

# 碳中和背景下的中国经济低碳转型： 特征事实与机制分析<sup>\*</sup>

靳 玮 王弟海 张 林

内容提要: 如何实现碳中和背景下低碳经济转型与增长是我国当前面临的重大问题之一。本文首先梳理了低碳经济转型的典型特征事实,进而在一个绿色增长模型中刻画了高碳资产、低碳资产、碳排放以及污染损害的动态特征,并分析了经济低碳转型的理论机制。本文还定量模拟了我国经济低碳转型的时间路径。研究表明:碳定价、排放效率提升与资产结构低碳化调整是实现“碳中和”经济转型的关键机制。碳定价通过纠正碳排放外部性成本释放减排激励信号,并促使排放效率提升和资产结构调整;排放效率提升和结构清洁化调整又可以抵消碳定价的经济约束效应,减轻资产搁浅等低碳转型代价,推动低碳转型平稳过渡。三种机制的联合作用既有助于实现净零碳排放目标,又可以促进经济内生增长。研究结论为碳中和背景下经济低碳转型机制设计思路提供了理论依据。

关键词: 碳中和 低碳转型 碳定价 排放效率 结构调整

## 一、引言

如何能在经济增长的同时实现“碳中和”目标下的低碳转型是我国当前面临的重要问题之一。我国2020年9月已向联合国大会承诺力争于2030年前达到碳排放峰值、2060年前实现“碳中和”目标。因此,“碳中和”目标将成为我国当前以及未来相当一段时间经济增长的重要约束,实现增长模式的绿色低碳转型成为我国未来经济可持续发展的唯一途径。按照我国目前技术水平、产业结构和经济发展现状,要实现“碳中和”目标还任重道远。我国当前的年碳排放规模约为110亿吨二氧化碳当量,其中主要排放来源是能源、工业以及农业活动。如何在短短40年间推进低碳转型以实现发达国家耗费近百年时间才达到的“碳中和”目标,已成为我国相关决策部门迫切关注的现实问题。应该如何针对“碳中和”目标展开低碳转型机制设计?利用碳定价规制、效率提升以及结构调整等机制能否推进实现“碳中和”目标?“碳中和”目标约束又将给中国经济增长路径带来怎样影响?上述问题已成为当前决策部门制定经济发展长期规划的重要议题。解决这些问题无疑需要学界针对“碳中和”目标下经济低碳转型机制开展前瞻性研究。深入理解不同碳减排机制对经济增长转型的影响是亟待解答的理论问题。针对上述问题的分析正是本文的主要研究目的。

首先,本文考察了低碳经济转型的典型特征事实。其次,构建了一个绿色经济增长的理论模型,刻画出高碳资产、低碳资产、碳累积存量及碳排放外部性成本的动态特征。利用该模型分析了碳定价、排放效率提升以及资产结构调整对低碳经济转型的作用机制。最后,定量模拟了“碳中

<sup>\*</sup> 靳玮,天津大学马寅初经济学院,邮政编码:300072,电子信箱:wei.jin@tju.edu.cn;王弟海,复旦大学经济学院,邮政编码:200433,电子信箱:wangdihai@fudan.edu.cn;张林,香港城市大学能源与环境学院,电子信箱:l.zhang@cityu.edu.hk。本文系第三届中国能源环境与气候变化经济学论坛入选论文,得到国家社会科学基金一般项目(21BJL036)的资助。作者感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

和”目标下中国经济低碳转型情景的时间路径。研究发现: 碳排放定价、排放效率提升以及资产结构低碳调整是实现“碳中和”目标下经济转型的三个重要机制, 它们对于低碳转型的作用各有差异, 但彼此互补。碳定价通过纠正碳排放外部性成本产生激励信号, 从而控制高碳资产使用和碳排放。但是, 碳定价的经济约束效应会造成资产搁浅等低碳转型代价。排放效率提升通过“干中学”技术进步效应降低排放强度, 从而减缓生产规模扩大造成的碳排放增加以及碳定价的约束效应。资产清洁化调整机制使得低碳资产比例升高, 高碳资产比例降低, 从而减弱经济总量增长带来的碳排放污染, 减缓低碳转型经济代价。上述三种机制的联合协同可以促进“碳中和”目标下经济内生增长, 即在实现净零排放目标的同时, 生产、消费及投资仍持续增长, 碳减排目标约束并不会导致经济增长停滞。形成内生增长的主要原因是碳定价释放碳减排价格信号, 降低高碳资产价值, 提高低碳资产价值, 从而引导排放效率提升和资产结构清洁化调整。同时, 后者又可以抵消碳定价的经济约束效应, 减缓高碳资产搁浅的转型成本, 促进“碳中和”转型的平稳过渡。

本研究与以下三类绿色经济增长文献密切相关: 第一, 早期研究聚焦于不可再生资源的稀缺性对可持续增长的影响机制。这类研究最早可追溯至 Hotelling(1931) 不可再生资源最优利用的工作。该框架随后被拓展为 Dasgupta-Heal 模型( Dasgupta & Heal, 1979; Peretto, 2009)。第二, 随着化石能源使用导致的环境问题不断恶化, 环境污染与经济联系开始得到学界重视。Selden & Song(1995)、Stokey(1998) 对经济增长与环境质量的关系提供了理论解释。第三, 随着碳减排和气候变化问题的出现, 采用绿色增长视角研究碳减排路径及成本问题已成为学界关注重点。Nordhaus(1993) 定量评估了实现气候变化减缓目标所需的调控政策及其损益。后续文献进一步考察了低碳转型和绿色增长的新机制, 如能源结构调整( van der Ploeg & Withagen, 2014)、偏向性绿色技术变化( Acemoglu et al., 2012)、碳排放边际外部损害和碳定价( Golosov et al., 2012)、低碳转型的路径依赖( Acemoglu et al., 2016)、扭曲财政政策背景下的碳税设定( Barrage, 2020)、考虑气候经济风险的碳排放社会成本( Cai & Lontzek, 2019) 等。

国内学者近年来也陆续开展了大量有关低碳转型和绿色增长的研究工作。第一, 多数研究采用实证计量方法检验绿色低碳发展的显著影响因素, 如能源产业结构调整( 沈小波等, 2021)、绿色技术进步( 刘金科和肖翊阳, 2022)、环境规制政策( 李青原和肖泽华, 2020)、政府环境目标( 余壮雄等, 2020; 余泳泽等, 2020)、对外贸易( 陈登科, 2020)、森林碳汇溢出效应( 杜之利等, 2021)。第二, 不少文献基于方向性距离函数框架系统测度了中国各地区或产业绿色全要素生产率以及绿色可持续发展绩效的变化趋势与驱动因素( 宋马林和刘贯春, 2021; 张宁, 2022; 涂正革等, 2022)。第三, 部分文献通过综合评估模型定量模拟了碳减排政策的减排路径以及成本收益等( 莫建雷等, 2018)。第四, 针对经济绿色增长理论机制的研究成果为数不多。陈素梅和何凌云( 2017)、范庆泉( 2018) 侧重于分析环境税、污染、健康以及收入分配之间的作用机制。

国内已有文献多从实证角度考察低碳转型和绿色发展的影响因素, 鲜有针对“碳中和”背景下中国经济低碳转型机制的理论分析。国外文献虽然提供了分析资源环境约束下经济增长可持续性的一般性原理, 但仍缺少“碳中和”特定背景下中国经济转型路径研究的独特性。本文的边际贡献在于构建绿色经济增长模型来考察碳定价、排放效率提升以及资产结构调整对低碳转型的作用机制。本文的另一个差异化贡献在于对“碳中和”背景下中国经济低碳转型时间路径进行了数值模拟, 旨在从实证检验、理论分析、定量模拟三个层面考察“碳中和”背景下经济转型的实现机制。

本文的结构安排如下: 第二节归纳了低碳经济转型的典型特征事实; 第三节构建了理论模型框架; 第四节分析了“碳中和”转型的理论机制; 第五节提供了低碳转型路径的数值模拟; 最后是本文的总结及建议。

## 二、特征事实及经验证据

### (一) 特征事实

世界各国低碳转型历程具有如下特征事实: 第一, 低碳转型需要碳定价机制纠正碳排放污染外部成本。截至 2018 年, 已有 42 个国家(地区) 和 25 个地方管辖区通过碳排放交易或碳税制度实施碳排放定价。目前世界各国碳排放平均价格远低于符合《巴黎协定》温控目标所需的碳定价水平 (World Bank, 2019)。这意味着要实现“碳中和”目标需要大幅提高当前碳定价水平, 提升减排贡献力度。第二, 低碳转型伴随着碳排放效率提升和碳排放强度降低。图 1 显示主要国家及地区的碳排放强度在近十年间保持递减趋势(IEA, 2021a)。图 2 显示中国碳排放强度随 GDP 增加而递减。这主要归因于技术进步效应带来碳排放效率提升, 排放强度降低对于实现“碳中和”目标也具有关键作用。第三, 低碳转型伴随着能源及产业结构的清洁化调整。图 3 显示实现“碳中和”目标需使化石燃料占比到 2050 年下降至 20%, 清洁能源占比到 2050 年大幅提高至 68% (IEA, 2021b)。图 4 显示中国产业结构的低碳化转型趋势。绿色低碳行业产值占比呈逐年递增趋势, 而碳密集型行业产值占比则逐年递减。绿色产业发展和经济结构低碳化调整有助于控制碳排放增长和实现“碳中和”转型目标。

