支撑深度脱碳的技术研发投资配置与路径优化

徐舜天[1]，王灿[2,3]，朱俊明[1*]

（1.清华大学公共管理学院，北京 100084；2.清华大学环境学院，北京 100084；3.清华大学碳中和研究院，北京 100084）

【摘 要】碳达峰碳中和目标的实现需要持续的低碳技术进步与规模化应用。对研发的投资配置是驱动低碳技术进步的关键，涉及投资强度、时间路径及技术类型的优化决策。本文构建具有内生技术进步的中国能源经济优化模型，根据研发回报不确定性特征区分先进适用技术与前沿突破性技术两类研发方向，并基于多阶段随机动态优化框架分析了面向“双碳”目标的最优研发投资路径。结果表明，研发回报不确定性推高了前沿突破性技术的最优投入强度，为了把握不确定性下的“高风险高回报”机会，应保持较高研发强度以确保长期减排的可行性和成本效益。根据减排时序与人口情景进一步分析宏观趋势性因素的影响，本文发现提前行动、线性、延迟行动三类碳中和路径的研发投资从近中期就开始显现分化趋势，表明研发投资部署规划需整体考虑气候政策的长期取向；低人口情景要求的前沿突破性技术研发投资比中、高情景可高出逾一倍，为社会经济结构变迁的系统影响提供了一个情景例证。基于此，本文建议系统完善针对成熟与新兴技术研发创新活动的支持体系，强化跨领域跨部门的系统协同，建立前瞻性的技术预见与评估机制。

【关键词】“双碳”目标；科技创新；研发投资；路径优化

【中图分类号】X321；F062.2　　【文章编号】1674-6252（2026）03-0049-11

【文献标志码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2026.03.049

引言

面对气候变化引发的系统性风险与全球治理的紧迫需求，中国明确提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和[1,2]。鉴于全球近一半的未来减排潜力需依赖尚不成熟或尚未商业化的新兴技术[3]，实现“双碳”目标要求的深度减排必须以科技创新为核心驱动。中共中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确部署要加强绿色低碳重大科技攻关和推广应用，强化前沿技术布局；中共中央、国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》进一步确立了坚持创新转型的原则，强调要全方位强化支撑绿色转型的科技创新。要将这些战略蓝图转化为现实减排能力，核心在于优化研发投资的配置路径，以确保创新体系的高效运行[4]。

研发投资旨在通过知识资本积累驱动技术进步，实现未来的效率提升与成本下降，本质上是一

资助项目：国家重点研发计划政府间国际创新合作项目“区域绿色低碳转型的环境—经济—社会耦合机制与实现路径研究”（2023YFE0104600）；国家自然科学基金委中美国际合作项目“面向城乡协调发展的区域碳中和路径优化”（T2261129475）。

作者简介：徐舜天（1998—），男，博士研究生，研究方向为环境经济与政策，E-mail: xst24@mails.tsinghua.edu.cn。

*** 责任作者：**朱俊明（1983—），男，博士，副教授，博士生导师，研究方向为公共政策分析、环境治理及可持续发展，E-mail: junming@tsinghua.edu.cn。

个跨期资源优化配置过程 [5,6]。由于不同低碳技术在成熟度和不确定性等方面存在差异，研发投资决策既涉及投资额和时间选择，也需要在技术类型之间权衡取舍 [7]。具体而言，大量能效提升、可再生能源等技术已基本具备商业化条件，拥有较成熟的工程经验与成本控制能力；而碳捕集与封存、氢能、负排放等技术仍处于研发或早期示范阶段，尚未建立稳定的成本结构或实现规模化应用，具有更大的不确定性与更高的潜力。投资较成熟技术的理由在于，其部署路径相对清晰，能够在近期为系统减排目标提供可衡量的支撑，并降低近中期转型过程中的不确定性与失败风险。然而，站在长期系统优化的视角，新兴前沿技术具有重要的选项价值，可能在中长期显著拓展减排的可行边界。在技术竞争与路径依赖未定型的阶段，保持多元技术方向的探索，有助于规避过早锁定技术路线造成的路径依赖与效率损失 [8]。因此，需要对有限的研发资源进行优化配置，探索“双碳”目标约束与研发不确定性下的最优投资路径。

