假设减排量与碳定价的关系为不变弹性 $1/b$, 即:

$$c_t = am_t^b \quad b > 0 \quad (10)$$

其中 a 为常量参数。用(10) 式中的 m_t 替换(9) 式中的 c_t , 可得使社会总效用最大化的情况下, 减排量 m_t 的变化轨迹:

$$m_t = \frac{m_0}{[(1-r)(1-g)]^{t/b}} \quad (11)$$

即 r 和/或 g 越大, 减排量的增长速率越大, 越应当将更多的减排任务留至后期。

若将(2) 式中的 m_t 替换为(11) 式中关于 m_0 的方程, 可得

$$m_0 = \left[S / \left(\frac{1 - \theta^{T+1}}{1 - \theta} \right) \right] \quad (12)$$

其中,

$$\theta = \left[\frac{1}{(1-r)(1-g)} \right]^{1/b} \quad (13)$$

(12) 式给出了在 $t=0$ 时期减排量的表达式与总减排量 S 、贴现率 r 、经济减排指数 g 以及碳定价的弹性 $1/b$ 的关系。若上述参数均已知, 则可得出 $t=0$ 时的减排量, 并进一步通过(10) 式得到 $t=0$ 时的碳定价, 以及根据(9) 式得出社会总效用最大化时每一时期的碳定价。

例如, 假设在基线情境下 $a=1, b=2, r=0.05, g=0.03, S=100, T=40$ ①, 则图 1 展示了为实现社会总效用最大化, 碳定价及减排量应当遵循的变化轨迹。结果显示, 减排量及碳定价应逐期上升。值得特别说明的是, 图中的碳定价为指数价格, 该指数价格既反映了不同时期碳定价的差异, 也反映了不同时期减排政策强度。此外, 因总减排量 $S=100$, 每时期减排量为总减排量的百分比。

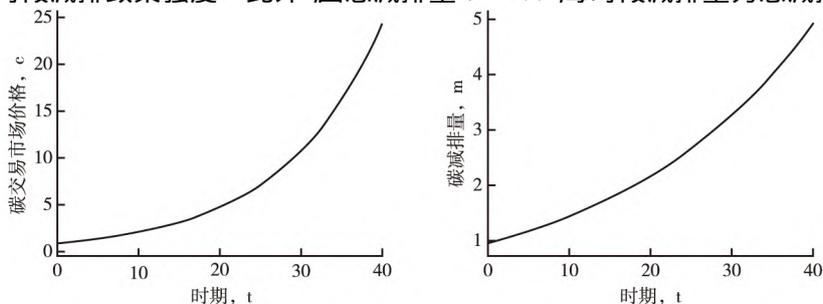


图 1 基线情境下碳价格及减排量变化轨迹

① $r=0.05$ 与相关文献中贴现率的取值相近; $S=100$ 表示设减排总量为 100 份; $T=40$ 表示从 2021 年至 2060 年的 40 年期间实现碳中和目标; a, b 和 g 的取值均在合理区间, 后文将对此进行详细讨论。

四、研究命题及比较静态分析

至此,本文以社会总效用最大化为目标,以减排总量下限为约束,推导出碳定价以及减排量在基线情境下的变化轨迹。该轨迹反映了满足社会总效用最大化的必要条件是保证不同时期的碳定价现值在考虑经济减排指数的影响后相等,即减排成本代际均等。接下来,本文将讨论减排模型中各参数的经济学意义,提出研究命题,利用比较静态分析,模拟参数变动对碳价格以及减排轨迹的影响,并对研究命题进行验证。

命题 1: 相较于 2℃、1.5℃ 温升目标将极大地降低社会总效用

《巴黎协定》确立了“本世纪内将全球平均温升控制在 2℃ 以内(较工业化前水平),并努力控制温升幅度不超过 1.5℃”的长期目标。虽然《巴黎协定》并未对各国的碳排放轨迹提出具体要求,但温升目标实际上已间接对各国本世纪的碳排放净值总量设立了上限。假设在无政策干预的情况下,中国未来 40 年的碳排放总量为 E ,而在特定的温升目标下碳排放总量须控制在 \bar{E} ,则定义未来 40 年的需要减排的总量为:

$$S = E - \bar{E} \quad (14)$$

在不同的温升目标下, \bar{E} 的取值不同,导致减排总量 S 的取值不同。根据 Climate Action Tracker (CAT) 提供的数据,可以大致估计在 1.5℃ 与 2℃ 的温升目标下,中国所需的减排总量的比值为 1:1.7。^① 因此,假设基线情境 ($S = \underline{S} = 100$) 所对应的是 2℃ 的温升目标,则在 1.5℃ 的温升目标下, $S = \bar{S} = 170$ 。将 1.5℃ 与 2℃ 温升目标下 S 的取值代入上述减排模型中,得出在不同温升目标下减排量以及碳价格的变化轨迹,并进行对比。

从两种情境下减排量以及碳定价的变化轨迹来看,^②在 1.5℃ 的温升目标下,减排压力明显增大,碳定价也远高于基线情境。由于每时段减排量 m_t 与减排的效用函数 $V(m_t)$ 负相关,意味着在 1.5℃ 的温升目标下,更大的减排量导致社会总效用更低。因此,1.5℃ 的温升目标意味着更高的减排成本以及更低的社会总效用。具体而言,若将两种情境下的减排量与碳价格相乘并进行对比,可以得出 1.5℃ 的温升目标带来的社会总效用的损失大约是 2℃ 温升目标的五倍。这一结论与段宏波和汪寿阳(2019)的发现一致,即 1.5℃ 的温升目标带来的经济损失将远高于 2℃。

命题 1 也可通过代数推导的方式证明。令在 1.5℃ 与 2℃ 温升目标下 t 时期的减排量分别为 \bar{m}_t 和 \underline{m}_t ,则在(12)式中,由于 $\bar{S} > \underline{S}$,有 $\bar{m}_0 > \underline{m}_0$ 。将 \bar{m}_0 和 \underline{m}_0 分别代入(11)式,可得 $\bar{m}_t > \underline{m}_t, \forall t$,即 1.5℃ 温升目标下任意时期的碳排放量都大于 2℃ 温升目标。由于 $V_m(m) < 0, V(\bar{m}_t) < V(\underline{m}_t), \forall t$ 故:

$$\sum_{t=0}^T (1-r)^t \cdot V(\bar{m}_t) < \sum_{t=0}^T (1-r)^t \cdot V(\underline{m}_t) \quad (15)$$