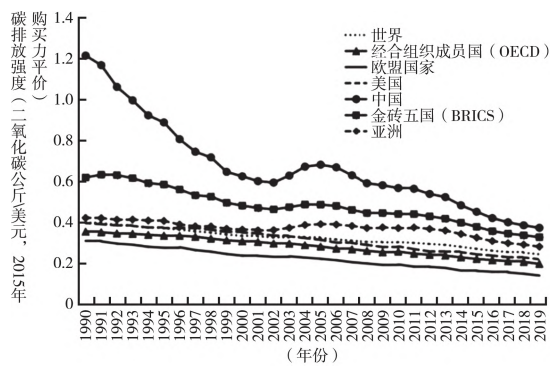


图 1 主要国家及地区的碳排放强度随时间变化趋势

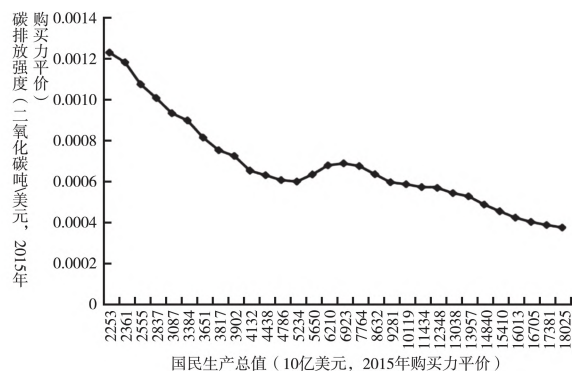


图 2 中国碳排放强度随生产总值的变化趋势

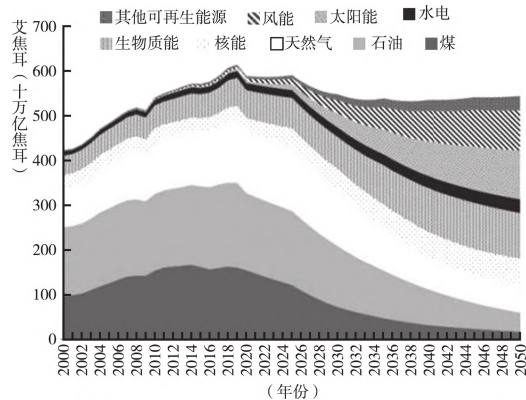


图 3 世界能源供应结构比例的变化趋势

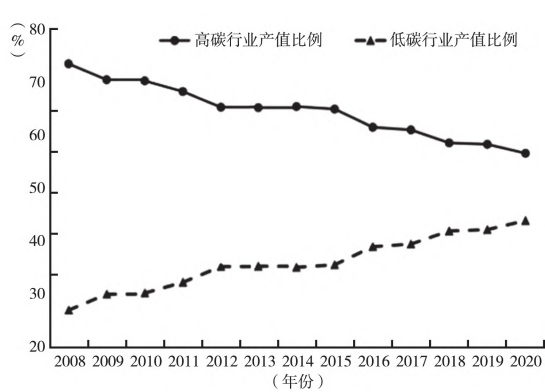


图 4 中国高碳与低碳行业产值比例的变化趋势

### (二) 经验证据

本节从中国碳排放数据库搜集了 30 个省、自治区和直辖市的碳排放数据 (Guan et al., 2021), 并与《中国统计年鉴 2021》和《中国能源统计年鉴 2021》公布的宏观经济和能源数据相结合构建中国省级面板数据。特建立以下固定效应模型:

$$\ln EM_{it} = \alpha + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 EI_{it} + \beta_3 \ln(1 + GP_{it}) + \beta_4 ECR_{it} + \beta_5 SR_{it} + \delta_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中  $\delta_i$  和  $\gamma_t$  分别表示省份固定效应和时间固定效应,  $\varepsilon_{it}$  为误差项。(1) 式左边的因变量为省份  $i$  时间  $t$  的碳排放量 ( $EM$ )。(1) 式右边自变量设定如下: 第一, 哑变量 ( $CP\_dummy$ ) 表征不同省份是否存在碳定价制度,  $\beta$  个碳市场试点省市设定为 1, 其他省份设定为 0。从万德数据库获取碳市场试点省份的碳交易价格, 并计算出年平均值 ( $CP\_average$ ) 和最高值 ( $CP\_maximum$ ), 作为碳定价的另外两个衡量指标。第二, 选取能源强度 ( $EI$ ) 和绿色技术专利 ( $GP$ ) 作为衡量碳排放效率的变量。中国能源结构以化石能源为主, 能源强度越高意味着碳排放强度越高、碳排放效率越低。采用绿色专利数作为绿色技术的衡量指标。绿色专利越多意味着低碳化技术水平越高, 排放效率也越高。第三, 选取电煤比 ( $ECR$ ) 和第三产业比重 ( $SR$ ) 表示能源结构和经济产业结构。采用电煤比来体现样本期内能源结构变化。用电通常比用煤更加清洁, 故电煤比程度升高可反映该地区能源使用清洁化趋势。同时, 碳密集型行业主要包括能源、制造和建筑等工业部门, 以及农业、畜牧业、森林砍伐和林地转化, 这些部门贡献了近 90% 的碳排放 (IPCC, 2021)。据此, 工业和农业可较大程度代表高碳部门, 而第三产业服务业近似代表清洁部门, 第三产业增加值占 GDP 比重近似反映了产业结构的清洁低碳化程度。表 1 列出了回归方程 (1) 式中各变量的描述性统计。

表 1 变量的描述性统计

变量符号	变量含义	观测样本	均值	标准偏差	最小值	最大值
$EM$	碳排放量(万吨)	600	273.653	251.149	0.81	1700.040
$CP\_dummy$	碳定价虚拟变量	600	0.070	0.255	0	1
$CP\_maximum$	碳定价最高值(元/吨)	600	2.755	11.137	0	87.480
$CP\_average$	碳定价平均值(元/吨)	600	2.030	8.552	0	78.756
$EI$	能源强度(吨/万元)	600	9.534	0.542	8.294	10.873
$GP$	绿色技术专利(件)	600	1963	4215	1	32269
$ECR$	电煤比(%)	600	0.165	0.328	0.035	6.381
$SR$	第三产业占比(%)	600	0.451	0.089	0.296	0.837

表 2 第 (1) 列是采用碳市场哑变量表征碳定价的回归结果。碳市场哑变量的回归系数显著为负, 表明实施碳排放定价机制能够显著降低该地区碳排放量。能源强度的回归系数显著为正, 说明能源强度越高, 能源使用和碳排放效率越低, 碳排放水平也将越高。绿色专利的回归系数显著为负, 表明绿色技术进步带来的排放效率提升能够显著减少碳排放。电煤比的估计系数显著为负, 说明一个地区电相对煤的使用程度越高, 该地区碳排放量越少。电气化是促进能源结构低碳化转型的关键。第三产业占 GDP 比重的回归系数也显著为负, 表明服务业占比越高, 产业结构清洁化水平越高, 碳排放水平越低。产业结构清洁化调整能产生削减碳排放的作用。表 2 中第 (2) 列和第 (3) 列分别采用该地区当年最高碳交易价格和平均碳交易价格作为碳定价指标。结果显示不管是采用碳市场最高价格还是平均价格, 碳定价回归系数均显著为负, 与第 (1) 列中采用碳市场哑变量得到的回归结果保持一致。其他变量的回归系数方向也与第 (1) 列结果相同。碳定价、排放效率提升以及结构清洁调整显著降低碳排放的结果稳健。基于中国省级面板数据得到的经验证据证实了低碳经济转型的典型事实。

表2 回归方程(1)的计量结果

	(1)	(2)	(3)
<i>CP_dummy</i>	-0.174 <sup>***</sup> (0.0491)		
$\ln(1 + CP\_maximum)$		-0.0411 <sup>***</sup> (0.0144)	
$\ln(1 + CP\_average)$			-0.0493 <sup>***</sup> (0.0158)
<i>EI</i>	1.352 <sup>***</sup> (0.232)	1.373 <sup>***</sup> (0.231)	1.373 <sup>***</sup> (0.230)
$\ln(1 + GP)$	-0.112 <sup>*</sup> (0.0635)	-0.109 <sup>*</sup> (0.0636)	-0.110 <sup>*</sup> (0.0637)
<i>ECR</i>	-0.149 <sup>**</sup> (0.0594)	-0.150 <sup>**</sup> (0.0607)	-0.145 <sup>**</sup> (0.0605)
<i>SR</i>	-1.472 <sup>**</sup> (0.630)	-1.517 <sup>**</sup> (0.630)	-1.499 <sup>**</sup> (0.630)
常数项	-6.296 <sup>***</sup> (1.936)	-6.493 <sup>***</sup> (1.929)	-6.499 <sup>***</sup> (1.915)
样本量	600	600	600
R <sup>2</sup>	0.903	0.903	0.903