大量研究基于综合评估模型或能源系统模型探索了低碳技术的发展路径，然而现有研究存在三方面不足，限制了其对研发决策的支持能力。首先，大部分模型将技术进步设定为外生变量，以预设的成本变化曲线进行模拟，难以刻画政策干预、研发投入等因素通过知识积累与创新扩展影响技术成本的作用机制 [6,9,10]。其次，尽管一些模型引入了经验学习框架或研发驱动的技术进步机制 [11]，但往往忽略了研发结果存在不确定性，未区分不同类型技术的研发风险差异，导致对研发不确定性与技术组合问题缺乏系统刻画 [7]。最后，用于分析最优技术研发路径的模型往往缺乏针对中国情境的专门设计与参数校准，且对中国人口演变等重要现实情境趋势的影响关注不足，难以评估未来关键变量变动对研发投资最优配置的影响。

针对上述问题，本文构建了具有内生技术进步框架的能源经济优化模型，根据技术成熟度与研发不确定性的差异区分了低碳技术类型，并以中国为背景进行参数校准，以回答何种技术组合、投入强度与时间路径符合社会最优解的问题。鉴于前沿技术创新往往具有“高风险、高回报”的特质，模型特别引入了研发回报分布形状变量，以考察研发回报的风险特征对决策的影响。与之相匹配，模型采用多阶段随机动态优化框架，以刻画不确定性条件下的研发决策跨期动态权衡。基于此，本文重点评估了在存在短期低成本替代路径的情况下，是否仍应为前沿技术保留必要的研发强度。为聚焦不确定性下的多阶段投资配置问题，本文不包含详细能源系统，而是侧重于宏观层面的技术演化逻辑和经济机制解释，并采用近似动态规划方法进行求解。

模型结果表明，研发回报不确定性较高时的最优策略是显著增加前沿突破性技术研发投入，这本质上是在为实现“双碳”目标储备长期选项，以高强度的研发投资换取未来的低成本减排可行性。进一步，本文评估了减排时序进度、人口老龄化等宏观趋势性因素对研发路径的影响。通过模拟提前行动、线性、延迟行动三种碳中和路径所代表的减排时序情景，研究发现：提前行动带来的技术转型进度要求将研发压力显著前移，而延迟行动则使研发投入集中于中后期，不同减排节奏导致的最优投资额差异可达约 25%。这表明研发预算规划需与减排目标时序保持协调，以避免因时间错配而产生资源缺口。在人口演变方面，重度老龄化的低人口情景下最优研发投资比高人口情景高出逾一倍。这意味着，当老龄化导致劳动力供给减少、财政能力受限时，社会必须更加依赖技术进步产生的红利来对冲经济下行压力，技术创新构成了应对老龄化社会减排负担上升的关键替代力量。

1 方法与数据

1.1 低碳技术创新的不确定性特征

技术研发的投入决策本质上取决于对预期效益与预期成本的权衡。在收益端，研发成果具有显著正外部性，知识溢出与减排效益使社会回报往往高于私人回报；在成本端，研发过程存在试错与失败风险，投入具有不可回收性，不同技术路径的成本与成功概率高度不确定，使投资决策呈现强烈的跨期特征与组合选择问题。研发不确定性是创新决策与技术选择的关键影响因素，但其作用于技术选择的机制在现有文献中仍缺乏系统刻画。

低碳技术的创新过程具有多源叠加的不确定性。从技术与成本演化的微观机制来看，不少关键

低碳技术涉及复杂的物理和工程机理，如碳捕集与封存、氢能制储运、长时储能等往往需要跨学科的基础研究和多环节系统集成，研发失败率较高，单次试验结果对长期性能和安全性的代表性有限。新技术在早期试验和示范阶段往往难以体现出显著的单位成本优势，甚至可能出现效率下降、设备故障率偏高或与既有系统兼容性差等问题，使得成本曲线呈现非线性或阶跃式变化，而非平滑下降。

制度与市场环境进一步放大了上述不确定性。一方面，碳价水平及其稳定性、补贴与税收等政策工具的预期变化，会直接影响企业和金融部门对长期研发项目的风险评估和资金配置；另一方面，电力系统灵活性、氢能基础设施布局、输配电网络和储能设施等基础设施建设具有显著的区域不均衡与时间滞后，即使技术在实验室或小规模示范中已经具备可行性，也可能因为配套制度和基础设施不到位而难以实现大规模部署。技术不确定性、市场不确定性和政策不确定性交织，使得技术研发的预期回报高度波动。

因此，低碳技术研发回报通常表现为高方差、高偏度和厚尾特征。大量研发活动仅带来渐进式改进，边际收益有限，而少数在材料体系、工艺路径或系统架构上实现根本性突破的项目，则可能在相对短的时间内显著降低成本、提升性能，重塑整个技术族群的学习曲线和部署前景。研发投资由此呈现出“多数平庸”与“少数极端成功”共存的结构，传统基于正态分布的风险度量往往低估了这种厚尾收益对长期社会福利和减排可行边界的贡献，也低估了放弃部分高不确定性技术所带来的机会成本。

