

# 绿色优先战略下的增长路径探索与治理实践<sup>\*</sup>

中国经济增长前沿课题组

内容提要:按“碳达峰”和“碳中和”的3060计划目标,中国绿色转型就是在强调绿色优先、增长为根本的前提下探索出中国绿色优先战略下的最优增长路径。作为世界上最大的发展中国家,中国绿色转型除了绿色底色外更嵌含增长目标,如何在绿色发展战略下实现经济持续增长、降低绿色转型摩擦成本,对中国实现高质量发展和现代化具有重要影响。本文首先在DICE模型框架下使用中国最新数据对“双碳”约束下经济增长路径进行了模拟,结果显示2030年碳达峰前可以同时实现经济增长与清洁发展目标,而2030年后无法同步实现经济增长与清洁发展目标,说明绿色转型后半场付出的成本和代价较高,导致绿色发展阻滞和总量福利下降。然后,本文基于中国转型实践的经验事实,从结构化视角下使用两部门绿色增长框架进行了模拟,研究发现通过绿色产业发展进行“正资本”投资与碳减排的“负资本”投资进行对冲,形成一个正资本推动增长的新路径并逐步替代碳排放产业转型的叠加增长路径,才能平稳顺利实现绿色转型目标。文章最后对中国绿色发展和转型的治理实践进行了概括和总结,目前而言中国特色的数量激励政策是绿色转型发展的动力,但长期看价格激励仍然有效,探索建立市场化的碳排放定价机制任重道远。

关键词:绿色发展战略 总量模型 结构模型 治理实践

## 一、引言

随着各国对气候变化的临界点效应和潜在气候灾害的认识加深,以碳排放治理为中心的绿色发展逐渐成为人们的共识,新的发展强调绿色为优先,可持续发展为根本,突出了从更广义和更深刻角度理解人类发展的福祉,突破了单一增长视角强调人类福祉的短期性、功利性和不可持续性。中国作为世界上最大的发展中国家和对国际社会负责任的国家,习近平总书记在第七十五届联合国大会上庄严宣布,中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和目标。2021年是中国全面开启绿色转型的元年,按“碳达峰”和“碳中和”的3060计划目标,中国绿色转型需要一个四十年的转型。绿色转型开启之年遭遇了“拉闸限电”的能源市场摩擦问题,2022年由乌克兰危机所致全球能源冲击再次给中国的绿色发展转型提醒:一方面我们要积极加大、加速可再生能源和电气化的发展,以增量加快替换存量,探索中国绿色发展战略下的增长路径;另一方面中国亟需加快电力市场改革,推动中国绿色转型的新治理实践,避免一刀切式的能源和碳排放管理方式,按“先立后破”的方式有序推进转型,降低转型摩擦。从图1和图2可以看出,近年来中国可再生能源发电量占全社会发电量份额稳步提高,但可再生能源发电装机容量份额增长更快(图1),中国可再生能源新增装机容量占比在2021年达到创纪录的74.3%(图2),意味着中国新增能源项目主要由可再生能源构成,可再生能源在能源消费中占比会越来越高。此外,可再生能源产业化的代表新能源汽车市场渗透率不断提高,已经成为引领全球汽车产业转型升级的重要力量。因此,从

<sup>\*</sup> 中国经济增长前沿课题组负责人张平、刘霞辉、张自然。本文执笔人张鹏、张平、张自然、薛村,电子邮箱:jjz-zhangpeng@cass.org.cn。参加讨论的人员有黄群慧、刘霞辉、赵志君、仲继银、常欣、王宏森、吴延兵、汤铎铎、张磊、李江涛、付敏杰、郭路、张小溪、陆明涛、楠玉、陆江源、张晓奇、施美程、胡雷、郑燕巧、张红霞、何竞、马原。作者感谢匿名审稿人建议。文责自负。

数据可以看出中国可再生能源和新能源汽车两大绿色龙头产业进入到全面对原有产业替代阶段,补贴激励逐渐结束,开始进入资本驱动增长阶段。中国需要从增长实践和转型摩擦中获得经验,走出一条中国特色的绿色转型和经济持续增长之路,推进中国治理现代化和经济高质量发展。

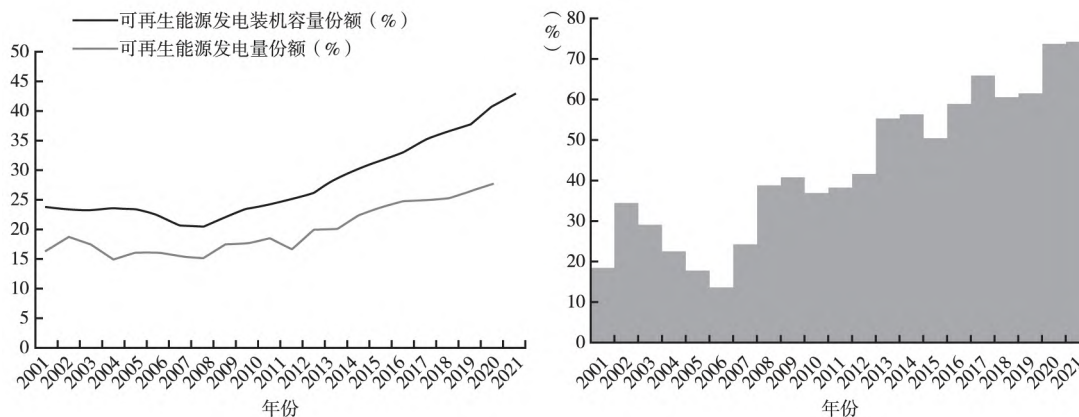


图1 中国可再生能源发电装机容量和发电量份额 图2 中国可再生能源新增装机容量占总装机容量份额

资料来源:国际可再生能源署 <https://www.irena.org/Statistics>。

从历史角度看,绿色发展发轫于1972年罗马俱乐部在《增长的极限》所做的系统研究,阐述了自然资源线性增长和有限供给与经济非线性增长矛盾性,化石能源耗竭性需要系统思考增长的前景。但随着实践经验和理论认识的不断加深,人们逐渐意识到真正影响增长和人类福祉的既有资源耗竭性,也有开发使用过程的负外部性,即日益增长和累积的二氧化碳为代表的温室气体将引致极端气候发生概率大大增长,从而对经济增长造成损害。2018年诺贝尔经济学奖获得者诺德豪斯开创性将温室气体排放纳入新古典增长理论框架,逐步厘清了碳排放负外部性所带来的损害函数与经济增长总量的相关性,从总量视角完成了碳排放与经济增长关系的研究,其开发的各版本DICE模型框架业已成为学界和IPCC研究的重要参考。后期研究围绕损害设定、气候变化的实证证据展开,丰富了气候变化对经济增长的经验认识(Golosov et al. 2014; Dietz & Stern 2015; Cai & Lontzek 2019)。国内研究方面,代表性的成果主要还是围绕如巴黎协定等外生政策干预目标,研究为实现既定气候变化目标而导致的经济各变量变动路径,讨论不同情景下路径差异和政策干扰的潜在损失和收益(清华大学 2020; Duan et al. 2021; 潘家华 2021; 林伯强 2022)。上述研究主要基于总量增长视角讨论绿色发展,对不同发展阶段下绿色转型中的经济结构转变和治理分析较少,一方面,无论是治理投入和还是气候损害函数本质上都是经济增长减量化操作,通过嵌入对气候变化“负资本”的投资来获取长期加权总福利(效用)上升,但对加总生产函数都是消抵项,对通过“绿色”资本增加获得增长动力有所忽略;另一方面,发达经济体非常强调“把碳价格搞对”(布兰查德和梯若尔 2021),认为碳排放价格虽然不受欢迎,但却是总体方案的关键环节。但从全球实践看,碳排放价格依然较低且激励作用明显不足。中国在治理实践中是通过“产业激励”而不是“做对价格”,“先立后破”的绿色转型战略在2022年全球能源波动中起到了积极稳定的效果,可再生能源、新能源汽车等高速发展也成为经济增长新动力(张平 2022; 张自然等 2022)。

中国作为世界最大的发展中国家,无论是实现2060碳中和目标,还是实现本世纪中叶的经济前景目标,都需要基于不断增长的基础上进行探讨,气候变化治理的减量化操作需要从结构视角找到推动增长的潜在落脚点,才能完成绿色转型和增长提高双重任务。首先,DICE为代表的总量模型揭示了碳达峰和碳中和总量转型目标和路径,但其背后有着不同增长路径和转型治理模式。中国目前的发展阶段核心任务仍是通过资本投资扩大绿色产业增长,积极对传统高碳产业进行吸收

的结构转变和转型,仅仅通过碳价格手段无法达到增长与转型相统一目标,对中国而言增长总量问题要与结构和治理关联起来进行分析;其次,从发展阶段看,发达经济体的高碳排放产业大多已经转移到国外,全面转向碳中和阶段。而新兴经济体仍处于工业化阶段,碳达峰和碳中和并发性发展,绿色转型与产业升级需要高度关联,总量分析难以解决新兴经济体的问题。各国发展阶段的不同,理论、路径、治理和政策都需要作出差异化的安排,而加入结构因素可以规避总量下降矛盾,有助于中国这样的后发国家在绿色转型中发展和绿色兼得。

基于此,本文在吸收前人研究基础上,基于最新数据对中国绿色转型的总量路径进行了研究,并在结构化视角下讨论了化石能源向清洁能源转型、高碳产业向低碳或零碳产业转型所带来的第二增长曲线的开启前景,回答了中国这样的后发国家如何在绿色发展战略下实现经济持续增长,降低绿色转型摩擦成本。本文结构安排如下:第一部分为引言;第二部分为文献综述,系统回顾了绿色增长方面国内外经典文献,为后续研究奠定坚实基础;第三部分为中国绿色转型总量路径分析,基于 Nordhaus 最新版本 DICE 模型框架,使用最新中国数据模拟了在双碳 3060 指引下中国经济增长和碳排放的路径,得出了总量框架下无法实现绿色优先和增长根本的双重任务;第四部分为结构视角下绿色增长理论分析,在加入能源转型及产业转型的两部门模型中分析了绿色增长前景,能源绿色转型和产业低碳转型弥补了绿色转型阻滞成本,实现了绿色优先和增长根本的双重目标;第五部分以中国的治理实践诠释中国绿色转型机制,并提出相应政策建议。