注: \*\*\*、\*\*、\* 分别表示系数在 1%、5% 和 10% 的水平上显著; 括号内为稳健标准误; 以下各表同。本表结果控制了省份和时间固定效应。

基于中国省级面板数据, 本节进一步测算了碳排放强度相对于 GDP 的弹性变化系数。这既为第三节模型刻画碳排放强度提供实证依据, 又为第五节数值模拟提供碳排放强度弹性系数的参数估计值。如表 3 所示, 第(1)列和第(2)列自变量选取的是当期 GDP, 第(3)列中自变量选取的则是滞后一期 GDP。第(1)列未控制省份和时间固定效应, 第(2)列和第(3)列控制了省份和时间固定效应。回归结果显示: 我国碳排放强度相对于 GDP 的弹性系数数值约在 -0.7—-0.6 范围, 即国内生产总值每增长 1%, 碳排放强度约下降 0.6%—0.7%。

表3 碳排放强度(CO2Int)相对于生产总值(GDP)的弹性系数

	(1) $\ln(CO2Int)$	(2) $\ln(CO2Int)$	(3) $\ln(CO2Int)$
$\ln(GDP)$	-0.321 <sup>***</sup> (0.0373)	-0.667 <sup>***</sup> (0.204)	
L. $\ln(GDP)$			-0.687 <sup>***</sup> (0.207)
常数项	8.487 <sup>***</sup> (0.338)	11.52 <sup>***</sup> (1.781)	11.662 <sup>***</sup> (1.798)

续表 3

	(1) ln(CO2Int)	(2) ln(CO2Int)	(3) ln(CO2Int)
样本量	600	600	570
R <sup>2</sup>	0.203	0.776	0.818
省份固定效应	No	Yes	Yes
时间固定效应	No	Yes	Yes

注:  $L$  表示滞后一期变量。

### 三、理论模型

#### (一) 绿色增长模型框架

本文构建了一个绿色增长模型分析低碳转型机制,该模型建立在社会最优经济分析框架下,能更好反映碳排放污染的社会福利影响,即碳排放社会成本。根据 Acemoglu et al. (2012)、van der Ploeg & Withagen (2014) 代表性家庭效用取决于消费和环境质量,效用函数采用如下形式:

$$V(C(t), S(t)) = U(C(t)) - D(S(t)) = \ln(C(t)) - 0.5\chi S(t)^2 \quad (2)$$

其中  $t$  表示时间,  $C$  表示消费,  $S$  表示碳累积存量。效用函数为对数形式,边际效用随消费递减。环境污染损害表示为碳排放累积存量的二次凸函数,其中  $\chi$  表示碳排放边际污染损害系数,边际污染损害  $D(S)$  随碳排放存量  $S$  增加而递增。生产函数为如下形式:

$$Y(t) = F(K_D(t), K_C(t)) = AK_D(t)^\alpha K_C(t)^{1-\alpha} \quad (3)$$

其中  $Y$ 、 $K_D$  和  $K_C$  分别表示总产出、高碳资产和低碳资产。 $A$  表示生产率,  $\alpha$  表示柯布-道格拉斯生产函数权重系数。高碳资产和低碳资产具有不完全可替代性质。

沿用 van den Bijgaart et al. (2016)、Dietz & Venmans (2019) 的刻画方式,本文将碳排放存量  $S$  的动态变化过程表示为如下形式:

$$\dot{S}(t) = E(t) - \sigma S(t) \quad (4)$$

其中  $E$  表示碳排放量,  $\sigma$  表示碳汇吸收率。碳累积存量变化取决于碳排放和碳吸收。当低碳转型发展到某一阶段使得碳排放和碳吸收平衡时,则达到净零排放的“碳中和”状态。考虑碳排放量与高碳资产使用量成正比例关系,可以刻画为如下形式:

$$E(t) = m(t) K_D(t) \quad (5)$$

本文引入 Arrow (1962) “干中学”技术进步刻画效率提升带来的碳排放强度下降 (Manne & Richels, 2004), 假设碳排放强度  $m$  为如下形式:

$$m(t) = \psi Y(t)^{-\mu} \quad (6)$$

(6) 式表示碳排放强度  $m$  与生产规模  $Y$  成反比,即生产规模扩大产生“干中学”效应,提升排放效率并降低排放强度。 $\psi$  表示碳排放强度系数,  $\mu$  表示碳排放强度  $m$  相对于产出  $Y$  的弹性变化系数。将(3)式和(6)式代入(5)式得到的碳排放函数为:

$$E(t) = P(K_D(t), K_C(t)) = \psi A^{-\mu} K_C(t)^{1-\mu} (K_D(t)/K_C(t))^{1-\alpha\mu} \quad (7)$$

(7) 式对于变量  $K_D$  和  $K_C$  具有  $1-\mu$  次齐次性。当两类资产以相同速度积累时,如果  $\mu < 1$  则碳排放量增加; 如果  $\mu = 1$  则碳排放量不变; 如果  $\mu > 1$  则碳排放量下降。

高碳资产和低碳资产随时间动态积累,其变化过程表示为如下微分方程形式:

$$\dot{K}_D(t) = I_D(t) - R(t) - \delta K_D(t) \quad (8)$$

$$\dot{K}_C(t) = I_C(t) - 0.5\varphi I_C(t)^2/K_C(t) + R(t) - 0.5\kappa R(t)^2/K_C(t) - \delta K_C(t) \quad (9)$$

其中  $I_D$  和  $I_C$  分别表示高碳和低碳资产投资。投资存在跨期调整成本  $\varphi$  表示跨期调整成本系数。同时,高碳和低碳资产可以相互转换,  $R$  表示从高碳到清洁部门的转移资产,  $\kappa$  为跨部门资产调整成本系数。单位高碳资产转移到清洁部门将累积形成小于一个单位的低碳资产,且调整成本随调整规模而增加。 $\delta$  表示资产折旧率。

“碳中和”背景下经济低碳转型机制的分析框架可以描述为如下动态优化问题:即给定(4)式、(8)式、(9)式、市场出清条件  $Y = C + I_D + I_C$  以及初始条件  $[K_D(0), K_C(0), S(0)]$ ,通过最优选择  $[C(t), I_C(t), R(t)]$  的时间路径,最大化跨期折现效用,即:

$$\max_{[C(t), I_C(t), R(t)]_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} (\ln C(t) - 0.5\chi S(t)^2) dt \quad (10)$$

其中  $\rho$  表示时间贴现率。 $C, I_C$  和  $R$  为控制变量,  $K_D, K_C$  和  $S$  为状态变量。

### (二) 增长路径特征表达式

通过求解上述动态优化问题可得:

$$C = \lambda_D^{-1} \quad I_C = \varphi^{-1} (1 - \lambda_D/\lambda_C) K_C \quad R = \kappa^{-1} (1 - \lambda_D/\lambda_C) K_C \quad (11)$$

其中  $\lambda_D$  和  $\lambda_C$  为(8)式和(9)式的汉密尔顿乘子,表示高碳资产和低碳资产的影子价格。当跨期资产调整成本系数  $\varphi$  越小且高碳与低碳资产价格比率  $\lambda_D/\lambda_C$  越小时,则低碳资产投资  $I_C$  越大。当跨部门资产调整成本系数  $\kappa$  越小且资产价格比率  $\lambda_D/\lambda_C$  越小时,则资产转移  $R$  也越多。求解优化问题可以得到资产价格的动态方程:

$$(\rho + \delta) \lambda_D - \dot{\lambda}_D = \lambda_S P_{K_D} + \lambda_D F_{K_D} \quad (12)$$

$$(\rho + \delta) \lambda_C - \dot{\lambda}_C = \lambda_S P_{K_C} + \lambda_D (F_{K_C} + (0.5\varphi(I_C/K_C)^2 + 0.5\kappa(R/K_C)^2) (1 - \varphi I_C/K_C)^{-1}) \quad (13)$$

$$(\rho + \sigma) \lambda_S - \dot{\lambda}_S = -\chi S \quad (14)$$

其中  $\lambda_S$  为(4)式对应的汉密尔顿乘子,表示碳排放影子价格,等于碳排放边际污染损害的跨期折现值,故碳排放存量的影子价格为负值。当内生化碳排放社会成本推进低碳经济转型时,高碳投资的边际收益将递减,而低碳投资的边际收益将递增,低碳资产积累将产生更大的边际社会效益,即  $\lambda_C > \lambda_D$ 。