即 1.5℃ 温升目标下的社会总效用将低于 2℃ 温升目标。

命题 2: 低估贴现率会导致前期过度减排,降低社会总效用

贴现率是一个极其重要且具有争议的参数,其取值往往对长期政策决策产生巨大影响。如何将贴现率的不确定性考虑到气候变化模型中,将时间偏好的不确定性最小化,对于气候政策的设计尤为重要(段宏波等 2014)。

^① CAT 给出了中国 2020—2030 年以及 2050 年为实现《巴黎协定》1.5℃、2℃ 温升目标下的碳排放量,以及不进行减排情境 (business as usual, BAU) 下的碳排放量。CAT 所建议的 2050 年 BAU、2℃ 与 1.5℃ 温升目标下的碳排放指标分别为 121 亿吨、83 亿吨和 55 亿吨。取其差值得出不同温升目标下的减排总量比约为 1:1.7。详见 <https://climateactiontracker.org/countries/china/2020-09-21/>。

^② 相关图表,留存备索。后同。

在减排模型中, 贴现率 r 是指将未来效用转变为当前效用的转换率。 r 越大, 则后期效用在当前的价值越低。例如, 当贴现率分别取 1% 和 7% 时, 两百年后的 100 万元在今天的价值分别为 13.7 万元和 1 元, 而以上两种贴现率的取值均在不同的专家学者提出的合理取值范围内。贴现率 r 可以通过拉姆齐方程来表示 (Ramsey, 1928):

$$r = \rho + \eta g_c \quad (16)$$

其中 ρ 为社会时间偏好率, 度量未来福利之于当前福利的参数。 ρ 越大, 说明社会对未来获得 (或消费) 的事物越缺乏耐心, 也越不重视气候变化给后代带来的损失以及当代减排给后代带来的利益。 g_c 为人均消费增长率, 其符号与大小均会影响贴现率。当 g_c 趋近于 0, 即人均消费不再增长, 贴现率等于纯粹的时间偏好率。 η 为边际效用弹性, 衡量了边际效用对单位消费变动的弹性, 也反映了社会对代际不平等的厌恶程度; η 越大, 则在相同消费增长率的情况下, 社会对不同时期经济不平等越厌恶, 贴现率越大。

发展中国家的经济增速往往高于发达国家, 因此发展中国家拥有更高的消费增长率 g_c , 其贴现率也往往高于发达国家。这说明发展中国家将社会资源使用在其他领域的回报率高于用于改善气候变化的收益, 所以在减排和其他投资之间的权衡取舍中, 发展中国家可能会更倾向于在其他领域而对非气候变化进行投资。以中国为例, 若假设未来四十年的消费增长率 $g_c = 4\%$, 且全社会对跨期经济不平等的厌恶程度 $\eta = 2$,^① 则适用于中国的贴现率 r 至少为 8%, 远高于学者们所提倡的传统发达国家贴现率的取值。基于上述假设, 将 $r = 0.08$ 代入减排模型, 并与基线情境 ($r = 0.05$) 进行对比, 可以得出在两种情境下碳价格与减排量随时间的变化轨迹。

对于更高的贴现率, 减排初期应设定更低的碳价格并小幅度减排, 将大部分的减排任务留至后期。换言之, 在政策制定过程中, 低估贴现率会导致在前期过于激进的减排, 降低社会总效用。

命题 2 同样可以用代数的形式呈现, 分别由 (12) 式和 (13) 式可得 $\partial m_0 / \partial \theta < 0$ 和 $\partial \theta / \partial r > 0$ 。因此, 首期减排量 m_0 与贴现率 r 呈负相关, 即贴现率若被低估, 首期减排量越高。由 (11) 式可得, 较高的首期减排量同样意味着较高的前期减排量。但是, 由于在《巴黎协定》的约束下, 未来四十年总减排量一定, 较高的前期减排量意味着较低的后期减排量。这意味着低估贴现率会导致前期过度减排, 使减排轨迹偏离使社会总效用最大化的减排轨迹。

命题 3: 经济增长的附加红利允许将更多的减排任务留至后期

经济发展刺激经济转型, 会带来诸如技术进步、能源效率提升、产业结构调整、经济集聚以及人力资本提升等一系列的附加红利 (张伟等, 2016; 安超和雷明, 2019; 邵帅等, 2019; 杨莉莎等, 2019), 进而降低碳排放同时降低减排成本。换言之, 即使没有激进的减排政策干预, 当经济发展到一定程度后, 碳排放量也将自动达峰, 而后呈下降趋势。

经济减排指数 g 可以看作是根据各类减排措施构建的综合性指标, 并可将这些措施概括为总量减排、结构减排和技术减排三类。首先, 单纯从直接减排的角度来看, 产业结构调整 and 经济发展方式转变是促进总量减排的重要抓手。目前, 以出口为导向和依赖高耗能高排放的经济发展方式仍在部分省份占有重要地位, 通过对能源需求侧排放的源头治理, 将有助于降低碳排放。未来中国产业结构若逐渐优化, 减排产生的经济社会成本 (例如就业等) 将远低于当前减排行动所产生的成本。

其次, 结构减排通过能源结构调整来实现, 这既包括非化石能源比重的提升, 也包括化石能源的清洁利用。新能源投资的增加会带来能源结构转型。电源结构向新能源的转型将能大幅提升能源供给质量, 降低碳强度。在当前技术水平难以大幅提升的情况下, 新能源成本处于较高水平, 但随着时间推移, 技术进步带来成本下降, 将有助于降低未来减排成本。

^① $\eta = 2$ 接近于 Nordhaus (2007) 的取值。若 $\rho > 0$, 则贴现率将更高。

最后,技术减排主要体现为技术进步带来的能源利用效率提升和优质能源的使用成本降低,这在推进能源结构优化的同时,可直接降低源头排放。此外,技术进步还会对碳吸收产生正面影响,未来大规模储能、氢能、碳捕捉与封存等技术的成本将持续降低,进一步助推碳中和目标的实现。若不考虑技术进步,减排可主要通过限制产量来实现,这会带来福利损失;而将技术进步纳入模型框架则对降低减排成本或减缓减排损失有一定效果。一方面,技术变化所带来的产出增加、运营成本降低以及规模经济等效益能在很大程度上降低气候变化政策所带来的潜在经济损失。另一方面,技术进步往往能有效降低投资总成本,并促使对能源技术的投资更早出现。因此,在模型中对技术进步进行刻画是必不可少的。