## 二、文献综述

经济增长离不开能源投入。从人类发展历程看,能源演变形态与经济发展阶段特征息息相关,工业革命前由于经济发展缓慢,经济增长对能源的摄入要求较低,通过自然可再生资源系统便可满足经济社会所需。工业革命后大规模不可再生化石能源使用不仅使人类社会主导能源形态发生重大变化,也客观上主导了经济增长大幅跃迁和社会福利巨幅增进。但由于化石能源可耗竭特征,工业革命后近两百年的能源高强度投入便可能转化为能源约束,罗马俱乐部早在 1970 年代就提出“增长的极限”预测(Meadows et al., 1972),并于 1992 年又出版《超越极限》,对全球潜在的资源危机发出警告。但从现实层面看,Nordhaus(1992)和 Popp(2002)编制的能源实际价格指数都反映了实际能源价格并没有随着不断临近可耗竭储量而出现上升,而是反映在长期趋势不断下降(Smith, 1979; Berck & Roberts, 1996)。这虽然有开采技术进步等因素,但不可否认“增长的极限”所预测的悲观情形并没有出现。从理论层面看,Nordhaus(1974)指出资源储量与最终可采量完全不同,测算最终可采量后发现其并不是制约经济增长的关键变量。Hartwick(1977)认为虽然开采不可再生能源会导致储量减少,但也会转化可重复使用的资本品,换言之后世可以依靠前世生产的资本品来突破能源约束实现经济持续增长。从技术进步视角看,Rausser(1974)指出通过干中学可以提高开采技术从而延长不可再生资源开采量,企业通过技术进步来提高使用效率或寻得更加多元化的替代能源,“引致创新”是经济突破能源瓶颈约束的重要来源(Acemoglu et al., 2012; Schwerhof & Stuermer 2015)。

因此,随着研究的深入,人们逐渐认识到不可再生能源有限性瓶颈并不构成经济长期增长的约束,真正对经济可持续增长造成潜在威胁的是使用化石能源的外部性问题,即温室气体排放的潜在风险与治理等。自 20 世纪 70 年代以后,人类活动加剧温室气体排放并可能导致气候变化的研究逐渐增多,但主要集中于自然科学或环境科学领域的分析(Agrawala, 1998)。由于人类活动必然涉及经济个体决策及相互作用机制,因此仅仅从环境、生态系统探讨温室气体排放是玉中有瑕的,只有将人类经济活动纳入系统分析才能根本上破解温室气体来源、危害及随之而来的治理难题。首次将经济学分析方法纳入视野的是 Nordhaus(1991),他使用边际收益分析方法对减少温室气体排

放的政策成本和收益进行研究,探讨了不同政策及组合减排的成本及有效性,其提出的一系列开创性思想与方法为后续研究指明了方向,譬如碳排放社会成本、损害函数、时间折现率等都是后来将气候变化纳入经济增长分析框架的重要参考。Nordhaus(1992)在此基础上构建 DICE(dynamic integrated climate-economy, DICE)模型,该模型通过把经济学、碳循环和气候变化糅合于新古典增长分析框架,能够分析评估各种情景下减缓温室效应危害所采取的各种政策措施的社会成本与收益。Nordhaus & Yang(1996)在 DICE 模型基础上开发了可以用来评估区域气候变化的动态经济学模型(regional integrated climate-economy, RICE),进一步将世界分成美国、欧洲、俄罗斯、中国等十个国家与地区,使得模型不仅可以分析国家层面气候干预政策,还可以分析诸如京都议定书等国际间气候战略合作。多年来, Nordhaus et al.(2007, 2013, 2018)对两个模型不断更新,以更加适应经济发展与气候变化路径,更适合作为气候变化治理的综合评估模型。总体而言, DICE 和 RICE 建模思路基本相同,其主要差异体现在能源和生产的处理方面(例如 RICE 将能源投入作为中间品处理进入生产函数,而 DICE 生产中没有将能源作为中间品),然而却能够在经济学最优化效用假设下,从个人资源配置角度讨论,今日消费和自然资本投资两者取舍之间对未来效用进而总效用的决策抉择,研究各类气候变化干预政策如何影响长期增长、生物多样性和人类健康的损害。应当说由于 Nordhaus 分析采取的是自下而上(Bottom-up)分析方法,从经济主体最优化角度出发,使得模型能够弥合之前纯粹自然科学的缺失,兼顾了经济主体面对气候变化的自适应特征和政策干预对于纠偏气候变化风险的重要作用。值得一提的是, DICE 后续的版本中还包含了一种可以取代所有化石燃料的支撑技术(backstop technology),其价格将随着时间的推移缓慢下降,这对研究能源转型提供了重要参考。

Nordhaus 等发展的 DICE 模型仅仅是基于新古典增长理论并嵌入气候变化模块的一般均衡模型,其在应对气候变化不确定性建模方面具有较大的局限(Pindyck, 2013)。为此,很多学者从多个角度对此进行完善,以更好地捕捉气候变化不确定性因素对经济增长和社会福利的“厚尾”影响。Croston & Traeger(2014)和 Jensen & Traeger(2014)主要考虑了经济增长和损害函数的不确定性,而对于气温变化的随机性没有涉及。Ackerman et al.(2013)引入气候敏感性参数的不确定性,表明风险厌恶系数对经济增长和社会福利的影响小于跨期替代弹性系数。Dietz & Stern(2015)突出技术进步内生性、损害函数凸性以及气候变化的复杂性,结果显示,在考虑上述不确定性下模拟得出气候变化对经济增长的负反馈影响比标准 DICE 模型要大。Ploeg & Zeeuw(2018)将灾害冲击引入新古典增长框架得出气候灾害不确定性对经济临界点(tipping point)预测具有重要的作用。Cai & Lontzek(2019)将气候变化过程作为随机过程纳入模型,最大限度地估算气候变化不确定性对经济增长的异质性影响,发现不确定性越大对经济增长的潜在影响就越大。Bremer & Ploeg(2021)使用扰动法发现气候敏感性和损害函数的分布、偏度和动态等因素都会对气候变化不确定性产生干扰,从而对经济增长和社会福利产生异质性影响。

正如上文 DICE 模型和各类此模型变体的分析那样,气候变化自身不确定性和衍生的不确定性对经济增长和社会福利的影响也是多维度的。从根本上讲只有消除导致气候变迁的因素,即人类经济社会活动产生的碳排放才是降低气候变化风险的决定因素。因此,只有大力推进能源转型,将能源从传统产生高碳排放的化石能源转化为绿色、清洁能源,才能兼顾降低气候变化风险和促进经济增长相统一。Tahvonen & Salo(2001)指出考虑技术进步效应将会使化石能源消费占比持续降低、可再生能源占比持续上升,总产出也会不断增长。Lopez et al.(2007)和 Breschger & Smulders(2012)认为不可再生能源的稀缺性反而会促进技术进步,迭代产生高效率的现代部门,从而实现能源约束与经济增长相统一。Greiner et al.(2014)基于新古典增长框架分析了能源转型对经济增长异质性影响,研究表明适当的政府政策干预是实现能源转型和经济增长的重要条件。但

Acemoglu et al. (2016) 也指出向清洁模式发展并不平坦, 尽管碳税和补贴可以促进绿色技术进步, 但转型程度较为缓慢并会付出较高的福利成本。Doytch & Narayan (2021) 研究发现可再生能源的增长促进了现代高技术部门的崛起, 可再生能源对不可再生能源的替代性主要发生在高收入国家, 而互补性主要发生在中等收入国家, 因此能源转型与经济发展阶段密切相关。

国际上另一支文献主要集中于碳排放的社会治理成本 (social costs of carbon emissions, SCC) 方面, 而这其中最重要的变量即为折现率的选择。长期以来, 经济学家对政策制定者应该以何种社会折现率来评估未来存在争议 (Sen, 1982), 折现率的差异是影响碳排放价格的关键变量, 它在科学地估算碳排放价格以及后续的气候变化政策制定上发挥着至关重要的作用。但关于气候变化政策中的合适折现率是什么, 学术界存在两种不同的观点, 即市场派和伦理派。Nordhaus (2008) 采用了每年 1.5% 的效用折现率, Stern (2007) 选择跨期替代弹性为 1 以及非常小的效用折现率 (每年为 0.1% 相当于陨石毁灭地球的风险)。Nordhaus 偏好市场折现率得到较低的 SCC, 而 Stern 在折现率上的道德偏好导致了更高的 SCC。后续的研究为了调和市场派和伦理派方法上的对立, 对私人部门和政府使用两种不同的折现率 (Barrage, 2018; Ploeg & Rezai, 2021)。除了上述观点外, Weitzman (2013) 提出了一种计算长期投资社会折现率的方法, 当项目回报与消费或其他宏观经济变量协变时, 称为“尾部对冲折现”。此外, 除了折现率, 经济和气候系统中的不确定性风险也会推高 SCC (Hambel et al., 2017; Bremer & Ploeg, 2021)。事实上, 损伤函数凸性也可以放大随机冲击对 SCC 的影响 (Bremer & Ploeg, 2021)。

从国内研究看, 清华大学气候变化与可持续发展研究院 (2020) 基于多部门的气候变化评估模型 (IAM) 并设定四种情景对中国至本世纪中叶绿色转型和长期经济增长进行了模拟分析, 指出经济发展与绿色转型兼顾目标下减排路径、能源支撑技术发展趋势及绿色转型约束下经济成本与代价。Duan et al. (2021) 分析了巴黎协定所规定的将地球平均气温上升控制在 1.5℃ 范围 (相对工业化前平均水平) 内中国所需要付出的努力, 无疑在这一政策干扰下将会有利于化石能源消费减少和脱碳绿色化发展, 但绿色转型成本也较高, 到 2050 年其将会占到国内生产总值的 2.8%—5.7% 之间。史丹和李鹏 (2021) 发现在“双碳”目标约束下多数制造业会受到较大冲击, 在大力推动能源效率提高和绿色技术进步基础上, 最重要的还是通过建立区域和不同层次的碳排放交易市场, 不断提高碳税来促进“双碳”目标实现。林伯强 (2022) 从能源结构视角讨论了“双碳”进程对中国经济高质量发展的影响。碳达峰进程受能源电力需求增长影响, 但也取决于绿色能源发展, 而碳中和目标实现需要经济增长与化石能源、电力需求增长相脱钩, 这其中最关键就是实现绿色清洁能源的安全、稳定和长效供应。潘家华 (2021) 指出能源领域实现颠覆性技术突破, 如清洁能源支撑技术发展是中国实现碳中和目标的关键, 但考虑到经济发展和社会运行方式的高碳路径依赖性, 社会系统等软性改革也是实现低碳或无碳化的关键举措, 能为中国绿色转型提供重要助力。张平 (2022) 指出中国为实现绿色转型的平稳化过渡, 不能仅关注总量减排, 必须引入关于结构性的讨论, 降低转型中的结构性摩擦。中国绿色转型涉及新旧能源 (及相关产业链) 替代、产业中的电气化替代以及数字化产业发展, 应当使新的产业升级吸收传统部门衰弱带来的成本。

综上所述, 理论共识之一在于损害函数的存在使得降低碳排放必须牺牲当期经济增长, 共识之二是“搞对碳排放价格”是西方绿色治理的核心。但上述理论分析都忽略了对增长的结构性和转型摩擦所引致负面影响的讨论。以 2022 年乌克兰危机为例, 一个重要议题就是重新回到能源有限性约束, 尽管能源对全球来讲并不缺少, 但对国别和地区而言有着完全不同约束, 地缘政治冲突导致能源价格冲击直接影响经济增长和社会福利, 使得欧美在积极推动再生能源的同时也要重新启动传统能源。激进转型的治理方式导致传统能源过快退出, 引发能源安全问题, 转型摩擦提醒了后发国家需要自我选择转型道路。碳交易价格高企和过强的碳排放管制导致对传统能源的投资不足