## 四、机制分析

本节旨在分析碳定价、排放效率提升及资产结构清洁化调整三种机制对低碳经济转型的影响效果。分析的独特之处在于考察三种机制如何影响碳排放、碳存量、资产以及产出的转型动态过程,而不仅仅是远期稳态。为了能得到易于处理的解析结果,考虑高碳资产  $K_D$  和碳累积存量  $S$  两个状态变量的动态变化,而低碳资产则处理为外生变量,即设定  $K_C(t) = K_C^*$ 。通过改变  $K_C^*$  的值产生高碳-低碳资产比率的内生变化,进而表征资产结构清洁化调整。据此,绿色增长路径可以由  $[K_D, S, \lambda_D, \lambda_S]$  的微分方程组来表示,在稳态  $[K_D^*, S^*, \lambda_D^*, \lambda_S^*]$  附近线性展开可以得到稳定鞍形增长路径下高碳资产和碳累积存量时间路径的解析表示式:<sup>①</sup>

$$K_D(t) = K_D(0) e^{-|\xi|t} + K_D^* (1 - e^{-|\xi|t}) = K_D(0) e^{-|\xi|t} + K_C^* k^* (1 - e^{-|\xi|t}) \quad (15)$$

$$S(t) = S(0) e^{-|\xi|t} + S^* (1 - e^{-|\xi|t}) = S(0) e^{-|\xi|t} + \sigma^{-1} \psi A^{-\mu} K_C^{*1-\mu} (k^*)^{1-\alpha\mu} (1 - e^{-|\xi|t}) \quad (16)$$

其中,高碳资产和碳累积存量从初始状态  $[K_D(0), S(0)]$  开始,随时间递增并收敛于远期稳态

① 篇幅所限,稳定鞍形增长路径的推导过程略,如需要可向作者索取。

$[K_D^*, S^*]$ 。整合稳态条件并进一步化简得到:

$$A\alpha(k^*)^{\alpha-1} - (\psi A^{-\mu} K_C^{1-\mu})^2 (1 - \alpha\mu) \chi \sigma^{-1} (\rho + \sigma)^{-1} (k^*)^{2(1-\alpha\mu)} (A(k^*)^{\alpha-1} - \delta) = \rho + \delta \quad (17)$$

$k^* = K_D^*/K_C^*$  表示高碳-低碳资产比例的稳态值。可以证明存在稳态  $k^*$  使得(17)式左边等于右边常数  $\rho + \delta$ 。此外, 动态转型路径收敛速度取决于如下特征值:

$$\xi = 0.5\rho - \sqrt{(0.5\rho)^2 - 0.5\Omega + 0.5\sqrt{\Omega^2 - 4detJ}} \quad (18)$$

其中  $detJ$  表示动态方程的  $4 \times 4$  雅可比矩阵  $J$  行列式,  $\Omega$  表示雅可比矩阵  $J$  的二阶主子式之和。可以证明  $detJ < 0$  和  $\xi < 0$ ,<sup>①</sup> 负特征值说明转型动态过程存在稳定鞍型路径, 动力系统将沿着该稳定鞍型路径从初始状态收敛至远期稳态。据此, 我们可以逐一分析碳排放定价、排放效率提升以及资产结构调整对低碳转型动态路径的效应。

### (一) 碳排放定价

如典型特征事实所示, 推动低碳转型的关键是释放碳排放成本价格信号。在本文框架下, 碳定价基准取决于碳排放社会成本, 等于碳排放边际污染损害的跨期折现值, 而边际污染损害的影响因素就是边际污染损害系数。该系数越大表明单位碳排放的社会成本越大, 内生化碳排放社会成本所需的碳定价水平越高。本小节通过考察边际碳排放污染损害系数变化, 分析碳定价对低碳转型的效果。命题 1 给出了碳排放定价对低碳转型动态路径的影响效果。<sup>②</sup>

命题 1: 碳定价通过内生化碳排放社会成本削减转型动态路径上的碳排放和碳累积存量, 有助于实现净零排放的“碳中和”目标。但是, 碳定价产生的经济约束会造成资产搁浅和产量缩减的转型代价。

### (二) 排放效率提升

排放效率提升对于控制碳排放和“碳中和”目标实现很关键。本文基于“干中学”技术进步效应刻画排放效率提升和排放强度下降。碳排放强度的弹性变化系数  $\mu$  越大, 意味着技术进步效应越显著, 排放强度下降幅度越大。本小节通过考察  $\mu$  值变化来分析排放效率提升对低碳转型的效应。命题 2 给出了排放效率提升对低碳转型路径的影响。<sup>③</sup>

命题 2: 排放效率提升通过降低碳排放强度削减转型动态路径上的碳排放和碳累积存量水平, 有助于实现净零碳排放的“碳中和”目标。排放效率提升也有助于减轻碳定价造成的资产搁浅和产量缩减的转型代价。

### (三) 资产结构调整

资产结构清洁化调整旨在降低高碳资产比例, 减弱总量规模扩张所产生的碳排放。如(17)式所示, 改变低碳资产存量  $K_C$  将使得高碳-低碳资产比率  $k = K_D/K_C$  发生改变, 该比率降低说明资产结构清洁化调整。命题 3 给出了资产结构清洁化调整对低碳转型路径的影响。<sup>④</sup>

命题 3: 资产结构清洁化调整通过降低高碳资产与低碳资产比率, 削减转型动态路径上的碳排放和碳累积存量水平, 有助于实现净零碳排放的“碳中和”目标。资产结构清洁化调整也有助于减轻碳定价所造成的转型代价。

① 篇幅所限, 具体推导过程略, 如需要可向作者索取。

② 篇幅所限, 命题 1 证明过程略, 如需要可向作者索取。分散市场经济条件下采用碳税作为碳排放定价规制措施的分析过程略, 如需要可向作者索取。

③ 篇幅所限, 命题 2 证明过程略, 如需要可向作者索取。

④ 篇幅所限, 命题 3 证明过程略, 如需要可向作者索取。



(四) 动力学相图分析

如图5所示,碳定价使得高碳资产的转型动态路径由实线左移至线状虚线,即 $K_D' \rightarrow K_D''$ ,说明碳定价将削减高碳资产存量。排放效率提升使得转型动态路径从线状虚线右移至点状虚线,即 $K_D'' \rightarrow K_D'''$ ,说明排放效率提升可以减缓碳定价约束效应并避免资产搁浅。资产结构清洁调整使得转型动态路径从点状虚线右移至点线状虚线,即 $K_D''' \rightarrow K_D''''$ ,说明资产结构调整能够避免资产搁浅。如图6所示,碳定价使得碳累积存量的转型动态路径由实线左移至线形虚线,即 $S' \rightarrow S''$ ,说明碳定价能够削减碳排放存量。排放效率提升使得转型动态路径从线状虚线左移至点状虚线,即 $S'' \rightarrow S'''$ ,说明效率提升能进一步削减碳累积存量。资产结构清洁化调整使得转型动态路径左移至点线状虚线,即 $S''' \rightarrow S''''$ ,说明资产结构清洁调整进一步削减碳排放存量。

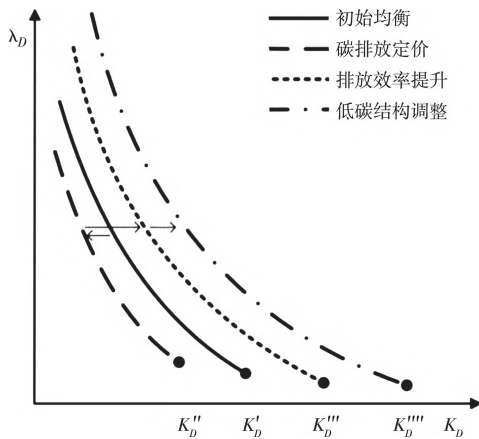


图5 高碳资产和影子价格的过渡动态相图

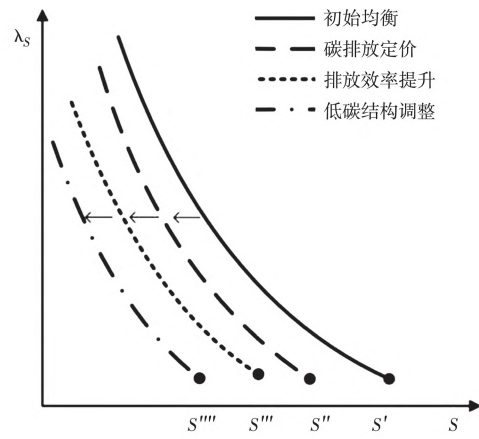


图6 碳累积存量和影子价格的过渡动态相图

五、数值模拟

(一) 模型参数设定

在理论机制分析基础上,本节定量模拟中国经济低碳转型情景的时间路径和演变趋势。数值模拟基于增长路径特征表达式(8) — (14),低碳转型时间路径的特征表达式刻画了高碳资产、低碳资产、碳排放存量、高碳资产价格、低碳资产价格以及碳排放影子价格的动态变化过程。

表4 模型参数设定

参数含义	参数符号	参数数值
时间偏好率系数	$\rho$	0.02
碳汇吸收率系数	$\sigma$	0.045
碳排放边际污染损害系数	$\chi$	$1.2 \times 10^{-4}$
柯布-道格拉斯生产函数系数	$\alpha$	0.6
资本生产率系数	$A$	0.7
资产折旧率系数	$\delta$	0.04
跨部门资产转移成本系数	$\kappa$	9
跨期投资调整成本系数	$\varphi$	9
碳排放强度弹性系数	$\mu$	0.6
碳排放强度系数	$\psi$	3