事实上,测算 g 面临三个困难。其一, g 的取值取决于未来相关政策强度,具有极高的不确定性;其二,社会效用函数的参数形式未知且缺少实证所需的用于测算减排对社会总效用影响的相关数据;其三,上述附加红利可能存在遗漏或重复计算的情况,导致对 g 的估算产生误差。^①由于政府政策可以对 g 的取值产生影响,因而探讨 g 的变化对碳定价以及减排轨迹的影响将对政策制定具有一定的参考意义。

将基线情境与 g 被忽略的情境进行对比,模拟经济减排指数对碳定价及减排量变化路径的影响。 g 与贴现率 r 的影响相似,若 g 被忽视,则会在前期过度减排,降低社会总效用。换言之,经济发展的附加红利意味着可以将更多的减排任务留至后期。

命题3的代数呈现形式与命题2类似。由于 $\partial\theta/\partial g > 0$ 且 $\partial m_0/\partial\theta < 0$,可以推算出 g 越大,则使社会总效用最大化的减排轨迹应为前期更小,后期更大。由此可以得出,经济增长的附加红利允许将更多的减排任务留至后期。

命题4:通过绿色投资降低减排成本,将增加社会总效用

通常而言,减排量越大,减排的边际成本越高,所需的碳定价越高。这一关系可以通过减排的供需曲线来表示。减排成本较低的产业位于供给曲线的左侧,反之位于右侧。在完善的碳排放交易体系下,政府制定的碳排放总量间接决定了减排的需求量,故减排的需求曲线垂直于横轴,需求量为政府设定的减排总量下限。本文假设减排的供给曲线为非线性的不变弹性供给曲线,用(10)式表示。对(10)式的两边取自然对数,有:

$$\log c_t = a + b \cdot \log m_t \quad (17)$$

因此 a 的变动会对(17)式的截距产生影响, b 的变动会对斜率产生影响。

短期内 a 和 b 的值相对恒定,但长期政策会对其取值产生影响。一方面,随着绿色产业技术进步,过去十几年(或几十年)清洁能源成本逐年降低,可以预测未来工业、交通、建筑以及碳汇等领域的减排成本也将随着新技术的出现及发展而逐年降低。因此,预计 a 将随 t 递减。另一方面,政府政策的持续性会给绿色低碳投资带来足够的信心,绿色金融的蓬勃发展有助于将投资引向促进长期减排的金融服务中,进而降低供给曲线上各个产业(建筑业、航空航天业、畜牧业、碳捕捉等)的减排成本,使长期减排供给函数更富有弹性,使 b 更小。换言之, a 和 b 均应为动态参数,两者均随时间变化逐渐变小,其变化幅度取决于绿色产业技术进步的速率。

为了简化问题,将 a 和 b 的取值设定为整个 T 时段的平均值。当投资者信心不足,导致减排成本下降的幅度有限时, a 和 b 逐年降低的幅度较少——假设此时 a 和 b 的取值与基线情境相同;当投资者信心充足,大量资金涌入绿色投资,导致减排成本急剧下降时, a 和 b 的变化幅度较大, a 和 b 的取值较小。在本部分,除了基线情境中的 $a=1$ 、 $b=2$,还增设了两个情境,分别为 $a=0.5$ 、 $b=2$

^① 另一种看似可行的办法是假设 g 在碳中和目标的前20年和后20年取不同的值。但此方法也会破坏模型的简洁性,导致模型的解析解过于复杂。因此对 g 的估算并不在本文的讨论范围内,这将在后续文章中对其进行更深入的研究。

与 $a=0.5$ 、 $b=1$ 。

值得一提的是 a 的变化仅会对碳定价而非减排量产生影响 $a=0.5$ $b=2$ 时的减排轨迹与基线情境完全重合。这是因为 a 是(17)式中的截距项,体现的是整个经济体减排成本的高低,而非不同产业减排成本的差异。可见 a 的变化只会改变减排成本,而非不同时期减排量的分配。减排相关政策的持续性使 a 和 b 更小,进而使碳定价(尤其是后期碳定价)大幅降低。由于更低的碳定价意味着更低的边际减排成本以及更高的社会总效用,所以 a 和 b 的下降不仅有助于降低前期的减排压力,也意味着应将更多的减排任务留到后期。

最后,用代数的形式证明命题4。由(12)式和(13)式可得 $\partial m_0 / \partial \theta < 0$ 且 $\partial \theta / \partial b < 0$ 。可见 b 与初期减排量 m_0 为正相关。换言之,若 a 一定 b 越小,则平均减排成本越低,社会总效用最大化条件下的初期减排量越低,因此前期的减排量也会较低。由于总减排量一定,前期较低的减排量意味着后期较高的减排量。又由于 a 与 m_0 及 m_t 均不相关, a 的变化不会对各时期的减排量产生影响。但是,由于 a 与减排的影子价格 c_t 正相关,因此 a 越小 c_t 越小,减排成本越低,社会总效用越高。综上,通过绿色投资可以降低减排成本,进而增加社会总效用。

五、模型拟合与参数校准

在上一节,本文赋予了各参数经济学意义,模拟了各参数变化对碳定价及减排轨迹的影响,并探讨了背后的政策含义。结果显示,无论参数如何变动,要使社会总效用最大化,必须保证减排成本代际均等,与之相应的减排轨迹为单调递增的凸函数。本部分将减排模型与中国碳中和目标实际情况相结合,模拟出碳中和目标下使社会总效用最大化的碳定价以及减排轨迹变化。同时,该轨迹也保证了减排成本代际均等的实现。然后,将CAT提供的在无政策干预(BAU)情景下的中国碳排放轨迹与减排模型所建议的不同时段减排量做差,得出碳中和目标下的碳排放变化轨迹。