或零投资,靠“先破后立”的方式是不适用的,而且这种转型是脆弱的。相对而言,中国的“先立后破”做对产业激励的方法,一方面保证了中国能源安全,另一方面直接推进了可再生能源产业链快速发展,新能源汽车成为带动中国经济增长最快的新兴部门,成就了“中国新能源全球领先”,中国汽车全球出货量跃升世界第二。当前中国不仅要保证能源自我供给安全,还要考虑大量传统高碳排放部门转型带来的关闭和区域不平衡等挑战,中国转型成本需要绿色发展的新增量对老存量的吸收,这样才能保证能源供给安全平稳和尽量压缩转型的摩擦空间。

### 三、绿色总量增长的中国经验

DICE模型是在传统新古典增长模型基础上,通过嵌入地球生态模块而构建的,弥补了传统经济分析忽略经济活动所依赖的自然生态系统的反馈互动机制。模型的具体思路可以概述为:经济系统生产过程需要使用化石能源作为投入,其副产品——碳排放使得生产负外部性特征明显。地球上二氧化碳主要通过大气层、地表和海洋浅层、深海层三大系统循环、吸收与消解,但由于经济活动规模所产生的碳排放远远超过上述三大系统的循环、吸收与消解能力,使得过多的碳排放不断累积并通过辐射强迫(radiative forcing)使得地球温度升高,导致地表变暖、海洋酸化等问题,极端气候现象发生概率大大增高,从而负反馈于经济系统,对人类经济活动造成潜在威胁。

#### (一) DICE模型概述(详见附录)

在考虑地球生态系统约束下,新古典增长框架下DICE中消费者的最优化行为,可以由如下系统进行概括:

$$\max \sum_{t=1}^{T_{max}} \beta^t \frac{[C(t)/L(t)]^{1-\eta} - 1}{1-\eta} L(t) \quad (1)$$

受约束于:

$$K(t+1) = \Omega(t) (1 - \theta(t) \mu(t)^{\theta_1}) A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} - C(t) + (1 - \delta_K) K(t)$$

$$\Omega(t) = [1 - (\psi_0 T_{AT}(t)^{\psi_2} + \psi_1 T_{AT}(t)^{\psi_3})]$$

$$M_{AT}(t) = \frac{\left\{ \frac{\sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha}}{\phi_0} + E_{Land}^0 (1 - g_{EL})^{t-1} \right\}}{3.667}$$

$$+ b_{11} M_{AT}(t-1) + b_{21} M_{UP}(t-1)$$

$$M_{UP}(t) = b_{12} M_{AT}(t-1) + b_{22} M_{UP}(t-1) + b_{32} M_{LO}(t-1)$$

$$M_{LO}(t) = b_{23} M_{UP}(t-1) + b_{33} M_{LO}(t-1)$$

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) - \xi_1 \{ L_{AM} T_{AT}(t-1) + \xi_3 [T_{AT}(t-1) + T_{LO}(t-1)] \}$$

$$+ \xi_1 \{ \chi \{ \log_2 [M_{AT}(t)/M_{AT}(1750)] \} + F_{EX0} + (F_{EX1} - F_{EX0}) \frac{t-1}{T_{max}-1} \}$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]$$

$$K(t) \geq 0, C(t) \geq 0, M_{AT}(t) \geq 0, M_{UP}(t) \geq 0, M_{LO}(t) \geq 0, \mu(t) \in [0, 1]$$

$$K(0) = K_0, M_{AT}(0) = M_{AT0}, M_{UP}(0) = M_{UP0},$$

$$M_{LO}(0) = M_{LO0}, T_{AT}(0) = T_{AT0}, T_{LO}(0) = T_{LO0}$$

其中,  $T_{max}$  外生给定;  $K(t)$ ,  $\Omega(t)$ ,  $M_{AT}(t)$ ,  $M_{UP}(t)$ ,  $M_{LO}(t)$ ,  $T_{AT}(t)$ ,  $T_{LO}(t)$  为状态变量;  $C(t)$  和  $\mu(t)$  为控制变量;  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\sigma(t)$  为外生变量。

#### (二) 模型参数估计与赋值

DICE模型主要涉及  $L(t)$ ,  $A(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\sigma(t)$ ,  $\alpha(t)$  等外生变量的校准以及其他参数的赋值。

人口增速预测满足如下方程:

$$L(t+1) = (1 + g_L(t))L(t) \quad L(T_0) = L_0 \quad g_L(t) = g_L(t-1)(1 - \delta_L) \quad g_L(T_0) = g_L^0$$

其中  $L_0$  表示初期人口数量;  $g_L(t)$  表示人口的增长速度;  $\delta_L$  表示人口增长率的下降速率, 因此, 可以预计人口规模在达到顶峰后将会趋于稳定。2018 年人口总量来自《中国统计年鉴》2030 年人口总量预测来自联合国人口展望( World Population Prospect 2019) 低生育率假设下人口总量数据, 2018—2024 年和 2025—2060 年  $g_L^0$  和  $\delta_L$  分别取值为 0.01、0.162 和 -0.0002、-0.01。

为了预测资本收入份额  $\alpha$ , 参考张平(2020) 对于 2020—2060 年中国 GDP 增速的估算, 根据现金流量表计算 2018 年中国劳动收入份额为 0.521, 进一步参考 OECD 对 G20 国家劳动收入份额的测算, 本文设定 2060 年中国的劳动收入份额将达到 0.60, 与发达国家基本保持一致。在此基础上, 可以校准得出资本份额弹性  $\alpha$ , 假设资本的产出弹性满足如下方程:

$$\alpha(t+1) = (1 - g_\alpha(t))\alpha(t) \quad \alpha(T_0) = \alpha_0 \quad g_\alpha(t) = g_\alpha(t-1)(1 - \delta_\alpha) \quad g_\alpha(T_0) = g_\alpha^0$$

其中  $\alpha_0$  表示初期资本的产出弹性;  $g_\alpha(t)$  表示资本的产出弹性下降速度;  $\delta_\alpha$  表示资本的产出弹性下降速度的变化速率。本文中分别设定  $\alpha_0$  为 0.47908,  $g_\alpha^0$  为 0.003,  $\delta_\alpha$  为 -0.0025, 可以发现随着中国经济结构升级和转型, 中国资本收入份额系数还会进一步降低。

全要素生产率  $A$  演化满足如下方程:

$$A(t+1) = (1 + g_A(t))A(t) \quad A(T_0) = A_0$$

$g_A(t) = g_A(t-1)(1 - \delta_A)$ ,  $g_A(T_0) = g_A^0$ ,  $\delta_A > 0$ , 其中  $A_0$  表示初期的希克斯技术;  $g_A(t)$  表示希克斯技术的增长速度;  $\delta_A$  表示希克斯技术增速的变化速率。根据对 2018 年 GDP、劳动力、资本及劳动力和资本收入份额的数据校准可以得到  $A_0 = 4.25$ ,  $g_A^0 = 0.02$ ,  $\delta_A = 0.005$ , 在这种设定下反映了全要素生产率将会按照 1.4% 增长率演化, 与张平(2020) 对 GDP 预测相一致。

碳排放强度不断降低是实现“碳达峰、碳中和”的重要手段, 根据中国签署的《联合国气候变化框架公约》的相关核心内容, 中国提出 2030 年单位 GDP 碳排放比 2005 年下降 60%—65%。按照上述减排目标以及 2060 年实现碳中和目标, 若在 2030 实现“碳达峰”, 2030 年碳排放强度要实现比 2005 年下降 67%, 此时达峰时的碳排放量为 10.53  $GtCO_2$ 。根据 Wang et al. (2020) 估算, 本文将“碳中和”目标设定为 0.8  $GtCO_2$ 。<sup>①</sup> 若考虑在 2060 年平稳地实现“碳中和”目标, 需要 2060 年碳排放强度比 2030 年进一步下降 77%。并假设碳排放强度  $\sigma(t)$  满足如下演化形式:

$$\sigma(t+1) = (1 - g_\sigma(t))\sigma(t) \quad \sigma(T_0) = \sigma_0 \quad g_\sigma(t) = g_\sigma(t-1)(1 - \delta_\sigma) \quad g_\sigma(T_0) = g_\sigma^0 \quad \delta_\sigma > 0$$

其中  $\sigma_0$  表示初期  $CO_2$  排放强度;  $g_\sigma(t)$  表示  $CO_2$  排放强度的下降速度;  $\delta_\sigma$  表示  $CO_2$  排放强度下降速度的变化速率。2018 年和 2030 年  $CO_2$  排放强度分别为 0.1482 和 0.0962, 2018 年—2030 年和 2030 年—2060 年排放强度的下降速度分别为 0.07 和 0.08, 而其下降速度的变化速率分别为 0.008 和 -0.115。最后, 设定减排系数  $\theta(t)$  变化满足如下方程:

$$g_\theta(t) = g_\theta(t-1)(1 - \delta_\theta) \quad g_\theta(T_0) = g_\theta^0 \quad \delta_\theta > 0$$

其中  $g_\theta(t)$  为减排系数的增长速度;  $\delta_\theta$  表示减排系数增长速度的变化速率。参考《全球碳捕集与封存现状报告 2019》中的估算, 2018 年减排的成本约为 1000 元 ( $\theta_0$ ), 在考虑 2060 年碳中和刚性约束下, 化石能源消费必然占据较低比例, 从而实现最大程度减排和临近或实现碳中和目标, 因此可以假设 2060 年减排系数比 2018 年下降 90%, 这样可以得出  $\delta_\theta$  为 -0.01。

对于模型其他参数的赋值主要参考 Nordhaus(2018) 的估计。2018 年总产出和资本存量均根据 2005 年价格计算所得<sup>②</sup>, 单位为十万亿元。具体见表 1。

① Wang et al. (2020) 估算 2010—2016 年中国陆地生物圈碳汇平均值为  $1.11 \pm 0.38 GtCO_2$ 。本文将该估算值作为中国未来碳汇潜力的参考标准, 并设定三种较为保守的碳中和情景。