这种不确定性风险在时间维度上进一步被技术创新的积累性与阶段性特征所放大。从基础研究到原型开发、示范工程再到商业化扩散，每一阶段都需要前期知识和经验的持续积累，其回报在时间上具有显著的滞后性。早期投入往往难以在短期内以成本下降或减排量的形式获取显性回报，却对后续规模化部署的成本门槛、可靠性和系统兼容性具有决定性影响。一旦在早期阶段由于不确定性高、收益难以量化而形成系统性的投资不足，不仅会削弱潜在突破性技术的选项价值，也会在未来减排约束收紧时加剧对既有成熟技术的过度依赖，从而产生路径依赖和技术锁定。

基于上述特征，可以将绿色低碳技术创新视为在高不确定性环境下的跨期投资决策问题。通过动态规划等方法，将研发投入、知识存量和技术成本演化置于统一框架中，并以随机冲击刻画技术进展的跳跃性和厚尾收益，可以更系统地评估不确定性对最优研发节奏和技术组合的影响。本文在模型分析中引入研发回报的随机分布设定，正是为了在规范化的数量分析框架下，刻画这类不确定性特征及其对研发投资需求的塑造作用。

1.2 模型基础结构与主要改进

本文的模型基础结构基于DICE（dynamic integrated model of climate and the economy）模型[12]发展而来。DICE模型用以在宏观经济增长模型中刻画减排与经济发展的动态权衡，其扩展版本ENTICE（endogenous technological change in the DICE model）将技术进步改为内生机制，引入研发活动驱动的知识资本积累，用于分析创新与技术进步的作用[13,14]。

本文参考并改进ENTICE的结构，构建区分技术类型的多阶段随机优化模型，用以评估不确定性条件下的最优研发投入路径。具体而言，模型将低碳技术划分为两类：一类是先进适用技术（术语借鉴《绿色低碳先进技术示范工程实施方案》中的相关表述），代表已基本具备商业化条件、成本演化路径相对确定的技术；另一类是前沿突破性技术，代表尚处于研发示范阶段、面临高度不确定性但具备极大减排潜力的技术。

整体架构上，模型包含三类核心模块：一是宏观经济模块，以生产与支出为主线，在资源约束下决定可用于技术研发与部署的投入上限；二是技术演化模块，围绕上述两类具有可替代关系的低碳技术展开，分别刻画不同成熟度与不确定性的知识积累及成本下降轨迹；三是排放与能源结构模块，在给定能源替代选项与部署能力约束下，衡量经济活动产生的碳排放水平。上述模块共同嵌入一个统一的跨期最优化结构中，动态求解在初始状态与参数设定下的最优资源配置路径，使得模型能够在一致的框架中系统比较不同研发策略与部署路径的经济代价、技术演化与社会福利表现。模型结构如图1

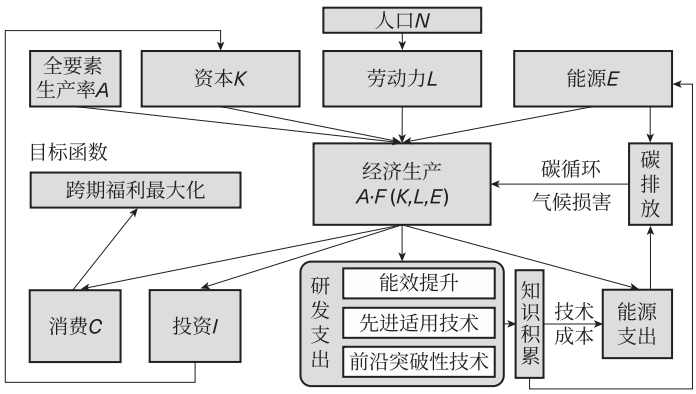

图 1　模型结构示意

所示。模型中的核心过程如下：

首先，模型的目标函数是最大化跨期人均效用的贴现和：

$$\max V=\sum_{t=0}^{T}U[\,c_t,N_t]D_t \tag{1}$$

式中，c_t为人均消费；N_t为人口规模；D_t为外生给定的贴现因子。模型以 5 年为一期，基期（$t=0$）为 2020—2025 年，最后一期（$t=T$）为 2055—2060 年。当期效用写作：

$$U_t=U[\,c_t,N_t]=N_t\log\left(\frac{C_t}{N_t}\right) \tag{2}$$

宏观总产出Y_t由资本K_t、劳动力L_t与综合能源投入E_t根据柯布—道格拉斯形式的生产函数决定：

$$Y_t=\Omega_t\left(A_tK_t^{\gamma}L_t^{1-\gamma-\beta}E_t^{\beta}\right) \tag{3}$$