(一) 中国实现碳中和的基准路径

本文模型虽然限制了碳排放总量,却并未对双碳目标所要求的当 $t=10$ 时碳排放达到峰值、当 $t=40$ 时碳排放为零进行限制。尤其是2060年的碳中和目标意味着最后一时期的减排量,应该与BAU情况下的碳排放量相等,即:

$$m_T = E_T \quad (18)$$

其中 E_T 表示在无政策干预的情况下最后一期的碳排放量。若要满足上式,须进行参数校准。此外,相较于2060年实现碳中和目标,2030年碳达峰目标更容易实现,因此在模型中不对其进行额外约束,但在最后模拟出的减排轨迹中确认碳达峰目标是否能够在2030年前自然实现。

相较于其他参数,经济减排指数 g 有很大的不确定性,其取值在很大程度上取决于政策强度。本部分将 g 作为需要校准的目标参数,通过改变其取值使(18)式成立,以实现碳中和目标。换言之,若要保证实现碳中和目标,本文将给出中国的经济减排指数 g 需要达到的最小值。这也意味着需要在技术进步、能源效率提升、产业结构调整、经济集聚、人力资本提升等各方面进行资本投入,使中国真实的 g 值不小于模型中推导出的值。

基于CAT对中国在不同升温目标下的温室气体排放量的预测,本文对中国碳中和目标下的碳减排轨迹进行模拟。需要说明的是,CAT只提供2050年以前的数据且不将碳汇涵盖在内。^①为估算2060年的相关数据,首先假设自2030年至2060年在不同减排目标下的碳排放呈等比数列递减趋势,并假设在没有政策干预下,中国未来碳排放轨迹遵循CAT中所预测的BAU情境。

^① 碳汇是指通过植树造林、森林管理、植被恢复等措施,利用植物光合作用吸收大气中的二氧化碳,并将其固定在植被和土壤中,从而减少温室气体在大气中浓度的过程、活动或机制。

此外,依据世界资源研究所(2020)的数据,乐观假设到2060年中国碳汇所吸收的碳排放为20亿吨。届时,碳排放与碳汇相抵消,实现碳中和目标。据CAT估算,在无政策干预的情况下,未来四十年中国的碳排放总量约为5160亿吨,在2℃的温升目标下需减排约1370亿吨(即 $S = 1370$)。

关于中国的贴现率取值,基于拉姆齐方程(16)式 g_c 取4%, ρ 和 η 根据Nordhaus(2007)建议的取值,分别为1.5%和2%。^①因此,贴现率 r 取9.5%。最后,假设减排供给曲线40年的平均弹性为0.5(即 $b = 2$)。

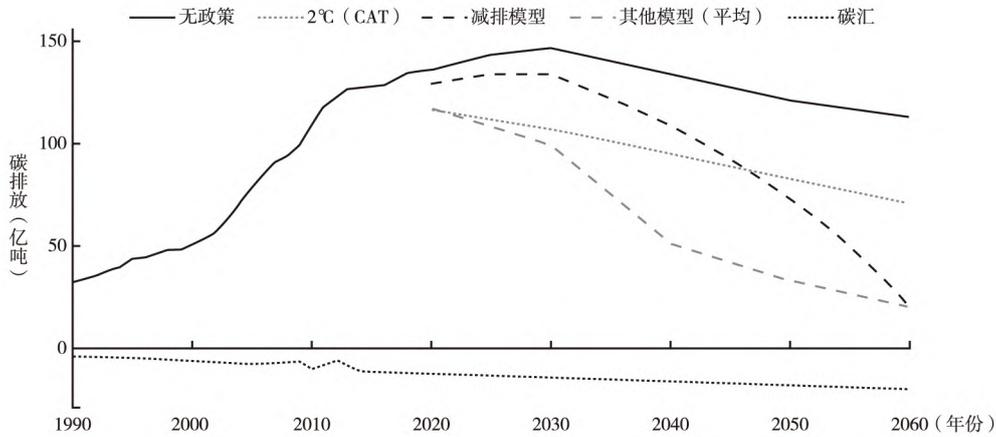


图2 中国碳中和目标下碳排放轨迹

图2对比了中国在无政策、CAT所建议的2℃温升目标(以下简称CAT模型)和本文减排模型所建议的碳排放轨迹,以及世界资源研究所(2020)模拟的其他模型(以下简称其他模型)的平均碳排放轨迹。结果显示,在没有政策干预的情境下,中国碳排放呈现倒U型曲线,将于2030年左右自动实现碳达峰。本文模型建议,应当在2020—2030年间实施较低的碳价格并进行少量减排,从而在2050—2060年间享受技术进步、能源效率提升、产业结构调整、经济集聚、人力资本提升等因素带来的附加红利,大幅提高碳价格、加速减排,并于2060年实现净零排放。研究表明,如果要将更多的减排任务留至后期,则往往需要更强有力的政府政策(Luderer et al., 2016),这与中国的基本国情相符。

图2还展示了另外两种情境下中国的碳排放轨迹。一方面,虽然本文的减排模型与CAT模型在未来四十年的总排放量相同,但CAT模型不能实现碳中和目标。另一方面,相较于其他模型,虽然在本文的减排模型中,中国将排放更多的二氧化碳,但在早期得到了更多的经济发展,且经济的整体水平受碳中和目标的影响更小。若假设在 t 时期,不同模型的减排量带来的成本差异为 $c_t \cdot \Delta m_t$,即碳价格 c_t 与不同模型在同一时期的减排量的差异 Δm_t ,则可以大致估算出相较于无政策情境,本文提倡的排放轨迹在实现碳中和目标过程中的总成本(贴现后2020年价值,下同)在8万亿—16万亿人民币之间,约等于中国2020年GDP的8%—16%。^②若将其平摊于未来40年,则碳中和目标对中国GDP的年均影响仅为0.2%到0.4%之间。相较于其他模型,减排模型使减排总成本降低了6.4万亿—12.8万亿,约下降了一半;相较于CAT模型,减排模型虽然多付出了0.7万亿—1.4万亿的成本,却实现了碳中和目标。

① 下文中,将探讨改变 ρ 和 η 的取值对结论的影响。

② 此计算基于两种不同的碳价格情境($a = 0.5$ 和 $a = 1$)。在较为乐观(悲观)的情境下,碳价格2020年的起始价格为23.5(47)元,2060年的碳价格为4300(8600)元。