② 2018 年中国的资本存量估算值是根据 PWT 数据库公布资本产出比计算所得。

表 1 参数估计与赋值

参数名称	参数含义	参数赋值	参数名称	参数含义	参数赋值
偏好			气候模型参数		
$\rho$	时间贴现因子	0.03	$\chi$	$CO_2$ 的辐射强迫系数	3.6813
$\eta$	不平等厌恶系数	2	$F_{EX0}$	其他温室气体的辐射强迫	0.5
碳排放参数			$F_{EX1}$	其他温室气体的辐射强迫	1.0
$E_{Ind}^0$	2018 年中国工业 $CO_2$ 排放量	9.71 Gt $CO_2$	$\xi_1$	气候方程系数	0.1005
$E_{Land}^0$	土地使用产生的 $CO_2$ 排放量	1.2 Gt $CO_2$	$L_{AM}$	气候方程系数	1.1875
$g_{E_L}$	土地使用 $CO_2$ 排放量的下降速率	0.1150	$\xi_3$	气候方程系数	0.088
$\mu_0$	2018 年中国 $CO_2$ 排放控制率	0	$\xi_4$	气候方程系数	0.025
碳循环参数			$T_{AT0}$	地表平均温度变化	0.85 $^{\circ}C$
$M_{AT0}$	大气中的碳存量	851 GtC	$T_{LO0}$	深海平均温度变化	0.0068 $^{\circ}C$
$M_{UP0}$	生物圈和浅海中的碳存量	460 GtC	气候损害参数		
$M_{LO0}$	深海中的碳存量	1740 GtC	$\psi_1$	损害函数的系数项	0.0024
$b_{11}$	碳循环方程中的转移系数	0.88	$\psi_3$	损害函数的指数项	2.0
$b_{12}$	碳循环方程中的转移系数	0.12	碳处理参数		
$b_{21}$	碳循环方程中的转移系数	0.196	$\theta_1$	治理函数中变量的指数项	2.6
$b_{22}$	碳循环方程中的转移系数	0.797	资本积累方程参数		
$b_{32}$	碳循环方程中的转移系数	0.0015	$\delta_K$	中国资本折旧率	0.08
$b_{23}$	碳循环方程中的转移系数	0.007	$K_0$	2018 年中国资本存量	208953.77
$b_{33}$	碳循环方程中的转移系数	0.999			

(三) 中国“碳达峰”与“碳中和”约束下经济转型趋势

在设定外生变量变化路径和已知参数情况下,本文使用了 Matlab 的 casadi 非线性最优化算法对最优化系统进行了模拟,其本质在于通过初始值设定和非线性迭代优化获得模拟路径上各个控制变量和状态变量的演化路径。本文涉及到的控制变量主要为碳排放控制率  $\mu$  和储蓄率  $s$ ,在消费者效用最优化的增长假设下模拟了 6 个状态变量资本存量  $K$ 、大气碳库  $M_{AT0}$ 、地表和浅海碳库  $M_{UP0}$ 、深海碳库  $M_{LO0}$ 、地表温度  $T_{AT0}$  和深海温度  $T_{LO0}$  以及其他一些主要变量的变化路径。

图 3 为在“双碳”目标约束下中国总产出变化趋势和碳排放强度变化趋势。概括而言,总产出将会随着“双碳”约束呈现先上升而后不断下降的倒 U 型形状,曲率上可以看出在总产出“达峰”前经济增长较快,而后经济增长总量缓慢下降;而工业碳排放总量将由 2018 年 9.71 吉吨碳下降到 2030 年 7.38 吉吨碳,下降 24%,2030 年后为达到 2060 年碳中和目标工业碳排放总量会持续降低至 0.34 吉吨碳,符合工业领域碳排放基本清零的原则。综合经济增长与工业碳排放演变轨迹可知,2030 年碳达峰前可以同时实现经济增长与清洁发展目标,能够获得绿色发展溢价和总量福利上升;而 2030 年后无法同步实现经济增长与清洁发展目标,说明绿色转型后半场付出的成本和代价较高,导致绿色发展成本和总量福利下降。

为分析其总产出和碳排放量背后的原因,按照 Nordhaus 的分析,气候变化作为“负资本”,减排即为对“负资本”进行投资。图 4 中为资本存量、人均消费、储蓄率和损害占比变动趋势,由于消费者依据每期储蓄率、减排率进行效用最大化选择,其对经济总体资本积累、消费、总产出和减排产生重要影响,分析图 4 结果可以发现:第一,绿色转型上半场由于依赖传统能源效率提高和部分清洁能源替代使得减排的成本较低,实现物质资本与气候变化“负资本”投资同步提高,进而获得福利改善和经济增长的双赢。按照潘家华(2021)的说法,碳中和是目标导向的刚性约束,而碳达峰是从属性安排,在中国目前产业结构相对较重、化石能源消费占比较高的情况下,实现碳达峰过程在目前技术条件下主要还是通过能效改善、清洁能源投资与部分替代来达到,这一从属性安排能够获得物质资本投资与气候减排投资双增长,同时还能实现经济增长处于较快上升轨道。第二,在绿色转型下半场,在消费者福利不断改善和减排硬性约束控制下,必然出现“负资本”投资对一般资本的替代情形,其结果便是绿色溢价获取但总体经济增长福利下降。由于碳中和是刚性约束,同时在



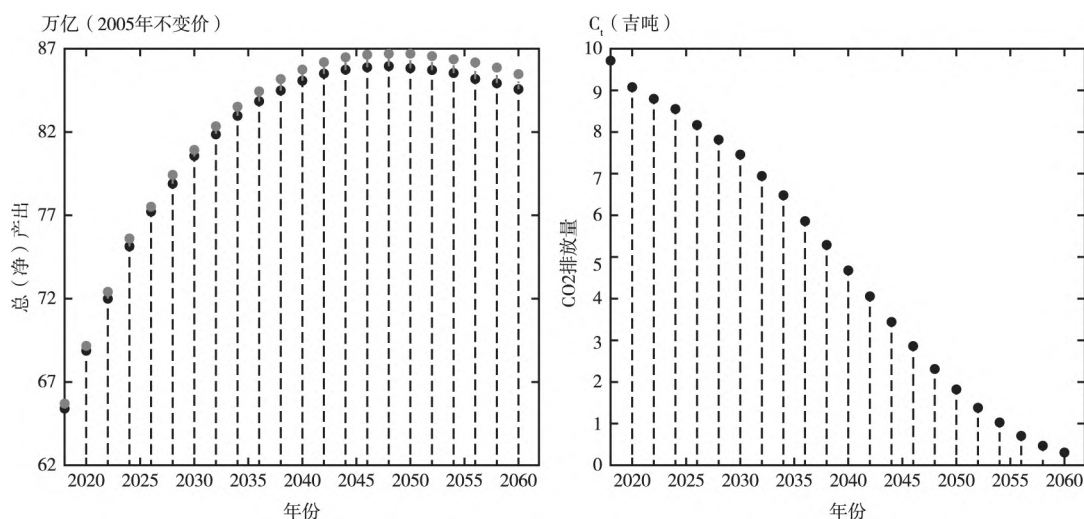


图3 总产出和工业碳排放量

消费者效用福利增长不受损失情形下,储蓄率必然持续下降,有限的投资资金必然优先满足于减排投资(硬约束),挤占和替代物质资本投资,虽然实现了碳中和进程但导致物质资本存量下降与经济增长总量和速度都下滑。当然必须承认,由于经济增长下降总量福利基础降低,人均消费后期增长也乏力。第三,绿色转型上半场损害占比较低,而后半场损害占比较高,这也意味着碳中和后半场刚性约束使得投资于减排的资金越来越多。因此,在单一部门和 Nordhaus 总量模型情形下,由于受限于单一部门和传统能源,其增长轨迹也与传统能源降量减排密切相关,在无多部门支撑和清洁能源持续增长情况下,碳中和和刚性约束较高的减排成本必然使增长减量化和总福利不断受损。

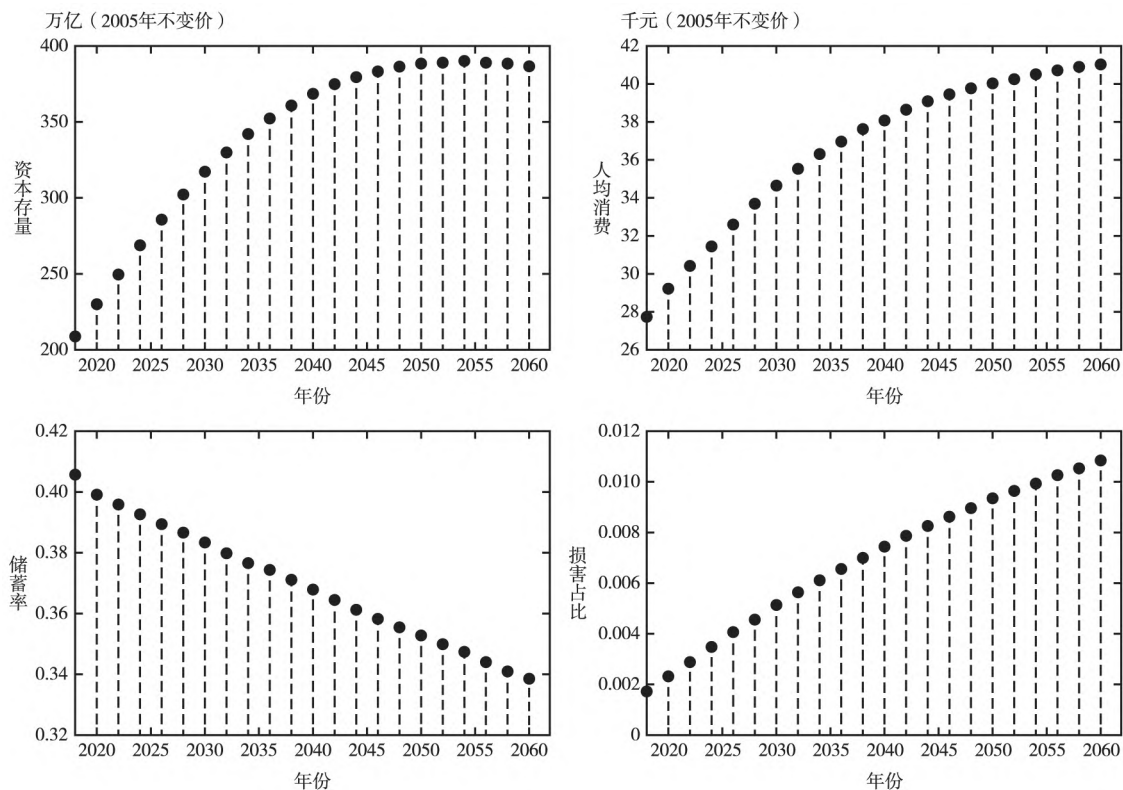


图4 资本存量、人均消费、储蓄率和损害占比

#### 四、结构化视角下绿色增长分析

上文通过中国经验数据并使用 DICE 框架对中国在“双碳”约束下经济增长及其副产品——碳排放路径进行了研究,模型的内在逻辑就是气候冲击降低增长,需通过碳社会成本推动绿色转型,实证结论也表明“双碳”硬约束对经济增长有着减缓效应,特别是从 2018 年至 2060 年高的碳排放控制率、与之匹配的高碳排放成本,虽然使减碳率、碳属性降低,但是也付出较高的成本——经济增长率减缓。因此,总量模型难以反映出结构化特征,即通过绿色产业发展进行“正资本”投资与碳减排的“负资本”投资能否进行对冲,形成一个正资本推动增长的新路径并逐步替代碳排放产业转型的两个路径之叠加路径。中国的绿色转型正是要寻找这一路径,让绿色发展和高碳排放产业转型退出能进行相互对冲,逐步形成保持持续增长,非因绿色转型而减缓的路径。