表4给出了数值模拟设定的参数值。Gollier & Hammitt(2014)指出,虽然选择何种贴现率来折现碳减排政策长期损益存在争议,但已有文献普遍采用1%—4%的贴现率。本文设置时间偏好系数为 $\rho = 0.02$ 。对于碳汇吸收率,我国陆地生态系统年均固碳约为12亿—15亿吨/年(王兵等,2021)。碳捕集封存技术可提供的人工碳汇减排潜力到2060年预计达到35亿—40亿吨/年(蔡博峰等2021),故碳汇总吸收量约为55亿吨/年。全球变暖限制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 所对应的剩余碳预算约为4800亿吨二氧化碳(IPCC,2021),中国目前占全球碳排放比例约为25%(IEA,2021b),故中国剩余碳预算约为 $4800 \times 25\% = 1200$ 亿吨,碳汇吸收率设定为 $\sigma = 55/1200 = 0.045$ 。

碳定价修正的碳排放社会成本等于碳排放影子价格除以消费边际效用,即 $\tau = \lambda_s / U'(C) = C\lambda_s$ ,其中碳排放影子价格的远期均衡水平等于 $\lambda_s = \chi S / (\rho + \sigma)$ 。故碳排放边际损害系数的估算式为: $\chi = \tau(\rho + \sigma) / (CS)$ 。修正碳排放外部性的最优碳定价水平应随时间指数递增。中国目前碳价格约为8美元/吨,按照年增长率6%,2060年碳价水平约为80美元/吨,即 $\tau = 80$ 美元/吨。预测中国到2060年GDP将达到约62万亿美元,其中消费支出占GDP比重预计为70%(OECD,2021),故消费将达到 $62 \times 70\% = 34$ 万亿美元。边际污染损害系数估算为: $\chi = \tau(\rho + \sigma) / (CS) = 80 \times (0.02 + 0.045) / (1200 \times 34) = 1.2 \times 10^{-4} / (\text{亿吨二氧化碳})^2$ 。

对于生产函数 $Y = F(K_D, K_C) = AK_D^\alpha K_C^{1-\alpha}$ ,GDP衡量总产出,高碳部门和低碳部门资产分别衡量高碳和低碳资产投入,进而估算生产函数权重系数 $\alpha$ 。根据中国碳核算数据库中国经济分行业碳排放核算清单,以各行业碳排放强度中位数划分高碳和低碳部门。<sup>①</sup>基于该行业分类,从《中国统计年鉴》收集高碳和低碳部门大类下各行业产值和资产数据,加总得到高碳和低碳部门产值和资产,计算高碳和低碳部门产值占GDP比重近十年的平均值约为62%。将生产函数权重系数设为 $\alpha = 0.6$ ,得到全要素生产率约为 $A = Y / (K_D^\alpha K_C^{1-\alpha}) = 0.7$ 。基于PWT 9.1数据库(Feenstra,2015),中国1952—2017年间资产折旧率约为0.039,将资产折旧率系数设为 $\delta = 0.04$ 。跨时间和跨部门资产调整成本系数分别设为 $\varphi = 9$ 和 $\kappa = 9$ 。根据表3的估算结果,将碳排放弹性系数设定为 $\mu = 0.6$ ,碳排放强度系数设定为 $\psi = 3$ ,以使得“碳中和”情景路径模拟结果与2060年中国碳累积存量1200亿—1500亿吨范围( $1.5^{\circ}\text{C}$ 温控目标所要求的剩余碳预算)保持基本一致。

## (二) 模拟情景设置

本文采用情景分析展示中国经济低碳转型时间路径的数值模拟结果。情景设置主要参考《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》设置的四种情景(解振华等2020):自主贡献政策情景、强化政策情景、 $2^{\circ}\text{C}$ 温控目标情景、 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温控目标情景。同时也参考了《2021年世界能源展望》报告的四种种情景(IEA,2021c):既定政策基准情景、自主贡献承诺目标情景、可持续发展情景、净零排放情景。据此,本文数值模拟设定了以下四种情景:(1)基准增长情景:反映了既定减排措施影响下经济增长的未来趋势。(2)自主贡献情景:国家自主减排贡献目标倒逼下的低碳转型趋势。自主贡献目标包括碳排放达峰、碳排放强度大幅下降、低碳清洁能源占比大幅增加等。(3)永续发展情景:考虑与《巴黎协定》 $2^{\circ}\text{C}$ 温控目标相适应的可持续发展目标倒逼形成的低碳转型趋势。在净零碳排放目标路径(与 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温控目标相适应)基础上,根据碳累积存量和升温目标呈线性关系(Dietz & Venmans,2019),计算 $2^{\circ}\text{C}$ 温控目标下的碳排放路径。(4)净零碳排放情景:净零碳排放情景与 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温控目标相适应,以中国2060年左右实现净零碳排放为目标倒逼低碳转型路径。通过

<sup>①</sup> 高碳排放行业主要包括农林牧渔业(行业代码A)、采矿业(代码B)、制造业(代码C13—C36)、电力热力燃气及水生产和供应业(代码D)、建筑业(代码E)、批发零售业(代码F)、交通运输仓储和邮政业(代码G)。其余行业为低碳部门。该分类结果与IPCC(2021)评估报告主要结论保持一致,即高碳行业主要包括电力生产、采矿冶金、制造和建筑等工业部门,以及农业、畜牧业、森林砍伐和林地转化,这些部门共同贡献了近90%的碳排放。

调整碳排放污染损害系数来改变碳定价水平,形成低碳转型四种情景的演变趋势。基准情景与自主贡献情景的差距反映了国家自主减排承诺对低碳转型的影响。自主贡献情景与净零排放情景的差距反映了以 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温控目标为导向,到2060年实现净零碳排放“碳中和”目标对中国经济转型的影响。

### (三) 模拟结果分析

数值模拟的时间跨度为60年(2000—2060年)。模拟结果按顺序展示了以下三部分内容:第一部分(图7)展示了低碳经济转型中关键经济指标(资产、产出以及消费)的时间路径。第二部分(图8)展示了低碳转型中关键环境指标(碳排放量、碳累积存量)的时间路径。第三部分(图9)聚焦于低碳转型的驱动机制,即碳定价水平、碳排放强度,以及资产结构清洁化调整的高碳—低碳资产比率。

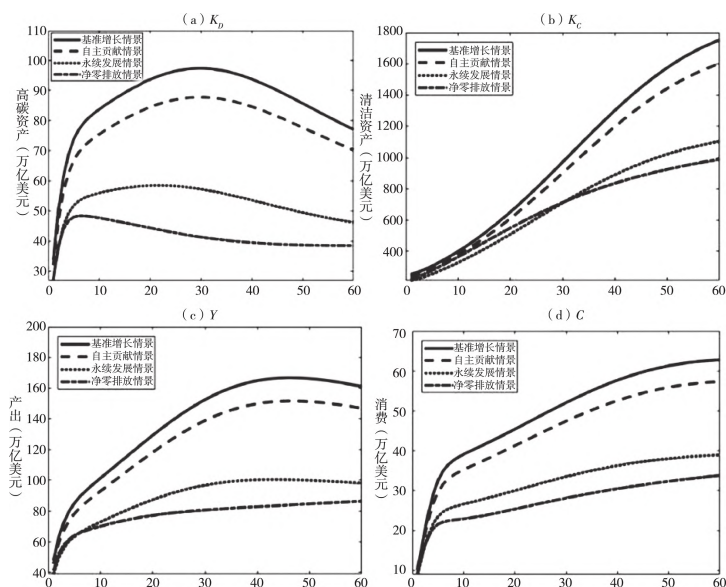


图7 低碳转型情景下高碳资产、低碳资产、产出及消费的时间路径

图7展示了低碳转型情景下关键经济指标的时间路径。图7(a)显示高碳资产在短期向上调整之后,逐渐降低并趋于远期均衡水平。形成高碳资产先增后降趋势的主要原因在于高碳资产投资造成的碳排放污染社会成本在短期内尚未显现,仍需要积累高碳资产来推动经济增长。但随着碳排放社会成本的经济约束效应不断显现,低碳转型需要大幅削减高碳资产。图7(b)显示低碳资产在低碳转型过程中上升,资产结构低碳化调整使得低碳资产贡献比例升高,高碳资产贡献比例降低。如图7(c)—(d)所示,生产和消费在低碳转型过程中呈现递增趋势,并逐渐趋于稳态水平。对比图7中各种情景,基准增长情景由于受碳减排约束影响最小,各经济指标增长幅度最大。但在“碳中和”情景下,碳减排约束效应最强,各经济指标增幅最小。

图8展示了低碳转型各种情景下关键环境指标的时间路径。如图8(a)—(c)所示,在低碳转型过程中,碳排放量在短期上升之后大幅下降,碳汇吸收量将随时间不断增加,这使得净排放量(碳排放量减去碳汇吸收量)呈现先增后减的倒“U”型变化。如图8(d)随着低碳转型大幅削减高碳资产并积累低碳资产,碳累积存量积累速度逐渐放缓,并最终稳定碳排放累积存量水平。对比图8各种情景,在受碳减排约束影响最小的基准情景下,碳排放量、碳累积存量都将保持最高水平。而在“碳中和”净零排放情景下,严格的减排约束目标将大幅削减碳排放水平,并最终达到净零排放的“碳中和”状态。