(二) 相关参数变化的影响

在上一小节中谈到,为实现碳中和目标,需要在减排模型中将中国的经济减排指数至少设定为 $g = 0.03$,即要求每一单位减排量对社会总效用的影响平均每年至少降低 3%,此时将 g 的取值称为“碳中和阈值”。由于经济减排指数取决于政策强度,而中国当前该指数的具体数值仍不能确定,但可以肯定的是,如果 g 低于阈值,将对中国实现碳中和目标带来挑战。阈值的大小也受其他参数影响,表 1 列出了不同情境下的碳中和阈值。

表 1 参数变化对“碳中和阈值”的影响

情境	经济减排指数
普通情境(图 2):	0.030
1.5℃ 温升目标(减排总量增加 70%):	0.000 [*]
贴现率由 9.5% 变为 4.1%	0.084
减排供给弹性由 0.5 变为 0.6	0.008

注: * 表示 $r = 4.5%$ 。

首先,若中国将温升目标由 2℃ 调整为 1.5℃,则需要从现在起大量降低二氧化碳排放。这会对未来 40 年的经济发展造成严重影响,从而降低经济减排指数 g 的值。在参数校准中发现,若要在 1.5℃ 温升目标下实现碳中和目标,需要使 $r = 4.5%$,这意味着中国未来 40 年的年均消费增长率仅为 1.5%,这一数值低于发达国家水平,显然具有极高的难度和极大的牺牲。因此,模型认为 1.5℃ 温升目标不符合中国发展的实际情况。

其次,当贴现率的取值由 9.5% 下降到 4.1% 时,需要将阈值提高到 $g = 0.084$,这意味着需要更快的技术进步、能源效率提升、产业结构调整等。^① 这是因为贴现率的降低意味着后期社会效益的当前价值更高。此种情境也意味着,如果政府更看重后期的社会效益,不仅需要在前期更多地减排,还需要更高的经济减排指数来抵消贴现率的影响。

最后,增加绿色投资将大幅降低阈值。当减排供给曲线的平均弹性由 0.5 上升到 0.6 时,只需要 $g = 0.008$ 就能够实现碳中和目标,这意味着通过绿色投资降低低碳技术的成本,将极大地减轻为实现碳中和目标而附加在技术进步、能源效率提升、产业结构调整、经济集聚、人力资本提升等方面的压力。

六、产业结构调整路径

上一节探讨了关于碳排放“什么时候减”和“减多少”,而关于“如何减”的问题还需要对构成经济减排指数的诸多因素进行讨论。其中,技术进步、能源效率提升等受诸多客观因素影响,具有极大的不确定性,而产业结构的调整则更容易通过政策引导得以实现,值得进一步探讨。因此,本部分将考察在前文提出的减排轨迹下中国产业结构的调整路径,并通过比较三种不同减排轨迹下的产业结构演变情况,间接论证以社会总效用最大化实现碳中和需要在前期大力发展经济、后期加速减排这一关键结论。

为此,本文引入因素分解法(index decomposition analysis, IDA),该方法是一种常用的驱动因素分析法,可将能源或环境指标的变动分解成数个预定义影响因素对该变动的贡献,并可被用于进行前瞻性分析(Ang 2015)。通常来说,IDA 分析将指标变动分解为规模变化效应、结构变化效应和强度效应。鉴于本文重点关注经济增长、产业结构和碳排放强度对碳排放的影响,本文根据 IDA

^① 此时 ρ 和 η 与 Stern(2006) 提倡的取值相同。

方法将中国碳排放分解为经济增长效应、产业结构调整效应和碳排放强度效应。其中,对数平均迪氏指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)是IDA方法中最常用的具体估计方法之一。该方法易于建模,在消除残差的同时还能满足因素可逆等优势。一般来说,LMDI方法分为加法和乘法形式,由于两种形式的结果可以互相转换,因此本文仅选取加法形式进行分析。

前文已提供了三种模型(无政策模型、本文的减排模型以及其他模型)的减排轨迹,因而可知碳排放的年度变化。为估算不同减排轨迹下的产业结构调整路径,本文需对未来年份的经济增长率和碳排放强度进行情景分析。对于经济增长率,文章参考余碧莹等(2021)对2021—2060年GDP的情景设置;对于碳排放强度,本文参照三种模型的减排速率进行假设。对于无政策情景,张希良等(2022)提出为实现中国在巴黎气候变化大会上的减排承诺,单位GDP碳排放年均下降率应在4%左右。同时,根据《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书,2020年中国碳排放强度比2015年下降18.8%,^①这意味着中国碳排放强度年均下降率大概为3.5%。但考虑到无政策情形并不能实现碳中和目标,因而本文认为在此情境下碳排放强度的年均下降率应低于3.5%,故选取3%作为该情境下碳排放强度的年均下降率。对于本文减排模型和其他模型,在参照张希良等(2022)的同时,考虑两个模型的减排速率分别为先慢后快和先快后慢,并且第二产业减排速率要快于其他部门,因此对碳排放强度的年均下降率设置如表2。对于分解式中的权重项,本文参照解振华等(2020)给出的未来年份不同产业碳排放的占比予以赋值。

表2 中国GDP增长率与碳排放强度下降率情景假设 单位:%

年份	GDP增长率	无政策 (碳强度下降率)		减排模型 (碳强度下降率)		其他模型 (碳强度下降率)	
		第二产业	其他	第二产业	其他	第二产业	其他
2021—2025	5.6	3	3	4.5	4.5	4.5	4.5
2026—2030	5.5	3	3	5.0	5.0	5.0	5.0
2031—2040	4.5	3	3	6.0	6.0	10.0	9.0
2041—2050	3.4	3	3	7.0	7.0	7.0	7.0
2051—2060	2.4	3	3	14.0	13.0	6.0	6.0

基于分解方法,以及对未来40年GDP增长率和碳排放强度的情景假设,可对上表中五个时间段的碳排放变动情况进行分解,估算出第二产业增加值的比重,结果见图3。

结果显示,到2060年,三种模型下的第二产业比重都大致为20%,这与张希良等(2022)关于2050年中国第三产业增加值比重达到71%的观点较为吻合。但是可以发现,三种情境下,产业结构调整的路径虽然看似殊途同归,但是对于未来产业发展规划的涵义却大不相同,带来的成本收益也大不相同。对于无政策情境和其他模型给出的减排轨迹,第二产业比重均在早年就已下降到30%以下。尤其在无政策情境之下,不仅第二产业比重过早地被压缩,同时也并未完成减排目标;而其他模型虽然能够完成减排目标,但因其早在早年就进行大刀阔斧的调整,减排成本将远高于本文减排模型所提倡的减排轨迹。这是因为一直以来,中国过度依赖高耗能高排放的产业发展模式,这在拉动中国经济快速增长的同时,也导致了碳排放的迅速增长。若在短期内通过一系列措施严控高耗能行业碳排放,企业则会面临缩减规模、采用更先进技术或购买排放许可等选择。其中,缩减规模会直接带来失业问题,影响宏观经济的发展,不利于社会稳定,带来巨大的社会成本;而提升技术水平或购买绿证等措施则会直接拉升企业经营成本,降低企业经营绩效和竞争力,两者均是减排