向绿色转型本质上是从绿色转型约束向绿色转型激励的过程,从而实现传统经济增长与碳排放的排斥性和不可持续路径向经济增长与零碳或低碳排放的相容性和绿色增长路径转化。中国绿色发展与转型的本质是“增长”本身,它包含了两个本质不同的过程:一个过程为绿色发展,即政府激励和不断增加的资本投入推动可再生能源、新能源汽车等绿色能源和绿色产业大力发展;第二个是绿色转型过程,即高碳排放的传统能源、传统产业逐步转型,其受到碳排放管制使得资本不再投入,因为投资形成资产在未来因为碳排放管制会变为“搁浅性资产”(stranded assets),在零碳方案情形下未来这些产业的碳排放量与碳捕捉量相等从而保持碳中和,所以产出必然会大幅度缩减,煤炭、全流程的钢铁行业、大化工产业都会被挤压到非常低比重,这些行业在绿色转型中产出持续下降,其部门和就业面临着转型挑战。中国一方面要做好绿色发展,从根本上解决能源增长与碳排放增长的矛盾;另一方面要做好传统高碳排放的能源与产业退出安排,将传统高碳排放的化石能源、重化工产业在碳排放约束下转型,并与绿色能源和相关产业的增长吸收相匹配,不能过速转型,引发能源不安全和转型摩擦,这也是经济转型和可持续发展的关键所在。但绿色能源在提取、汲取和开发过程中也面临技术成本和集成成本约束,使得能源替代出现摩擦和导致转型阻滞问题,只有依靠资本的长期投入带来技术成本下降和集成成本规模化收益,这一过程转型完毕才能实现真正绿色转型,其有三大突出特征:(1)绿色增长转型阻滞缓解、消除,可持续发展路径得以重新开启;(2)能源替代摩擦消除,传统能源消费维持在较低比例,经济中绿色能源占据主体;(3)碳达峰碳中和目标得以实现,碳排放到达峰后持续下降并稳定在较低水平。

为了将增长置于绿色底色背景下,讨论产业激励和能源替代的自我演进过程。这里只区分了传统能源和新能源投入的替代特征来决定产出,然后借鉴一个包含两部门能源生产新古典增长分析框架来进行启发性模拟。假设经济增长所需能源投入主要来自于两个部门:传统能源部门与清洁能源部门。传统能源部门生产来自于化石能源开采和投入,例如煤炭、石油等,在现实管制条件下,资本投入不断减少和凋零。中国可再生能源部门也超越了投资的风险门槛期,大量资本投入成为其发展的生产要素。同时,现实中无论是风能、太阳能以及其他新能源还是相配套的公共基础设施,其产量增长、电网消纳能力、储能保障供应稳定性等突破,甚至能源安全性都需要资本的大量投入,也只有资本的持续投入才能维系清洁能源生产增长和安全兼顾。参考 Golosov et al. (2014) 分析,假设传统能源部门  $E_d$  与清洁能源部门  $E_n$  的生产函数分别为:

$$E_d = A_d q(t) \quad (2)$$

$$E_n = A_n K(t) \quad (3)$$

其中,(2)式中  $q(t)$  为  $t$  时期化石资源开采投入量,  $A_d$  为传统能源部门的效率系数;(3)式中  $K(t)$  为  $t$  时期的资本投入,  $A_n$  为清洁能源部门的效率系数。下文为书写方便,将省去时间标识  $t$ 。经

经济增长所需的能源总投入为  $E = E_d + E_n$  与 Greiner et al. (2014) 一致,假设总产出  $Y$  是能源投入  $E$  的函数,由此总产出生产函数为:

$$Y = E^\alpha = (A_d q + A_n K)^\alpha \quad (4)$$

这里  $0 < \alpha \leq 1$ 。从(4)可以看出,能源投入虽然是生产的唯一要素来源,但各种能源之间是完全可替代的,采用传统能源还是清洁能源唯一的差别就是能否带来碳排放。

为了刻画传统能源部门中化石资源开采量的变化,这里参考 Golosov et al. (2014),化石资源开采  $q$  来自于不可再生资源  $R$ , $R$  储量有限并会随着资源不断开采而持续减少,假设  $R$  初始储量为  $R_0$ ,定义  $t$  时刻资源的剩余储量为  $R_t = R_0 - \int_0^t q ds$ ,两边求导可以得到  $R$  运动方程为:

$$\dot{R} = -q \quad (5)$$

显然,随着资源开采量  $q$  的增长使得资源总量将会下降,带来的便是开采成本持续的上升,直至资源开采枯竭或者巨额开采成本吞噬经济收益,使得开采资源变得经济不可行。化石资源投入传统能源部门虽然可以促进经济增长,但其负外部性——碳排放增长与累积也值得重视,与 Golosov et al. (2014) 分析一致,假设碳排放  $S$  的运动方程为:

$$\dot{S} = \beta q - \mu(S - \kappa S^*) \quad (6)$$

其中  $\beta$  为碳排放强度系数,反映了使用化石燃料将会使得二氧化碳在大气中不断累积。 $S^*$  为工业化前的碳排放量, $\mu$  为随着时间流逝被自然环境,譬如深海、海洋浅层及大气所吸收和消解的碳排放系数。

为了分析清洁能源部门中资本投入  $K$  的变化,假设资本投入  $K$  积累方程为:

$$\dot{K} = (1 - \Lambda)(1 - D)Y - C - \delta K - \phi q \quad (7)$$

其中  $Y$  为总产出,其减少主要是由于消费  $C$  的增加、资本的折旧( $\delta$  为资本的折旧率)以及不可再生资源开采的投入,借鉴 Nyambuu & Semmler(2020) 的分析思路,设定  $\phi$  为不可再生能源单位开采成本。与现有气候变化主流文献一致,(7)式加入了产出的减项——损害函数与治理成本。其中  $D$  为损害函数,依据 Golosov et al. (2014) 的研究,将其设置为  $1 - D = e^{-\xi(S - S^*)}$ ,说明随着碳排放的不断累积,将会使得产出减少。 $\Lambda$  为诺德豪斯减排成本函数,具体形式采用  $\vartheta \sigma^\vartheta$ ,其中  $\vartheta$  和  $\sigma$  为减排系数,在诺德豪斯 2007 年后 DICE 和 RICE 各版本中  $\vartheta$  又被称为支撑技术(backstop technology),反映了随着支撑技术获得带来新的能源投入成本降低,将会逐步替代最终完全替代已有能源。 $\sigma$  为政府碳排放治理系数,其取值范围为  $[0, 1]$ ,当取值为 0 时说明政府不外生干预碳排放治理,而随着  $\sigma$  取值增大表征碳减排力度越来越大,从而需要投入更多经济资源(产出)来获得低碳化、清洁化过程。

与 Greiner et al. (2014) 一致,经济中代表性消费者效用取决于消费  $C$  和环境污染  $S$ , $U$  的具体形式为  $\ln(C) - (S - S^*)^2$ 。 $U$  随着消费  $C$  的增长将会带来消费者效用增加,即  $U_C > 0$ ,而碳排放  $M$  增长将会使消费者效用  $U$  出现下降,即  $U_S < 0$ 。

在上述假定下,连续情形下代表性消费者的最优化系统可以表示为:

$$\text{Max}_{\{C, \lambda\}} \int_0^\infty e^{-\rho t} (\ln(C) - (S - S^*)^2)$$

其受约束于:

$$\begin{aligned} \dot{K} &= (1 - \Lambda)(1 - D)Y - C - \delta K - \phi q \\ \dot{R} &= -q \\ \dot{S} &= \beta q - \mu(S - \kappa S^*) \\ K(0) &= K_0, R(0) = R_0, S(0) = S_0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\rho t} K(t) &\geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} S(t) \geq S_0 \end{aligned} \quad (8)$$

对于上述最优化系统问题,本文采用 NMPC( nonlinear model predictive control) 来求解系统(8)的数值解。Grune & Pannek(2011)首次对该方法在经济学最优化问题中适用性进行了讨论,并通过多个经典经济学模型进行了数值模拟,取得了良好的理论和预测效果。关于该方法的具体原理,其实就是将(8)式中连续无穷目标函数转化为离散可加目标函数,并在(8)式中由各个状态变量运动方程、边界条件组成的约束条件下对离散可加目标函数进行迭代,从而最终找到最优解。从原理上看,非线性预测控制方法与动态规划等迭代方法较为相似,都是说明消费者在追求效用最大化过程中,依据最近的控制变量进行抉择,从而得到状态变量以及目标函数数值解,在不断的滚动优化和反馈校正中得到目标函数最优解。另外,在使用动态规划迭代中出现的最大问题就是维数诅咒(dimension curse),对于减低计算复杂性和徒劳增加计算负担、降低计算精度(换言之,随着计算维度增加并不会带来计算精度的改善,反而造成计算偏差)非常不利,而非线性预测控制方法恰恰能规避维数诅咒问题,能够用较短时间求出无限期最优化解,但模拟效果却与理论解没有太大差异。

数值模拟参数选择方面,本文参考了现有研究的一些结论。从现实看,传统能源部门效率比清洁能源部门的效率更高,并参考 Golosov et al.(2014)和 Nyambuu & Semmler(2020)的分析,将  $A_d$  和  $A_n$  分别设为 5 和 1。损害函数  $D$  的设定主要参考自 Golosov et al.(2014),因此损害系数  $\zeta$  也来源于此文并将其设为 0.000023793。碳排放治理  $\Lambda$  主要参数选自诺德豪斯 2016 版 DICE,其中  $\theta$  为 0.0686、 $\theta$  为 2.887,取  $\sigma = 1$  表示在绿色和双碳转型中较高的减排控制力度。时间折现系数与现有的主流气候变化评估模型一致,如 DICE、IPCC 等,取  $\rho = 3\%$ 。除此之外,模型其他参数选择来自于 Greiner et al.(2014),化石资源单位开采成本  $\mu = 0.1$ ,碳排放强度系数  $\beta$  为 0.5,碳排放自然吸收和消解率  $\mu$  为 0.1,资本折旧率  $\delta$  为 0.08。需要指出的是,NMPC 模拟由于将无限期最优化问题转化为离散可数期最优化问题,在迭代或者说可加模拟过程中也会使无限期最优化问题化解为多步最优化问题,所以在每步迭代过程所产生的最优化路径和最终最优化路径将会形成开环路径和闭合路径(Grune & Pannek,2011)。