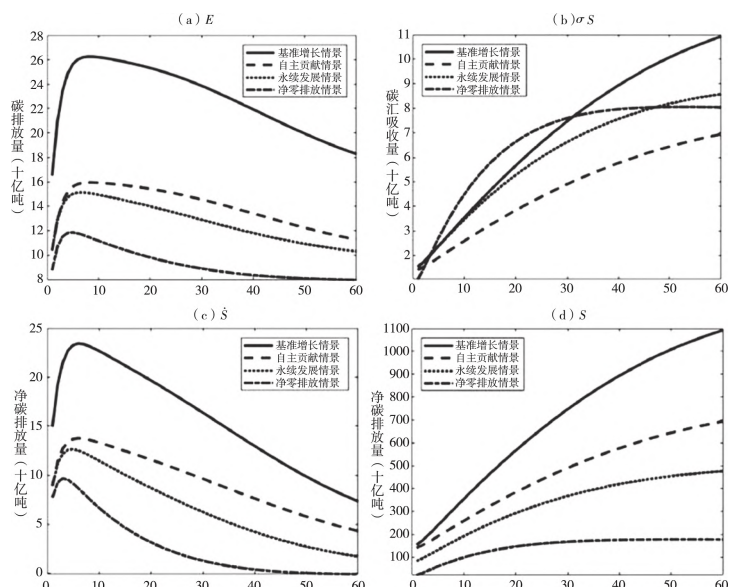


图 8 低碳转型情景下碳排放量、碳汇吸收量、碳净排放量以及碳累积存量的时间路径

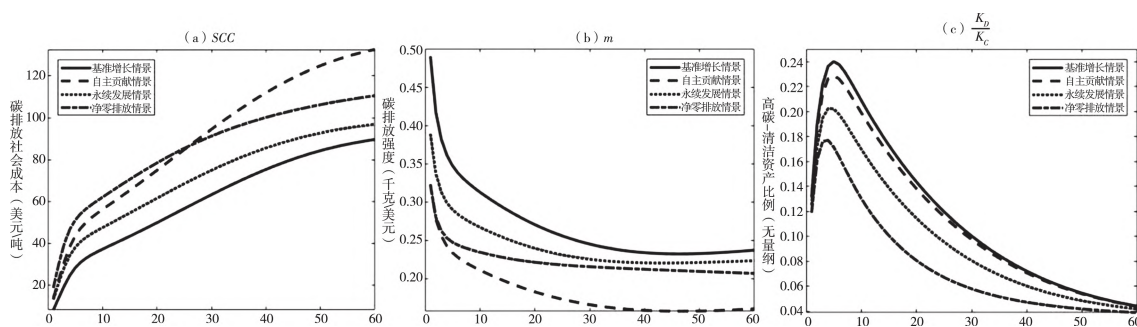


图 9 低碳转型情景下碳排放社会成本、碳排放强度以及高碳-低碳资产比例的时间路径

图 9 展示了本研究聚焦的驱动经济低碳转型的三个关键机制: 碳排放定价、排放效率提升以及资产结构低碳化调整。第一, 图 9 (a) 显示纠正碳排放外部性成本所需的碳定价水平不断升高, 碳排放价格上升信号对于推动低碳转型至关重要。第二, 图 9 (b) 显示碳排放强度随时间呈递减趋势, 说明低碳转型需要排放效率提升来降低碳排放强度。第三, 如图 9 (c) 所示, 高碳资产与低碳资产比率总体呈递减趋势, 说明低碳转型需要资产结构的清洁化调整, 即高碳行业投资的贡献比例不断缩小, 低碳行业投资比重将不断增加。四种低碳转型情景的模拟结果都显示出碳定价水平升高、排放强度降低以及资产结构低碳化调整的变化趋势, 该模拟结果与第二节的低碳转型特征事实保持一致。

为了验证命题 1—3, 本节模拟了碳定价、排放效率提升以及资产结构调整对“碳中和”实现路径的边际作用。首先, 通过增大碳排放边际污染损害系数  $\chi$  来表示纠正碳排放外部性成本所需的碳定价水平提高。如图 10 实线所示, 当碳排放边际污染损害系数增加 10% 时, 碳定价需要纠正更大的碳排放边际污染损害, 碳减排约束效应增强将有利于实现“碳中和”目标, 但也会进一步削减资产、产出及消费水平。该结果与命题 1 保持一致。其次, 通过增大碳排放强度弹性系数  $\mu$  来表征技术进步带来更大幅度排放效率提升。如图 10 虚线所示, 当碳排放强度弹性系数增加 10% 时, 排放效率提升将在促进实现“碳中和”目标的同时, 进一步推高资产、产出以及消费水平。该结果说明排放效率提升有助于减轻低碳转型经济成本, 与命题 2 结论保持一致。最后, 通过增大低碳资产存量表示资产结构清



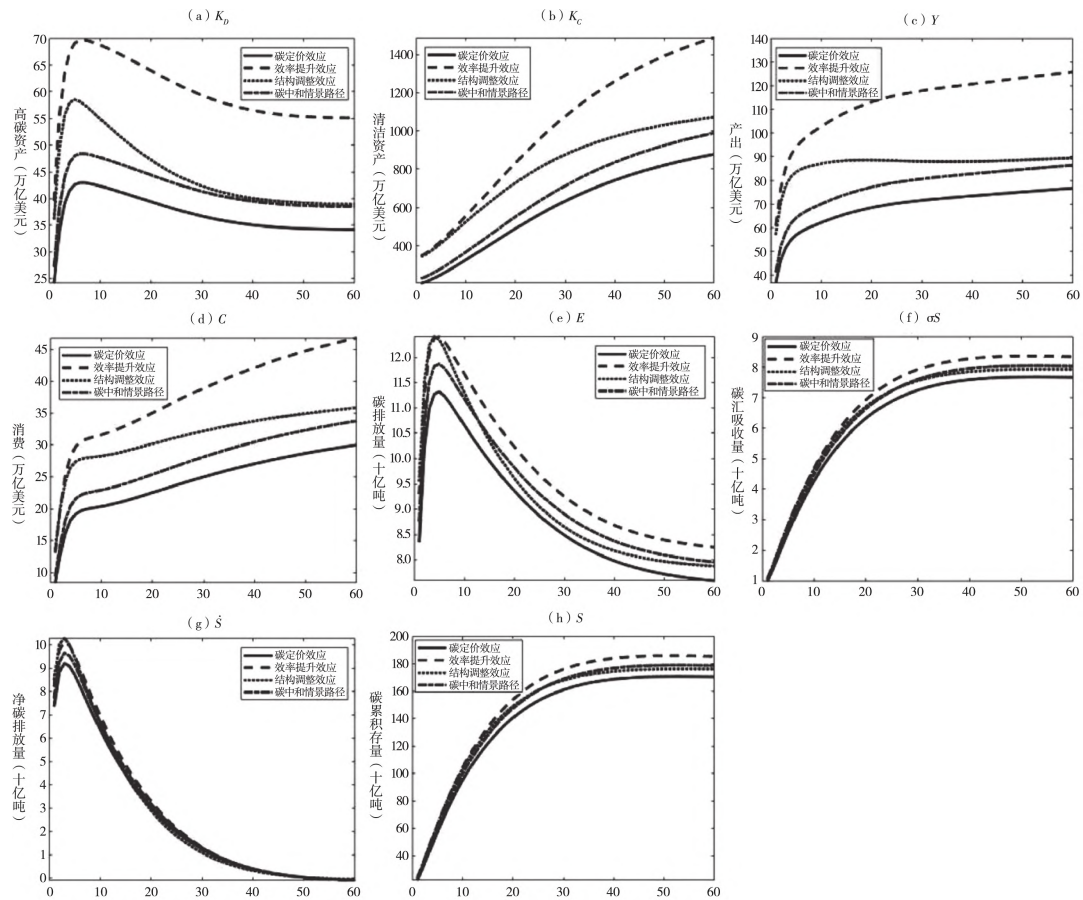


图 10 碳定价、效率提升及结构调整对“碳中和”情景路径下资产、产出、消费、碳排放量、碳汇吸收量、碳净排放量以及碳累积存量的边际影响

洁化调整的作用效果。如图 10 点线所示,当低碳资产存量初始值增加 10% 时,低碳资产将在更大存量基础上进行动态积累和资产结构调整。这将在实现“碳中和”目标路径的同时,进一步推高生产和消费水平。该结果说明资产结构洁化调整有助于减轻低碳转型代价,与命题 3 结果保持一致。