^① 数据来源: <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1715491/1715491.htm>。

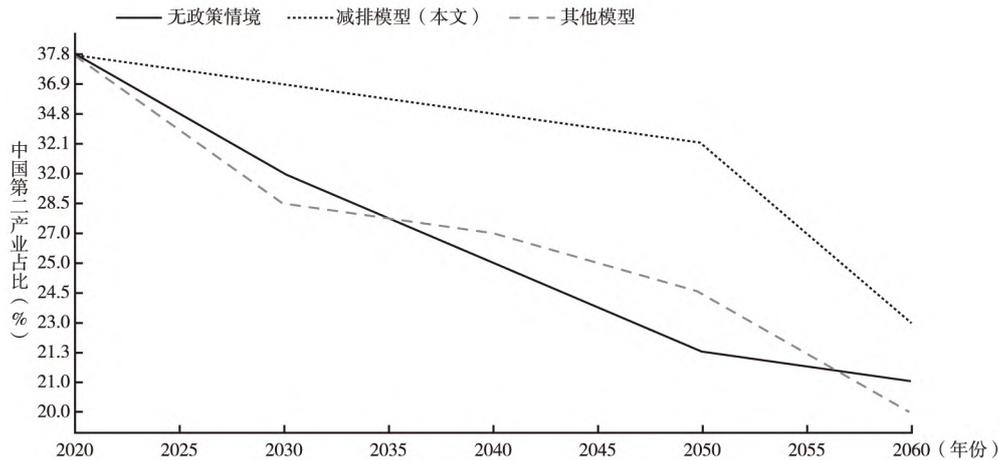


图3 不同减排路径下第二产业占比演变比较

成本的重要组成部分。可见,短期内激进地进行产业结构调整会大幅提升整体减排成本。根据配第一-克拉克定理,产业结构会随着经济的进一步发展而逐渐优化。若在中长期再进行大幅度地减排,则不会使短期面临过高的减排成本。因此,依循本文所提倡的减排轨迹,未来40年中国的产业结构调整同样应遵循先慢后快的步伐,同时也意味着实现了减排净收益的代际均等。

七、讨论及政策建议

本文构建了碳中和背景下,以社会总效用最大化为目标的减排模型,并通过参数校准模拟出未来40年中国的减排轨迹。模型显示,确保减排成本代际均等是使社会总效用最大化的前提条件。研究发现,若遵循模型所建议的减排轨迹,实现碳中和目标的总成本(贴现后2020年价值,下同)在8万亿—16万亿人民币之间,约等于中国2020年GDP的8%—16%。若将其平摊于未来40年,该减排轨迹下实现碳中和目标对中国GDP的影响仅为0.2%—0.4%,大约是其其他模型预测结果的一半,且产业结构调整也更加合理可行,后期高强度减排的经济成本远低于前期。

文章强调减排成本代际均等是保证社会总效用最大化并实现碳中和目标的必要条件。在经济发展过程中,后期将比前期更富裕,而前期的减排投资实际上是减少当前的消费,将前期的社会财富转移到后期。若现阶段实行激进的减排政策,可能导致能源价格上涨,影响中国经济高质量发展。能源价格的上涨在提升企业用能成本和降低企业竞争力的同时,也会造成家庭用能支出增加,而且企业用能成本的上涨也会传递给消费者,加重亿万居民家庭的支出负担。因此,如何平衡不同时期减排的成本收益差异,是碳中和目标不可忽视的重要问题。

研究结论对中国碳中和目标的实现提出以下启示和建议。第一,碳中和目标的实现需要从成本收益和代际公平的角度进行分析,应当有先后、有轻重、有缓急地科学减排。研究结论显示,无论在何种情境下,将主要减排任务放在后期是最优选择。具体来说,到2035年中国步入中等发达国家行列,人均GDP实施翻一番,届时减排成本占人均收入的比重将大幅下降,居民生活受减排的影响相对较小;同时技术进步和新禀赋的出现,会带来减排成本的降低和减排选择的多元化。考虑到能源基础设施建设周期长、投资大,如何科学地设计减排轨迹也关乎到能源结构的科学转型,远近统筹至关重要。为高质量地实现碳中和目标,应当保证减排成本的代际公平,在2020—2030年间少量减排,在2050—2060年间加速减排。

第二,碳中和目标的实现离不开完善的碳排放交易体系,建议明确将碳价格作为各期边际减排成本的指导依据。中国于2011年起实施碳市场试点,并于2021年7月开展全国碳市场,但当前碳

价格普遍低于欧盟、加州等国际碳市场,同时市场流动性较差,企业并没有足够的减排激励。从中长期来看,中国碳价将持续上升,对后期减排的激励也会更大。因此,应结合实际情况为社会提供合理的碳交易价格预期,探索达到最佳减排效果的合理碳价格,并通过对碳价格的动态调整,促使企业更积极地进行低碳转型,从微观层面助力国家应对气候变化和国家自主贡献目标的成功实现。

第三,稳定、可持续的减排政策以及绿色金融的蓬勃发展,有助于降低实现碳中和的总成本。减排政策前期力度大虽然能够在短期取得明显的减排成效,但也会给宏观经济带来巨大冲击。尤其对于中国而言,中小企业是最具活力的一群经济主体,也是吸收中低收入人群就业的主要领域。如果在短期实施更加有力的减排政策,中小企业可能难以承受这一政策成本。长期来讲,绿色投资能降低减排成本,减少碳排放,对环境和社会造成正面影响,而这部分影响并未被纳入投资者的预期收益内。因此,政府需要适当干预,以激励金融机构将绿色投资的潜在社会效用纳入其投资和风险管理的考量范围之内。