图 5 加入了开放循环以更直观地看出闭合路径生成过程,主要反映求解和迭代过程,呈现 NMPC 算法的计算特征。总体而言,不可再生资源将从初始值不断下降至 0.1 附近的稳态水平,资本演化过程则是先快速上升而后经历转型阻滞阶段后快速上升至稳态水平,碳排放路径在向绿色转型阶段演化主要依赖于能源转型过程,初始阶段由于能源转型替代摩擦,碳排放还会处于上升渠道,只有在实现绿色转型后,绿色能源占据主导,碳排放才能趋于下降中稳定在稳态水平,达到碳中和目标。具体而言,从不可再生能源运动方程可知其演化路径将会遵循不断下降渠道,其主要特征在于转型初始阶段其曲率较大,向绿色转型攻坚主要集中于转型上半场;而从资本演化路径看大致呈现为 U 型特征,其因有三:第一,在碳达峰目标提出后,控碳、限碳必然使得绿色能源部门加大资本投入,但受限于绿色能源部门转型不确定性、安全性和稳定性等因素影响,绿色能源部门成长将会经历转型阻滞阶段,导致绿色能源部门的资本投入进入短暂稳定甚至小幅下降渠道,这时政府对绿色研发补贴和其他财政政策支持就显得尤为重要,能够降低转型痛苦,加快绿色转型从不确定性、不稳定性和不安全性向确定性、稳定性和安全性过渡。第二,一旦绿色能源关键技术得以解决,传统能源下降过程也伴随着绿色能源上升过程,一方面支撑(替代)技术(backstop technology)不断突破,其主要原因在于绿色能源资本投入不断增多,加速了绿色能源替代和降低绿色能源规模成本,例如光伏或风能等技术成本(technology cost)和集成成本(integration cost)持续下降,以光伏和陆上风能为例(图 6),加权平准化度电成本下降明显,2010 年每千瓦时光伏和陆上风电加权平准化度电成本分别为 0.3 美元和 0.07 美元,而 2019 年二者加权平准化度电成本分别为 0.054 美元和 0.047 美元,不仅下降幅度明显而且基本已趋同。另一方面,能源转型开启加速能源替代,资本

投资进入大幅上升空间带动新能源部门取代传统能源,并成为经济增长能源主要来源,能源转型中能源增长与碳排放并行不悖。第三,碳排放演化轨迹正是绿色转型在环境层面的征象,初始阶段绿色转型阻滞所带来的转型摩擦,以及传统能源驱动增长模式的路径依赖性,将会使碳排放不断增长,而跨越绿色能源路径后碳排放这一经济增长副产品将会下降和保持在较低水平,使用适当的碳捕捉和碳吸收等手段能够实现低碳、零碳的碳中和目标。

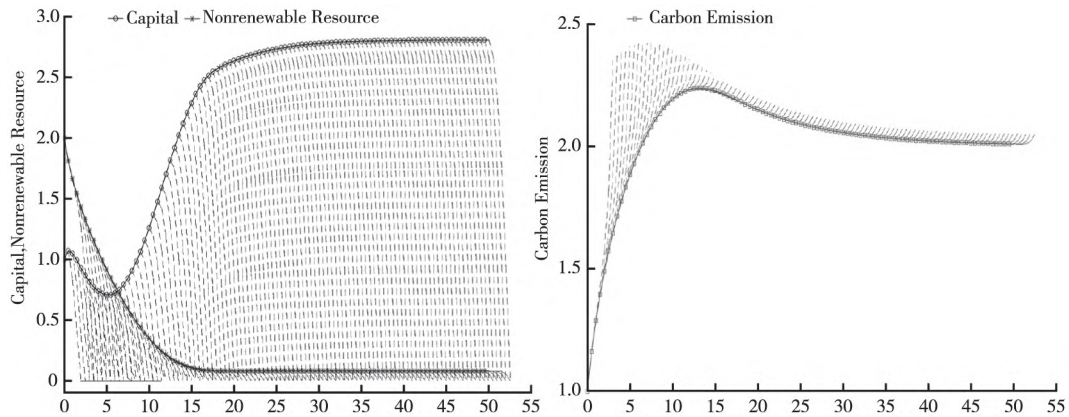


图 5 资本、不可再生能源(左图)与碳排放(右图)的开环(虚线)和闭环(实线)模拟路径

最后,根据方程(2)一(4)式分别模拟得出不可再生能源部门和清洁能源部门及总产出的演化轨迹,见图7。概括而言,绿色增长转型遵循U型特征,绿色转型对于经济增长既是冲击也是激励,既是转型阻滞也是升级动力,既是短期报酬递减也是长期报酬递增,长期内必然伴随着不可再生能源部门和清洁能源部门此消彼长,从能源消费→碳排放这一路径升级为能源消费→碳中和可持续增长痕迹。从图7可以看到,不可再生能源部门无疑会随着开采量减少和绿色转型干预进入消退期,长期而言传统能源部门最终下降保持在较低比重,其在能源消费中日渐处于次要地位,而清洁能源部门除了受转型阻滞所导致的短暂收缩外,将会处于替代传统化石能源和居于日益占据能源消费主体的增长轨道,产出随着转型也会从阻滞进入新的均衡,带来的结果便是绿色转型与能源消费增长同步趋进,有了新能源支撑或者说支撑能源技术(backstop technology)便会致总产出路径持续增长,这也正是绿色增长转型主要内涵,能源转型成功带动经济增长转型成功。

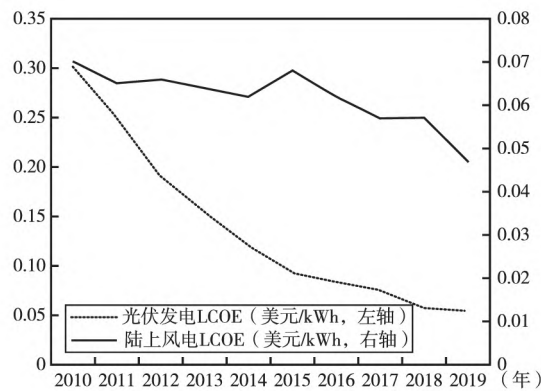


图 6 中国光伏发电和陆上风电 LCOE

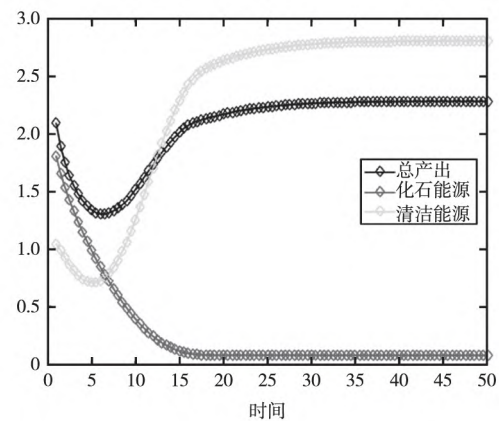


图 7 中国绿色增长和能源转型模拟

## 五、绿色发展和转型——中国的治理实践

我们对转型行业和绿色发展行业进行了一个产业发展路径的模拟,二者并非此消彼长的,而是透过治理模式完成了一个相互转换,模型模拟路径趋势隐含中国未来绿色转型与发展的路径,但其内生机制和条件需要有更多中国现实来理解,也正是基于这些理解才能够服务于中国的绿色发展与转型,推动中国高质量转型。中国绿色发展和转型的治理实践包括丰富的内容,其包含了政策管制与激励,特别是电力市场化改革,这些治理实践推动了中国独特的绿色转型与发展。

治理实践 1:“产业激励”是中国治理实践的关键,在新兴产业没有达到临界市场规模条件下,产业(数量)激励比价格激励更重要。中国再生能源生产和新能源汽车的成功是产业激励的典范,它们成为了中国经济增长动力并在全球竞争中弯道超车。中国当前新能源、电动汽车产业进入到全面替代阶段。中国从太阳能到电动车,进行了长时间的探索和发展,从江西赛维、无锡尚德和汉能集团,一代一代的太阳能企业发展和倒闭交叠,到 2022 年企业发展从替代阶段转向全面普及发展新阶段,2022 年再生能源与电动汽车市场占有率超过 25%。产业替代的门槛值是 5%—25%,超过 25% 便进入到大规模普及阶段。绿色产业普及阶段的五个特征:一是大规模资本投入;二是技术进步加快;三是市场需求持续扩容;四是完善配套基础设施的大规模资本投入,包括电网改造、储能、充电桩等的发展;五是政府监管与能源安全保证。中国绿色信贷全球第一,绿色债券发行全球第二,中国绿色发展已经从财政补贴激励转向资本供应的市场激励。

治理实践 2“先立后破”中国渐进式转型的治理实践。中国以促进增长吸收转型成本为基本工作步骤,2022 年提出了“先立后破”的发展战略,强调了激励可再生能源和新能源电动车发展,同时对煤炭清洁生产给予一定的支持,新旧能源替代平稳。先立的激励政策包括:(1) 财政直补,逐步退坡,激励了再生能源和新能源汽车的启动与发展。(2) 金融激励,中国绿色信贷和绿色债券纳入考核,大量资金投资于绿色产业。2021 年央行提出了碳减排工具,年利率降低到 1.75%,国开行发行绿色债券,利率为 2.1%,资本的需求得到快速满足。(3) 中国转型中的行业激励探索,诸如电动汽车的积分制、油车补贴电车、中国区域性碳排放交易市场的 CCER 认证和交易、电力部门推动的绿证等都为绿色转型奠定基础。(4) 中国碳排放价格和欧洲相比一直处于较低水平,这主要是对碳排放预算没有做过强的约束,降低了转型成本。可以看出,中国推动可再生能源与绿色产业发展方面,产业激励比价格激励更为重要,转型过程中居民和企业没有感觉到价格冲击的转型阵痛。

不过,碳排放管制和价格机制依然是重要的,但这应该在碳达峰后加强,并与国际社会进行对接。碳排放的社会成本(social cost of carbon, SCC)是欧盟等发达经济体促进碳排放转型的最关键变量,欧盟构建了碳排放交易市场来交易碳排放额度,并依据碳排放的社会成本对碳税进行定价,认为“搞对碳排放价格”就能加快推动零碳转型。碳排放的社会成本被定义为由额外 1 吨工业二氧化碳排放导致的经济成本。进一步说,它是用当前每单位额外排放的消费效用贴现值的变化来表示,反映了碳排放对总效用变化与消费对总效用变化的替代关系,碳排放的社会成本为碳排放控制在适当水平或减少排放政策中的碳定价提供指导。中国已经建立区域性碳交易市场,碳排放成本被压得非常低,长期碳排放价格为 35—55 元/吨,而欧盟同期达到 80—90 欧元/吨。中国以激励绿色发展为主,以发展替代传统高碳排放产业,这样对增长和稳定都更有益。