#### (四) 内生经济增长

本节进一步考察“碳中和”目标下内生经济增长,即在达到净零碳排放目标的同时,投资、消费及产出仍持续增长,而不会收敛于稳态,避免陷入增长停滞状态。为此,本节定义如下变量来表征内生增长路径:  $g \equiv K_D/K_D$ ,  $k \equiv K_D/K_C$ ,  $c \equiv C/K_D$ , 其中  $g$  为高碳资产增长率,  $k$  为高碳-低碳资产比率,  $c$  为消费-高碳资产比率。<sup>①</sup> 内生增长路径可以由五个特征表达式描绘,并确定五个内生变量  $[g, k, c, S, \lambda_S]$ , 进而可以求解“碳中和”目标下经济内生增长的时间路径。基于表 1 参数设定值,对“碳中和”目标下内生增长路径进行数值模拟。首先,经济增长在远期将趋于平衡增长路径。高碳资产、低碳资产以及消费将保持相同增长速度,且比率保持不变。求解稳态条件得到:  $g^* = 0.035$ ,  $k^* = 2.7$ ,  $c^* = 0.35$ , 即远期平衡增长阶段的内生经济增长率为 3.5%, 高碳与低碳资产比率为 2.7, 消费与高碳资产比率为 0.35。

图 11(a) 展示高碳与低碳资产比率呈总体下降趋势,说明“碳中和”背景下实现经济内生增长需要资产结构低碳化调整,高碳资产相较于低碳资产的比例不断降低。图 11(b) 显示消费与高碳

① 篇幅所限,内生经济增长路径的特征表达式推导过程略,如需要可向作者索取。

资产比率呈总体上升趋势,说明消费水平相比于高碳资产将不断上升。如图 11(c) 所示,低碳转型需要快速积累低碳资产以抵消高碳资产使用造成的碳排放污染,故低碳资产增长速度快使低碳转型超过高碳资产增长速度。生产、投资以及消费增长速度为正,说明在“碳中和”目标约束下可以实现经济持续增长,不会陷入增长停滞。如图 11(d) 所示,高碳资产、低碳资产、产出以及消费都将保持持续内生增长,没有收敛于远期稳态。该结果表明碳排放定价、排放效率提升以及资产结构调整三种机制的联合可以在促进“碳中和”目标实现的同时,推动生产、投资以及消费的持续增长。高碳行业(如冶金石化)和低碳行业(如可再生能源)都可以不断积累资产。低碳资产积累有助于抵消高碳资产造成的碳排放污染损害,避免低碳转型的资产搁浅。保留适当规模的碳密集产业有助于为低碳产业投资提供资源,进而保障低碳转型的平稳过渡。

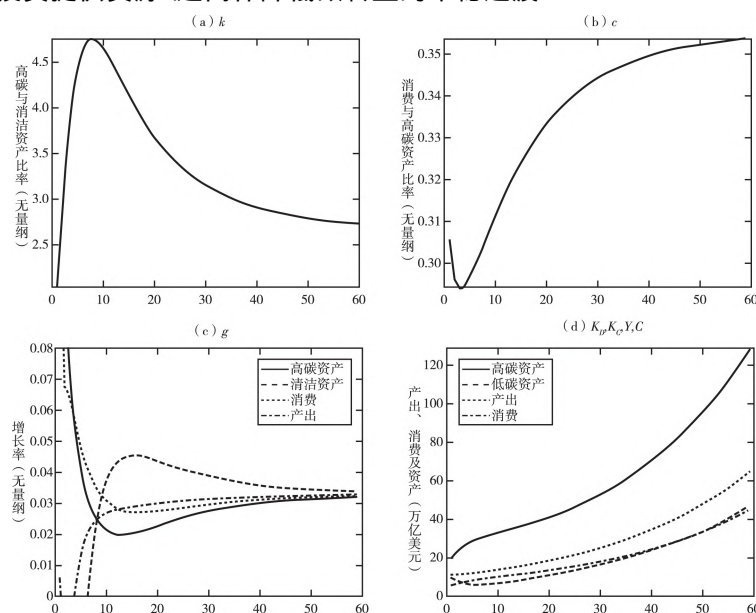


图 11 内生增长情景下高碳与低碳资产比率、消费与高碳资产比率、增长率、资产、生产以及消费的时间路径

如图 12(a) 所示,由于低碳资产积累对高碳资产的碳排放污染具有抵消作用,碳排放量将呈现总体递减趋势。图 12(b) 显示碳排放累积存量递增,但边际累积速度递减,碳排放累积存量最终趋

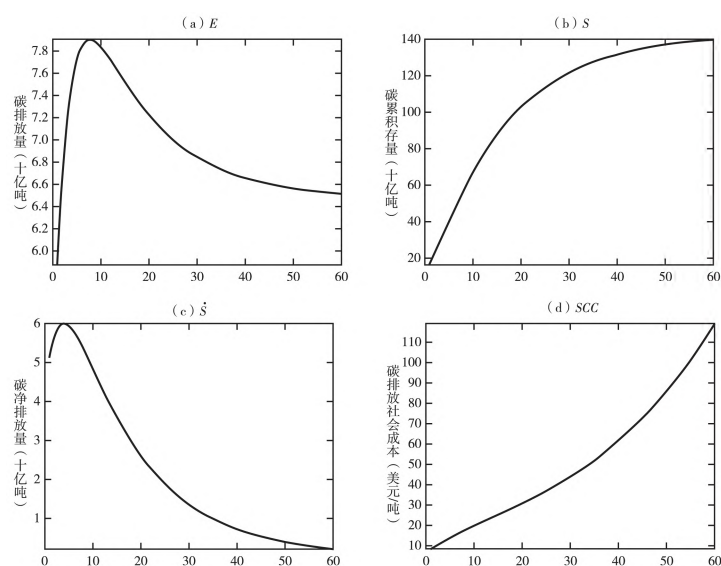


图 12 内生增长情景下碳排放量、碳累积存量、碳净排放量以及碳排放社会成本的时间路径

于稳定。如图 12(c) 所示,净碳排放量在达峰之后不断降低,并最终实现净零排放的“碳中和”状态。无论是上节的净零碳排放情景,还是本节的内生增长情景,均可以实现净零排放“碳中和”状态。两者差别在于内生增长情景在实现“碳中和”目标的同时,投资、消费和产出能够持续增长,不会陷入增长停滞稳态。图 12(d) 显示纠正碳排放污染外部性所需的碳定价水平将随时间递增。该结果符合已有文献结论:最优碳定价水平应随时间呈指数增长,以内生化碳排放外部成本并促进经济低碳转型(Dietz & Venmans, 2019)。

## 六、结论及建议

本文从实证检验、理论分析与定量模拟三个层面考察了“碳中和”目标下经济低碳转型的实现机制。研究发现:碳定价、排放效率提升以及资产结构低碳化调整是实现“碳中和”转型的关键机制。它们的作用机制各有差异,但彼此互补。碳定价通过内生化碳排放社会成本释放减排信号,引导排放效率提升和资产结构清洁化调整。排放效率提升和结构清洁化调整可以抵消碳定价的约束效应,减轻资产搁浅的低碳转型代价,推动低碳转型平稳过渡。

本研究政策启示在于“碳中和”背景下宏观经济低碳转型机制设计需从碳定价、排放效率提升以及低碳产业结构调整三方面统筹谋划、协同推进。首先,加快推进包括碳排放交易以及碳税在内的碳定价机制,释放碳减排信号激励市场主体落实节能减排和低碳改造。应充分利用全国碳市场建设机会,扩大碳市场行业覆盖范围,体现碳排放配额稀缺性,形成碳资产价格升值预期,最大限度释放碳价格的信号激励作用,倒逼高碳企业加快低碳转型升级。其次,从改进生产技术、提升排放效率的角度思考“碳中和”实现途径。电力行业可通过推广风能、太阳能等清洁技术降低碳排放强度。对于钢铁、有色等生产工艺不可避免存在化石能源使用的制造行业,可推广高效能耗设备以及碳捕捉封存技术,降低碳排放强度,从而有助于保有高碳资产价值,避免资产搁浅。最后,从产业调整视角思考“碳中和”目标实现途径,需要建立激励机制引导投资向低碳行业聚集,培育发展可再生能源、清洁生产、节能治污等绿色产业。通过限制高碳产业和引领低碳产业投资促进产业的低碳化结构调整,这将在推动实现“碳中和”目标的同时创造出绿色经济增长的新动力。

### 参考文献

- 蔡博峰、李琦、张贤等 2021 《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2021)——中国 CCUS 路径研究》,生态环境部环境规划院、中国 21 世纪议程管理中心。
- 陈登科 2020 《贸易壁垒下降与环境污染改善——来自中国企业污染数据的新证据》,《经济研究》第 12 期。
- 陈素梅、何凌云 2017 《环境、健康与经济增长:最优能源税收入分配研究》,《经济研究》第 4 期。
- 杜之利、苏彤、葛佳敏、王霞 2021 《碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应》,《经济研究》第 12 期。
- 范庆泉 2018 《环境规制、收入分配失衡与政府补偿机制》,《经济研究》第 5 期。
- 解振华、何建坤、李政、张希良等 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。
- 李青原、肖泽华 2020 《异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企业绿色专利的证据》,《经济研究》第 9 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。
- 刘金科、肖翊阳 2022 《中国环境保护税与绿色创新:杠杆效应还是挤出效应》,《经济研究》第 1 期。
- 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 9 期。
- 沈小波、陈语、林伯强 2021 《技术进步和产业结构扭曲对中国能源强度的影响》,《经济研究》第 2 期。
- 宋马林、刘贵春 2021 《增长模式变迁与中国绿色经济增长源泉——基于异质性生产函数的多部门核算框架》,《经济研究》第 7 期。