第四,碳中和目标将在一定程度上对中国经济增长带来新约束,需要从多维度探讨其对高质量发展的影响。作为最大的发展中国家,中国仍面临着发展经济、改善民生等一系列艰巨任务,因而碳中和不仅仅是吸收和减排的问题,也是效率和公平问题。减排的选择不应仅看减排目标能否实现,还应重点关注碳中和目标实现过程中带来的多维影响,系统看待减排问题,探索科学的减排轨迹降低经济损失。尽管本文尝试了从纵向维度上对中国减排总量的最优配置进行分析,但不可否认的是,由于中国各省资源禀赋和发展差异较大,在考虑减排时段安排的同时也需要重点考虑各省的发展权问题。因而,碳减排过程中不同区域与不同人群的减排成本均等化也将是接下来需要重点研究的问题。

参考文献

- 安超、雷明 2019 《二氧化碳排放、人力资本和内生经济增长研究》,《中国管理科学》第5期。
- 陈诗一 2011 《边际减排成本与中国环境税改革》,《中国社会科学》第3期。
- 段宏波、汪寿阳 2019 《中国的挑战:全球温控目标从2℃到1.5℃的战略调整》,《管理世界》第10期。
- 段宏波、朱磊、范英 2014 《能源-环境-经济气候变化综合评估模型研究综述》,《系统工程学报》第6期。
- 冯相昭、邹骥 2008 《中国CO₂排放趋势的经济分析》,《中国人口·资源与环境》第3期。
- 林伯强 2022 《碳中和进程中的中国经济高质量增长》,《经济研究》第1期。
- 林伯强、姚昕、刘希颖 2010 《节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整》,《中国社会科学》第01期。
- 米志付 2015 《气候变化综合评估建模方法及其应用研究》,北京理工大学。
- 莫建雷、段宏波、范英、汪寿阳 2018 《〈巴黎协定〉中我国能源和气候政策目标:综合评估与政策选择》,《经济研究》第09期。
- 邵帅、张可、豆建民 2019 《经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验》,《管理世界》第01期。
- 石莹、朱永彬、王铮 2015 《成本最优与减排约束下中国能源结构演化路径》,《管理科学学报》第10期。
- 世界资源研究所 2020 《零碳之路“十四五”开启中国绿色发展新篇章》, <https://wri.org.cn/sites/default/files/2021-11/accelerating-the-net-zero-transition-strategic-action-for-china%E2%80%99s-14th-five-year-plan-CN.pdf>。
- 王铮、吴丽华、杨超 2010 《中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究》,《经济研究》第02期。
- 王铮、顾高翔、吴静、刘昌新 2015 《CIECIA:一个新的气候变化集成评估模型及其对全球合作减排方案的评估》,《中国科学:地球科学》第10期。
- 魏一鸣、米志付、张皓 2013 《气候变化综合评估模型研究新进展》,《系统工程理论与实践》第8期。
- 解振华、何建坤、李政、张希良 2020 《〈中国长期低碳发展战略与转型路径研究〉综合报告》,《中国人口·资源与环境》第11期。
- 杨莉莎、朱俊鹏、贾智杰 2019 《中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角》,《经济研究》第11期。
- 余碧莹、赵光普、安润颖、陈景明、谭锦潇、李晓易 2021 《碳中和目标下中国碳排放路径研究》,《北京理工大学学报(社会科学版)》第02期。
- 张伟、朱启贵、高辉 2016 《产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展》,《经济研究》第12期。
- 张希良、黄晓丹、张达、耿涌、田立新、范英、陈文颖 2022 《碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究》,《管理世界》第

01 期。

- 张莹 2017 《气候变化问题经济分析方法的研究进展和发展方向》,《城市与环境研究》第 2 期。
- Ang, J. B., 2009, “CO₂ Emissions, Research and Technology Transfer in China”, *Ecological Economics*, 68(10), 2658—2665.
- Ang, B. W., 2015, “LMDI Decomposition Approach: A Guide for Implementation”, *Energy Policy*, 86, 233—238.
- Arrow, K., 1999, Discounting, Morality, and Gaming Chapter 2, Resources for the Future.
- Borenstein, S., 2012, “The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation”, *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 67—92.
- Burke, M., S. M. Hsiang, and E. Miguel, 2015, “Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production”, *Nature*, 527(7577), 235—239.
- Carleton, T. A., and S. M. Hsiang, 2016, “Social and Economic Impacts of Climate”, *Science*, 353(6304), aad9837.
- Ciscar, J. C., J. Rising, R. E. Kopp, and L. Feyen, 2019, “Assessing Future Climate Change Impacts in the Eu and the USA: Insights and Lessons from Two Continental-Scale Projects”, *Environmental Research Letters*, 14(8), 084010.
- Dasgupta, P., 2007, “Commentary: The Stern Review’s Economics of Climate Change”, *National Institute Economic Review*, 199, 4—7.
- Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, and G. Wagner, 2021, “Economic Impacts of Tipping Points in the Climate System”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(34), e2103081118.
- Duan, H., S. Zhou, K. Jiang, C. Bertram, M. Harmsen, E. Kriegler, D. P. V. Vuuren, S. Wang, S. Fujimori, M. Tavoni, X. Ming, K. Keramidas, G. Iyer, and J. Edmonds, 2021, “Assessing China’s Efforts to Pursue the 1.5°C Warming Limit”, *Science*, 372(6540), 378—385.
- Gollier, C., and J. K. Hammitt, 2014, “The Long-Run Discount Rate Controversy”, *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 273—295.
- Gugler, K., A. Haxhimusa, and M. Liebensteiner, 2020, “Effectiveness of Climate Policies: Carbon Pricing vs. Subsidizing Renewables”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 106, 102405.
- Hotelling, H., 1931, “The Economics of Exhaustible Resources”, *Journal of Political Economy*, 39(2), 137—175.
- Luderer, G., C. Bertram, K. Calvin, E. De Cian, and E. Kriegler, 2016, “Implications of Weak Near-Term Climate Policies on Long-Term Mitigation Pathways”, *Climatic Change*, 136(1), 127—140.
- Mi, Z., Y. Wei, B. Wang, J. Meng, Z. Liu, Y. Shan, J. Liu, and D. Guan, 2017, “Socioeconomic Impact Assessment of China’s CO₂ Emissions Peak Prior to 2030”, *Journal of Cleaner Production*, 142, 2227—2236.
- Nordhaus, W. D., 1992, “An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases”, *Science*, 258(5086), 1315—1319.
- Nordhaus, W. D., 1993, “Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the ‘Dice’ Model”, *American Economic Review*, 83(2), 313—317.
- Nordhaus, W. D., 2007, “Critical Assumptions in the Stern Review on Climate Change”, *Science*, 317(5835), 201—202.
- Nordhaus, W. D., 2019, “Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics”, *American Economic Review*, 109(6), 1991—2014.
- Pigou, A., 1920, *The Economics of Welfare*, Macmillan and Co. Ltd.
- Pindyck, R. S., 2013, “Climate Change Policy: What Do The Models Tell Us?”, *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860—72.
- Ramsey, F. P., 1928, “A Mathematical Theory of Saving”, *Economic Journal*, 38(152), 543—559.
- Rosenbloom, D., J. Markard, F. W. Geels, and L. Fuenfschilling, 2020, “Opinion: Why Carbon Pricing is Not Sufficient to Mitigate Climate Change—And How ‘Sustainability Transition Policy’ Can Help”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(16), 8664—8668.
- Stern, N., 2006, *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge University Press.
- Stern, N., and J. Stiglitz, 2022, “The Economics of Immense Risk, Urgent Action and Radical Change: Towards New Approaches to the Economics of Climate Change”, *Journal of Economic Methodology*, 29(3), 1—36.
- Tol, R. S. J., and G. Yohe, 2006, “A Review of the Stern Review”, *World Economy*, 7, 233—250.
- Tol, R. S. J., 2009, “The Economic Effects of Climate Change”, *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 29—51.
- Weitzman, M. L., 2007, “A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change”, *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686—702.
- Weitzman, M. L., 2009, “On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change”, *Review of Economics and Statistics*, 91(1), 1—19.