治理实践 3: 市场化改革始终是中国治理实践的主线。能源是国家命脉,发电和电网一直处

于高度垄断。只有持续推动中国电力市场化改革,才能实现分布式再生能源的大发展。2002年,国务院出台《电力体制改革方案》(5号文),按照“厂网分开、主辅分离、输配分开、竞价上网”的原则,将原国家电力公司拆分,成立国家电网、南方电网两家电网公司和华能、大唐、国电、华电、中电投五家发电集团和四家辅业集团公司,打破发电侧垄断和塑造多元市场化主体,拉开了电力市场化改革序幕。2015年新一轮电改启动,标志性文件是《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(9号文),新一轮改革目标有两点,一是输配电价核定,二是增量配网市场和售电市场放开,在全国范围内逐步形成竞争充分、开放有序、健康发展的市场体系。2020年2月,国家发展和改革委员会和能源局联合发布的《关于推进电力交易机构独立规范运行的实施意见》提出2022年底前各地结合实际情况进一步规范完善市场框架、交易规则、交易品种等,进一步推动电网的市场化改革。2021年中国拉闸限电后,中国电力市场化改革再次提速。2021年10月8日国务院常务会议提出改革完善煤电价格市场化形成机制等多项改革措施,2021年10月11日国家发展和改革委员会正式出台《关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》,对电力市场化改革内容作出进一步明确。在推行厂网分离后,为保证电网安全,输配环节仍由国家电网、南方电网等电网企业经营。由于电网环节具有自然垄断属性,需要对其进行管制,输配电价机制是世界普遍采取的电网环节管制措施。2022年1月29日,国家发展和改革委员会和能源局联合出台了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,核心内容在于电力改革的市场化和转型。市场化是指在全国更大范围内还原电力的商品属性,转型是提升电力市场对高比例新能源适应性。2022年2月10日发布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》提出完善“双控目标”、建立新型电力系统、发展绿色金融、绿证交易等支持新能源发展措施,明确了“先立后破”改革思路。2022年3月22日印发《“十四五”现代能源体系规划》更加明确市场化转型的目标。而后连续发文鼓励储能、风光电基地建设等。中国电力市场化改革激励了中国再生能源发展。

再生能源的关键是分布式电网,与互联网相同,可以自下而上推动发展。当年打破电信垄断,互联网崛起与当前推动电力市场化有异曲同工之妙,分布式再生能源迅速发展,市场化改革始终是中国最大的激励因素。

治理实践4:绿色转型治理是未来重要的目标。中国绿色发展取得了世人瞩目的成就,与发展同样重要的是绿色转型,转型分为四个主要内容:(1)转型与技术进步共生发展,而不是消灭高碳排放部门,其技术进步包括自身的节能、降低碳排放等流程改造,更包括碳捕捉的突破,碳捕捉的水平就决定了高碳排放部门的退出程度,因此这需要转型金融和绿色金融同时资助,没有资金是不可能推进改造的;(2)转型退出的速度是对能源安全和经济波动有着重要影响的,中国以煤炭—重化工产业为主的工业化体系,能源和重工业占比较高,因此有序吸收传统部门是重要的讨论议程;(3)转型更需要政府财政资助支持其退出,包括转型财政和转型金融等多项支持政策,保障其不出现过大的震荡;(4)区域和行业冲击不平衡需要转移支付补偿。

从中国治理实践可以看出中国激励增长的潜力巨大。中国通过激励绿色发展形成对传统高碳产业的快速替代,辅之以财政和金融激励使得中国绿色发展中数量激励效率高于基于价格的利益分配推动的转型,走出了以增长促转型的道路。电动车、再生能源组件发展和分布式能源装机都超过了规划要求,直接进行替代,特别是企业内部替代自我加速,如广汽的电动车埃安、汽油车双发展和逐步替代,电力公司的新能源对石化能源发电的替代等。再生能源和新能源车的建设逐步从补贴激励退出,进入到资本促发展,即我们的含有资本生产的模型。财政支持的重点应该转向降低转型摩擦,同时,在发展绿色金融的同时重点关注转型金融支持碳捕捉和高碳排放产

业退出。中国基于发展的替代转型取得了成功,但市场机制依然阻碍着发展,市场的定价机制依然是重要的,下一阶段的治理任务应放在电力市场改革和碳排放的定价机制设计上。建立新的能源—碳排放交易市场机制任重而道远,长远看只有市场化机制和有效的行业监管才能确保有序转型。

附录: DICE 模型系统

我们首先对 DICE 模型经济系统板块进行描述。DICE 生产函数为经典 C-D 形式,即:

$$Y(t) = A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (1)$$

其中,  $Y(t)$  表示经济中的总产出;  $L(t)$  表示经济中的总劳动投入;  $A(t)$  表示希克斯技术;  $K(t)$  表示经济中的资本存量;  $\alpha$  表示资本的产出弹性。

在新古典增长模型中企业生产不会产生负外部性。然而,由于企业生产活动往往伴随着化石能源的消耗,这一过程会产生温室气体排放,并通过一系列物理化学反应导致气候变暖,使得自然灾害“厚尾”性特征加大,最终对经济增长和社会发展产生负面影响。假设碳排放与总产出之间的关系为:

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] Y(t) \quad (2)$$

其中,  $E$  为碳排放总量,  $\sigma$  为碳排放强度,  $\mu$  为碳排放治理力度。另外碳排放除了生产中使用化石能源所致外,土地等农业生产活动也会产生碳排放,但从历史经验看其所占比较小,假设土地生产所产生的碳排放总量为  $E_{Lnd}(t)$ , 这样经济系统所产生的碳排放总量可以表示为:

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Lnd}(t)$$

Nordhaus 在各版 DICE 中都通过引入损害函数来对生产过程产生的碳排放这一负外部性进行约束。损害函数  $D(t)$  的函数形式为  $D(t) = \psi_0 T_{AT}(t)^{\psi_2} + \psi_1 T_{AT}(t)^{\psi_3}$ , 其中,  $T_{AT}(t)$  表示平均气温;  $\psi_0$  和  $\psi_1$  分别为损害函数的系数项;  $\psi_2$  和  $\psi_3$  分别为经济损害函数的一次和二次指数项。与最新版 DICE 一致,这里只取二次指数项。取  $\Omega(t) = [1 - D(t)]$  在加入损害函数情况下净产出变为:

$$Q(t) = (1 - D(t)) A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} = \Omega(t) A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (3)$$

假定政府负责碳排放的终端治理。例如政府可以利用碳捕获和封存(CO<sub>2</sub> capture and storage, CCS)技术来减少碳排放。参考 Nordhaus(2018) 的设定,碳排放治理的成本函数被定义为:

$$A(t) = \theta(t) \mu(t)^{\theta_1} \quad (4)$$

其中,  $\mu(t) \in [0, 1]$  表示政府碳排放控制率,表示政府在碳减排治理中的力度。 $\theta(t)$  为减排治理系数。显然,当  $\mu(t) = 0$  时,表明政府对碳减排采取放任态度,本文定义为不干预情形,而当  $\mu(t) = 1$  时,则表明政府在控制碳排放方面力度最大,能够实现工业生产领域零碳排放,本文定义为碳中和情形。 $\theta_1$  反映技术不变条件下,碳排放治理的难易程度。 $\theta_1$  通常大于 1,即  $A(t)$  为严格凸函数。也就是说,随着碳处理和新能源技术的不断进步,碳排放治理成本不断下降。因此,在进一步考虑碳排放治理基础上,净产出还需要扣除碳减排的治理成本, (3) 式进一步转化为:

$$Q(t) = \Omega(t) (1 - A(t)) Y(t) \quad (5)$$

经济中代表性消费者效用  $U$  取决于消费  $C$ 。  $U$  随着消费  $C$  的增长将会带来效用增加,即  $U_c > 0$ , 但消费增长带来的消费者效用增加却是递减的,即  $U_{cc} < 0$ 。跨期情况下消费者总效用为:

$$W = \sum_{t=1}^T \beta^{t-1} U(c(t), L(t)) \quad (6)$$

其中,  $c(t)$  表示  $t$  时期的人均消费,即  $c(t) = C(t) / L(t)$ 。 $\beta$  即为消费者的主观贴现因子,其表达式为  $\beta = 1 / (1 + \rho)$ , 这里  $\rho$  为主观贴现率,即  $\beta$  取值越大,消费者跨期决策中才会更加偏向于用未来消费替代现时消费,在本文中理解为消费者有意愿牺牲今日消费对环境治理进行投资以获得未来更高消费。本文选用新古典增长模型中最为常用的 CRRA 型效用函数,即  $U(c(t)) = (c(t)^{1-\eta} - 1) / (1 - \eta)$ , 参数  $\eta$  表示不平等厌恶系数。

家庭面临的资源约束可以表示为:

$$K(t+1) = Q(t) - C(t) + (1 - \delta_k) K(t) \quad (7)$$

$\delta_k$  表示资本折旧率。接下来本文对 DICE 模型的地球生态系统进行描述。自然界碳循环的基本过程包括生物与大气之间的循环、大气与海洋之间的循环以及人类活动。相应地,自然界的碳库也包含三大类,即大气层碳库、



地表和浅海层碳库和深海层碳库。若用  $M_{AT}(t)$ 、 $M_{UP}(t)$  和  $M_{LO}(t)$  分别表示大气中、地表和浅海以及深海中的碳存量,则自然界碳循环过程可以表示为:

$$M_{AT}(t+1) = E(t+1)/3.667 + b_{11}M_{AT}(t) + b_{21}M_{UP}(t) \quad (8)$$

$$M_{UP}(t+1) = b_{12}M_{AT}(t) + b_{22}M_{UP}(t) + b_{32}M_{LO}(t) \quad (9)$$

$$M_{LO}(t+1) = b_{23}M_{UP}(t) + b_{33}M_{LO}(t) \quad (10)$$

其中  $b_{ij}$  表示不同碳库之间的流动参数。3.667 表示一吨碳与一吨  $\text{CO}_2$  之间的转换系数。由于经济活动所产生的碳排放超过了三大碳库的吸收、消解能力,温室气体的不断累积,通过增加辐射强迫导致地球表面变暖,温室气体积累与辐射强迫之间的关系可以表示为:

$$F(t) = \chi \{ \log_2 [M_{AT}(t)/M_{AT}(1750)] \} + F_{EX}(t) \quad (11)$$

$$F_{EX}(t) = F_{EX0} + (F_{EX1} - F_{EX0}) \frac{t-1}{T_{max}-1} \quad (12)$$

其中  $F(t)$  表示  $t$  时期的辐射强迫;  $F_{EX}(t)$  为外生辐射强迫;  $M_{AT}(1750)$  表示工业革命前大气中的碳排放存量,该数值为  $588\text{GtCO}_2$ 。  $F_{EX0}$  和  $F_{EX1}$  分别为其他温室气体的初期辐射强迫和末期辐射强迫;  $\chi$  表示  $\text{CO}_2$  的辐射强迫系数。更高的辐射强迫使大气层变暖,然后使上层海洋变暖,逐渐使深海变暖,地表平均温度、深海平均温度以及辐射强迫之间的关系可以表示如下:

$$T_{AT}(t+1) = T_{AT}(t) + \xi_1 \{ F(t+1) - L_{AM}T_{AT}(t) - \xi_3 [T_{AT}(t) - T_{LO}(t)] \} \quad (13)$$

$$T_{LO}(t+1) = T_{LO}(t) + \xi_4 [T_{AT}(t) - T_{LO}(t)] \quad (14)$$

其中  $T_{AT}(t)$  和  $T_{LO}(t)$  表示地表平均温度与深海平均温度。  $\xi_1$ 、 $L_{AM}$ 、 $\xi_3$  和  $\xi_4$  都是气候方程系数。