- 涂正革、王昆、谌仁俊 2022 《经济增长与污染减排: 一个统筹分析框架》,《经济研究》第 8 期。
- 王兵、牛香、宋庆丰 2021 《基于全口径碳汇监测的中国森林碳中和能力分析》,《环境保护》第 49 期。
- 余泳泽、孙鹏博、宣烨 2020 《地方政府环境目标约束是否影响了产业转型升级》,《经济研究》第 8 期。
- 余壮雄、陈婕、董洁妙 2020 《通往低碳经济之路: 产业规划的视角》,《经济研究》第 5 期。
- 张宁 2022 《碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据》,《经济研究》第 2 期。
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous, 2012, “The Environment and Directed Technical Change”, *American Economic Review*, 102, 131—166.
- Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. Kerr, 2016, “Transition to Clean Technology”, *Journal of Political Economy*, 124, 52—104.
- Arrow, K., 1962, “The Economic Implications of Learning by Doing”, *Review of Economic Studies*, 29, 155—173.
- Barrage, L., 2020, “Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate-Economy Model with Distortionary Fiscal Policy”, *Review of Economic Studies*, 87, 1—39.
- Cai, Y., and T. Lontzek, 2019, “The Social Cost of Carbon with Economic and Climate Risks”, *Journal of Political Economy*, 127, 2684—2734.
- Dasgupta, P., and G. Heal, 1979, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Dietz, S., and F. Venmans, 2019, “Cumulative Carbon Emissions and Economic Policy: In Search of General Principles”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 108—129.
- Feenstra, R., R. Inklaar, and M. Timmer, 2015, “The Next Generation of the Penn World Table”, *American Economic Review*, 105, 3150—3182.
- Gollier, C., and J. Hammitt, 2014, “The Long-run Discount Rate Controversy”, *Annual Review of Resource Economics*, 6, 273—295.
- Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski, 2012, “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium”, *Econometrica*, 82, 41—88.
- Guan, Y., Y. Shan, Q. Huang, H. Chen, D. Wang, and K. Hubacek, 2021, “Assessment to China’s Recent Emission Pattern Shifts”, *Earth’s Future*, 9, e2021EF002241.
- Hotelling, H., 1931, “The Economics of Exhaustible Resources”, *Journal of Political Economy*, 39, 137—175.
- IEA, 2021a, “The Greenhouse Gas Emissions from Energy Database”, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2021b, “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector”, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2021c, “World Energy Outlook 2021”, International Energy Agency, Paris.
- IPCC, 2021, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report”, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Manne, A., and R. Richels, 2004, “The Impact of Learning-by-doing on the Timing and Costs of CO<sub>2</sub> abatement”, *Energy Economics* 26, 603—619.
- Nordhaus, W., 1993, “Optimal Greenhouse-gas Reductions and Tax Policy in the DICE Model”, *American Economic Review*, 83, 313—317.
- OECD, 2021, *The Long Game: Fiscal Outlooks to 2060 Underline Need for Structural Reform*, OECD Publishing, Paris.
- Peretto, P., 2009, “Energy Taxes and Endogenous Technological Change”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 57, 269—283.
- Selden, T., and D. Song, 1995, “Neoclassical Growth, the J Curve for Abatement, and the Inverted U Curve for Pollution”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 162—168.
- Stokey, N., 1998, “Are There Limits to Growth?”, *International Economic Review*, 39, 1—31.
- van den Bijgaart, I., R. Gerlagh, and M. Liski, 2016, “A Simple Formula for the Social Cost of Carbon”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 77, 75—94.
- van der Ploeg, F., and C. Withagen, 2014, “Growth, Renewable and the Optimal Carbon Tax”, *International Economic Review*, 55, 283—312.
- World Bank, 2019, “Report of the High-Level Commission on Carbon Prices”, World Bank Group, Washington, D. C.



## China's Low-carbon Economic Transitions towards Carbon Neutrality: Characteristics and Mechanisms

JIN Wei<sup>a</sup>, WANG Dihai<sup>b</sup> and ZHANG Lin<sup>c</sup>

(a: Ma Yinchu School of Economics, Tianjin University;

b: School of Economics, Fudan University;

c: School of Energy and Environment, City University of Hong Kong)

**Summary:** Transitioning to a low-carbon economy for carbon neutrality while promoting economic growth is one of the key issues facing China to address climate change and sustainable development. At the United Nations General Assembly in September 2020, China has pledged to peak carbon dioxide emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. The thought-provoking questions are as follows: how should China make strategic plans according to the national low-carbon development strategy, and make use of mechanisms such as emission reduction regulation, technological innovation and industrial transformation to promote the goal of carbon neutrality? How will the target constraint of carbon neutrality affect the path of China's future economic growth and transformation? Understanding how different carbon emission reduction mechanisms influence each other and how they affect economic growth and transformation are theoretical issues that need to be answered urgently in the academic community. A theoretical analysis of these issues is the main objective of this paper.

This paper uses provincial panel data to empirically examine the stylized facts of China's low-carbon transition. Carbon pricing, emission efficiency improvement and capital restructuring are robust mechanisms for low-carbon transition. A green growth model is developed to specify the interactions between carbon-intensive capital, clean capital, cumulative carbon stocks and the social cost of carbon emissions. The model analyzes the mechanism through which low-carbon transition could proceed, with a focus on the effects of carbon pricing, efficiency improvement and capital restructuring on transitional dynamics of green growth. The calibrated model is used to quantitatively simulate the time path of low-carbon transition under different scenarios with the carbon neutrality goal.

The main findings are that carbon pricing, emission efficiency improvement, and capital restructuring are three important mechanisms through which low-carbon transition can meet the goal of carbon neutrality. The three mechanisms are differentiated but complementary. Carbon pricing that captures the social costs of carbon emission creates a price incentive mechanism of low-carbon transition to limit the use of high-carbon assets and carbon emissions. However, the economic constraint of carbon pricing incurs transition costs such as stranded assets. Emission efficiency improvement reduces the carbon intensity through the learning-by-doing effect, thereby mitigating carbon emission increases as the size of production scale expands. Capital restructuring acts to expand the share of low-carbon capital and shrink that of high-carbon capital, which helps limit emissions caused by economic growth and mitigate transition costs incurred by carbon pricing. These three mechanisms can work cohesively and contribute to endogenous growth in the context of carbon neutrality. While striving to achieve the net-zero emission goal, production, consumption, and investment can continue to grow, and the target of carbon emission reduction will not lead to an outcome of growth stagnation.

The policy implications drawn from our research are that low-carbon transition towards carbon neutrality lies in coordinating carbon pricing, emission efficiency improvement and low-carbon industrial restructuring. First, it is important to strengthen the building of carbon markets by expanding sectoral coverages of the carbon market to reflect the scarcity of emission quotas. By doing so, the market can form the expectation of low-carbon asset value appreciation and creates the incentive for low-carbon technical upgrading of high-carbon enterprises. Second, it is also important to think about the way to achieve carbon neutrality from the perspective of improving production technology and emission efficiency. The power industry must reduce the emission intensity by promoting clean technologies such as wind and solar energy. For manufacturing that inevitably uses fossil energy in production, it is necessary to promote the use of high-efficiency equipment and carbon capture and storage technologies for maintaining the asset value of high-carbon capital. Third, it is important to establish an incentive mechanism to guide capital investment towards low-carbon industries, and foster green industries such as renewable energy, clean production, energy conservation and pollution control. By restricting high-carbon industries and directing investment towards low-carbon industries, low-carbon industrial restructuring will not only help achieve the carbon neutrality goal but also create a new engine for economic growth.

This paper contributes to green growth literature which mainly focuses on factors of low-carbon economic transition from the empirical perspective. There is a lack of theoretical works analyzing the mechanism of green growth for carbon neutrality. To our knowledge, this paper for the first time explores the mechanism of China's low-carbon transition for the target of carbon neutrality. Our paper contributes to a detailed exposition of the general equilibrium effect of carbon pricing, emission efficiency improvement, and capital restructuring on low-carbon transition. It also makes numerical simulation and quantitative evaluation of the time path and inherent characteristics of China's low-carbon transition. Our paper thus contributes to a thorough understanding of low-carbon transition for carbon neutrality through the lens of empirical testing, theoretical analysis, and quantitative simulation.

**Keywords:** Carbon Neutrality; Low-carbon Transition; Carbon Pricing; Emission Efficiency; Capital Restructuring

**JEL Classification:** O11, O44, P28, Q43, Q54

(责任编辑 王利娜) (校对: 晓 鸥)