Inter-temporal Parity of Carbon Emission Reduction Costs: Theory and Evidence

ZHENG Xinye^a, WU Shimei^b and GUO Bowei^a

(a: School of Applied Economics, Renmin University of China;

b: School of Economics and Trade, Hunan University)

Summary: The Report to the 20th National Congress of the Communist Party of China proposed to “work actively and prudently toward the goals of reaching peak carbon emissions and carbon neutrality”. It also emphasized that “based on China’s energy and resource endowment, we will advance initiatives to reach peak carbon emissions in a well-planned and phased way in line with the principle of building the new before discarding the old”. The proposal not only reflects the long-term and systematic nature of carbon peak and carbon neutrality goals, but also emphasizes the importance of reasonable arrangements in the process of achieving it. Being the world’s largest developing country, China has been prominently suffering from insufficient and unbalanced development. Therefore, the realization of carbon neutrality faces trade-offs among carbon reduction, economic development, and a just transition.

On the one hand, the carbon neutrality goal has become a new constraint on the balance between emission reduction and economic growth, which needs to be solved urgently. Exploring an optimal emission reduction pathway for China and linking its emission reduction tasks with long-term development goals are important in guaranteeing the realization of China’s carbon peak and carbon neutrality goals and the second centennial goal. The latter aims to build a modern socialist country that is prosperous, strong and culturally advanced and harmonious by 2049. On the other hand, the path of emission reduction is related to the welfare distribution among different generations and the rights of future generations, meaning that the implementation of climate policy needs to fully consider inter-temporal parity when carrying out staged decomposition and rational allocation of emission reduction tasks.

This paper focuses on answering the question of when and how to reduce emissions, and by how much. This paper has the following contributions. First, it realizes the theoretical innovation by introducing inter-temporal parity into the carbon abatement model. Few studies tried to explore and solve the problem of medium- and long-term differences in emission reduction efforts, and overseas literature has limited exploration of China’s issues. We fill this gap by constructing a new model based on the exhaustible resource exploitation model and Hotelling’s rule to explore and model the emission reduction trajectory under China’s carbon peak and carbon neutrality goals. Second, this paper provides a new way of thinking about the formulation of the optimal pathway for the realization of China’s carbon peak and carbon neutrality goals. Under the premise of maximizing the total social utility, we propose a carbon pricing goal and an industrial restructuring pathway for the 40 years to come based on the theory of inter-temporal Parity.

Inspired by the Hotelling’s rule, we regard carbon emissions as negative exhaustible resources and construct an inter-temporal carbon abatement model. We treat social utility maximization as the target and the total carbon emissions as a constraint. We find that inter-temporal parity for emission reduction is the necessary condition for social utility maximization. Therefore, the present values of marginal utility, shadow price, and carbon price throughout different periods should be constant. Our model also supports four important propositions as follows. Compared with the target of 2°C climate temperature increase, the 1.5°C temperature increase will substantially lower social utility. Underestimating the discount rate will lead to excessive emission reduction in early periods and sacrifice social utility. The dividend of economic growth allows more emission reduction tasks to be left for later periods. And reducing the cost of carbon emission reduction through green investment will end up raising social utility.

Using China as a case study, our model suggests that the optimal pathway to realize carbon neutrality is to adopt mild decarbonization policies in early periods and aggressive decarbonization policies in later periods, which will only end up sacrificing 0.2%—0.4% of China’s annual GDP. Furthermore, we adopt the index decomposition analysis method to estimate the pathway for industrial restructuring under different emission reduction trajectories. Our model suggests that the optimal pathway for industrial restructuring should be mild restructuring in the early periods and aggressive restructuring in later periods.

Our paper has important policy implications. Firstly, the carbon peak and carbon neutrality goals need to be realized from the perspective of inter-temporal parity, and rational emission reduction should be prioritized, sequenced, and properly paced. Secondly, the realization of carbon neutrality is inseparable from a well-functioning carbon emission trading system, and thus it is recommended to use carbon pricing as the guiding basis for the marginal emission reduction cost. Thirdly, stable and sustainable emission reduction policies and the flourishing of green finance can help reduce the social cost of achieving carbon neutrality. Finally, the carbon peak and carbon neutrality goals will bring new constraints to China’s economic development. Therefore, it is necessary to explore its impact from multiple dimensions.

Keywords: Carbon Neutrality; Economic Model; Inter-temporal Parity; Industrial Restructuring

JEL Classification: Q58, D64, H43

(责任编辑: 恒 学) (校对: 王红梅)