#### 参考文献

- 布兰查德、梯若尔 2021 《应对未来的三大经济挑战》,《比较》第 5 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。
- 潘家华 2021 《中国碳中和的时间进程与战略路径》,《财经智库》第 4 期。
- 清华大学气候变化与可持续发展研究院项目综合报告编写组 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。
- 史丹、李鹏 2021 《“双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击》,《改革》第 12 期。
- 张平 2020 《中国经济增长路径转变中经济与非经济因素共同演进机制构建》,《社会科学战线》第 10 期。
- 张平 2022 《中国经济绿色转型的路径、结构与治理》,《社会科学战线》第 8 期。
- 张自然、张平、刘霞辉、袁富华 2022 《宏观经济蓝皮书:中国经济增长报告(2021—2022)》社会科学文献出版社。
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyjn, and D. Hemous, 2012, “The Environment and Directed Technical Change”, *American economic review*, 102(1), 131—66.
- Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. R. Kerr, 2016, “Transition to Clean Technology”, *Journal of political economy*, 124(1): 52—104.
- Ackerman, F., E. A. Stanton, R. Bueno, 2013, “Epstein-Zin Utility in DICE: Is Risk Aversion Irrelevant to Climate Policy?”, *Environmental and Resource Economics*, 56(1), 73—84.
- Agrawala, S., 1998, “Context and Early Origins of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, *Climatic Change*, 39(4), 605—620.
- Barrage, L., 2018, “Be Careful What You Calibrate for: Social Discounting in General Equilibrium”, *Journal of Public Economics*, 160, 33—49.
- Berck, P., and M. Roberts, 1996, “Natural Resource Prices: Will They Ever Turn Up?”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 31(1), 65—78.
- Cai, Y., and T. S. Lontzek, 2019, “The Social Cost of Carbon with Economic and Climate Risks”, *Journal of Political Economy*, 127(6), 2684—2734.
- Crost, B., and C. P. Traeger, 2014, “Optimal CO2 Mitigation under Damage Risk Valuation”, *Nature Climate Change*, 4(7), 631—636.
- Dietz, S., and N. Stern, 2015, “Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus’ Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions”, *Economic Journal*, 125(583), 574—620.
- Doytch, N., S. Narayan, 2021, “Does Transitioning towards Renewable Energy Accelerate Economic Growth? An Analysis of Sectoral

Growth for a Dynamic Panel of Countries” , *Energy* , 235 , 121290.

Duan et al. , 2021 , “Assessing China’s Efforts to Pursue the 1.5 C Warming Limit” , *Science* , 372( 6540) , 378—385.

Farhi , E. , and I. Werning , 2005 , “Inequality , Social Discounting and Estate Taxation” , NBER Working Paper ( wp11408) .

Golosov , M. , J. Hassler , P. Krusell , and A. Tsyvinski , 2014 , “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium” , *Econometrica* , 82( 1) , 41—88.

Greiner , A. , L. Grüne , and W. Semmler , 2014 , “Economic Growth and the Transition from Non-renewable to Renewable Energy” . *Environment and Development Economics* , 19( 4) , 417—439.

Grüne , L. , and J. Pannek 2011 *Nonlinear Model Predictive Control London: Springer.*

Hambel , C. , H. Kraft , and E. Schwartz , 2017 , Optimal Carbon Abatement in a Stochastic General Equilibrium Model with Climate Change , EARE conference , Athens.

Hartwick , J. , 1977 , “Population Growth , Technical Progress , Intergenerational Equity and the Investment of Resource Rents” , Economics Department , Queen’s University.

Jensen , S. , and C. P. Traeger , 2014 , “Optimal Climate Change Mitigation under Long-Term Growth Uncertainty: Stochastic Integrated Assessment and Analytic Findings” , *European Economic Review* , 69 , 104—125.

López , R. E. , G. Anríquez , and S. Gulati , 2007 , “Structural Change and Sustainable Development” , *Journal of Environmental Economics and Management* , 53( 3) , 307—322.

Meadows , D. H. , D. L. Meadows , J. Randers , and W. B. William , 1972 , *The Limits to Growth* , Universe Books.

Nordhaus , W. D. , and Z. Yang , 1996 , “A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies” , *American Economic Review* , 86( 4) , 741—765.

Nordhaus , W. D. , 1992 , “An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases” , *Science* , 258( 5086) , 1315—1319.

Nordhaus , W. D. , 1974 , “Resources as a Constraint on Growth” , *American Economic Review* , 64( 2) , 22—26.

Nordhaus , W. D. , 2007 , “The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy” , *New Haven: Yale University.*

Nordhaus , W. D. , 1991 , “To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect” , *Economic Journal* , 101( 407) , 920—937.

Nordhaus , W. D. , 2013 , *The Climate Casino: Risk , Uncertainty , and Economics for a Warming World* , Yale University Press.

Nordhaus , W. D. , 2018 , “Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies” , *American Economic Journal: Economic Policy* , 10( 3) , 333—60.

Nyambuu , U. , and W. Semmler , 2020 , “Climate Change and the Transition to a Low Carbon Economy—Carbon Targets and the Carbon Budget” , *Economic Modelling* , 84( 1) , 367—376.

Pindyck , R. S. , 2013 , “Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?” , *Journal of Economic Literature* , 51( 3) , 860—72.

Popp , D. , 2002 , “Induced Innovation and Energy Prices” , *American Economic Review* , 92( 1) , 160—180.

Rausser , G. C. , 1974 , “Technological Change , Production , and Investment in Natural Resource Industries” , *American Economic Review* , 64( 6) , 1049—1059.

Sen , A. , 1982 , *Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation* , Oxford University Press.

Smith , V. K. , 1979 , “Natural Resource Scarcity: A Statistical Analysis” , *Review of Economics and Statistics* , 61( 3) , 423—427.

Stern , N. , and N. H. Stern , 2007 , *The Economics of Climate Change: The Stern Review* , Cambridge University Press.

Stern , N. , 2015 , *Why Are We Waiting? The Logic , Urgency , and Promise of Tackling Climate Change* , MIT Press.

Tahvonen , O. , and S. Salo , 2001 , “Economic Growth and Transitions between Renewable and Nonrenewable Energy Resources” , *European Economic Review* , 45( 8) , 1379—1398.

Van den Bremer , T. S. , and F. Van der Ploeg , 2021 , “The Risk-Adjusted Carbon Price” , *American Economic Review* , 111( 9) , 2782—2810.

Van der Ploeg , F. , and de A. Zeeuw , 2018 , “Climate Tipping and Economic Growth: Precautionary Capital and the Price of Carbon” , *Journal of the European Economic Association* , 16( 5) , 1577—1617.

Van der Ploeg , F. , and A. Rezai , 2021 , “Optimal Carbon Pricing in General Equilibrium: Temperature Caps and Stranded Assets in an Extended Annual DSGE Model” , *Journal of Environmental Economics and Management* , 110 , 102522.

Wang et al. , 2020 , “Large Chinese Land Carbon Sink Estimated from Atmospheric Carbon Dioxide Data” , *Nature* , 586 , 720—723.

Weitzman , M. L. , 2013 , “Tail-hedge Discounting and the Social Cost of Carbon” , *Journal of Economic Literature* , 51( 3) , 873—82.

## Exploration and Governance Practice of China's Growth Path under the Green-development Strategy

Research Group of China Economic Growth Frontier

**Summary:** According to the goals of striving to peak carbon dioxide emissions before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060, China's green transformation is aimed at exploring the optimal growth path under China's zero-carbon strategy on the emphasized premises of green priority and growth fundamentalism. Green transformation of China, as the largest developing country in the world, is integrate with growth goals in addition to its green advocacy. It has an important impact on China's high-quality development and modernization how to achieve sustainable economic growth and reduce the frictional cost of green transformation under the strategy of green development as priority. The power rationing in 2021 and the global energy shock caused by the Russian-Ukrainian conflict in 2022 once again reminds China of some caveats during its green development transformation. On the one hand, China should avoid a one-size-fits-all approach to energy and carbon emission management, and promote the transformation in an orderly manner in the way of establishing new green energy industries before the reduction of carbon emissions, so as to reduce frictions in the transformation. On the other hand, China must actively increase and accelerate the development of renewable energy and green industries, accelerate the replacement of stock with increments, and explore the growth path under China's zero-carbon strategy. China needs to draw lessons from growth practices and frictions in the transformation, explore a path towards green transition and sustainable economic growth with Chinese characteristics, and advance China's governance modernization and high-quality economic development.

Against this background, this paper, based on the existing aggregate analysis and a structural perspective, probes into the green transformation which advocates for a structural transformation to alleviate frictions in the transformation and drive economic growth by structural transformation. It explores the approach to achieve compatibility between the dual tasks of economic growth and green transformation in developing economies like China, to minimize the impact of transformation and green development costs, and it provides theoretical and empirical support for differentiated governance and policy arrangements. To this end, this paper first simulates the economic growth path under the constraint of carbon peak and carbon neutrality goals within the framework of the classic dynamic integrated climate-economy (DICE) model calibrated by latest data from China. The simulation results indicate that the dual objectives of economic growth and clean development could be both realized before peak carbon dioxide emissions in 2030, whereas after 2030 the abovementioned objectives could not be reached simultaneously. This implies that the cost and price paid for the green transition in the later stage are high, hampering green development and reduces aggregate welfare. Then, based on the empirical facts of China's transformation practice, this paper conducts simulations from a structural perspective within a two-sector green growth framework. It finds that green transformation could only be realized by a new path of economic growth driven by "positive capital" and gradually replacing the carbon emission industry transformation, which was formed as the consequence of "positive capital" investment through green industry development hedging against "negative capital" investment in carbon emission reduction. Finally, this paper summarizes the governance practices of China's green development and transformation. Specifically, industrial incentives are the key to China's governance practices, establishing new green energy industries before the reduction of carbon emissions is the key to the success of China's gradual transformation, the market-oriented reform is the main line of China's practice, and green transformation governance are important goals in the future. Although the quantitative incentive policies featuring industry incentives and the development of new green energy industries before the reduction of carbon emissions are the driving force for China's green transformation and development, in the long run, price incentives are still valid, and there is a long way to go to explore the establishment of a market-based carbon emission pricing mechanism.

**Keywords:** Green-development Strategy; Aggregate Model; Structural Model; Governance Practice

**JEL Classification:** O44, Q30, Q54

(责任编辑: 恒 学) (校对: 王红梅)