式中，A_t为全要素生产率；Ω_t为气候损害系数，其数值由碳循环与损害函数决定，具体计算过程详见参考文献 [7,14]；γ和β分别为资本和能源的产出弹性，劳动的产出弹性为$1-\gamma-\beta$。能源投入（E_t）是化石能源（F_t）和两类相互可替代的低碳技术（先进适用技术$B_{1,t}$、前沿突破性技术$B_{2,t}$）在嵌套 CES 结构下聚合而得。

总产出扣除化石能源使用成本后，得到可支配的净产出：

$$Q_t=Y_t-p_{F,t}F_t-p_{B1,t}B_{1,t}-p_{B2,t}B_{2,t} \tag{4}$$

式中，$p_{F,t}$、$p_{B1,t}$和$p_{B2,t}$分别为三类能源的当期价格。

支出在消费、投资与研发之间的分配为

$$Q_t=C_t+I_t+R_{E,t}+R_{B_1,t}+R_{B_2,t} \tag{5}$$

式中，I_t为物质资本投资；$R_{E,t}$为能源效率研发支出；$R_{B_1,t}$和$R_{B_2,t}$为两类低碳技术的研发支出。式（4）和式（5）构成了经济系统的资源约束：支付清洁能源或进行研发活动，必然会与消费或资本积累竞争经济资源。

对每一类低碳技术$B\in\{B_1,B_2\}$，分别引入“创造新知识”的知识存量$H_{B,t}^{K}$与“成本降低”知识存量$H_{B,t}^{C}$。模型具有内生技术进步机制，每类技术的单位成本由其对应的知识资本水平决定，通过创新可能性前沿将当前期的研发投入转化为下一期的知识积累，从而形成随时间演化的成本下降轨迹。知识存量的演化为

$$H_{B,t}^{K}=h\left(R_{B,t}\right)+\left(1-\delta_B\right)H_{B,t-1}^{K},\ B=B_1,B_2 \tag{6}$$

$$H_{B,t}^{C}=h\left(R_{B,t}\right)+H_{B,t-1}^{C},\ B=B_1,B_2 \tag{7}$$

式中，δ_B为知识折旧率。创新可能性前沿把当前期研发和既有知识转化为新增知识：

$$h\left(R_{B,t}\right)=aR_{B,t}^{b}\left(H_{B,t}^{K}\right)^{\Phi_B} \tag{8}$$

式中，a为创新可能性前沿的尺度系数；b为新增知识存量对研发投入的弹性；Φ_B刻画既有知识存量对新增知识创造的影响强度。技术单位成本由成本降低型知识存量决定：

$$p_{B,t}=\frac{p_{B,0}}{\left(H_{B,t}^{C}\right)^{\eta}} \tag{9}$$

式中，η 为知识对成本影响的参数，刻画单位成本对成本降低型知识的学习弹性。

在上述基础结构之上，本文针对研究目标进行了两项关键调整：

首先，本文引入了技术研发回报的不确定性，即研发投入转化为技术知识积累的成功率的不确定性，关注其分布形状对最优研发组合的影响。借鉴文献的做法 [7]，在创新可能性前沿的基础上，对新增知识创造加入乘性随机冲击$\theta_{B,t}$：

$$H_{B,t}^{K}=\theta_{B,t}h_B\left(R_{B,t}\right)+\left(1-\delta_B\right)H_{B,t-1}^{K} \tag{10}$$

$$H_{B,t}^{C}=\theta_{B,t}h\left(R_{B,t}\right)+H_{B,t-1}^{C} \tag{11}$$

模型将研发视为多阶段随机过程，通过调整$\theta_{B,t}$的分布，允许高成本技术的回报呈现更高的方差和厚尾分布，使其具备“高风险高回报”的特征。相应地，模型采用近似动态规划（approximate dynamic programming，ADP）方法[15]求解多阶段随机最优化问题，通过值函数近似与策略迭代有效缓解高维不确定状态空间下的“维度诅咒”。与传统静态优化或逐期模拟方法不同，该方法可提供整个规划期内的动态最优路径，系统评估不同时间点研发投入对未来成本与部署的联动影响，明确当前决策在约束、回报和不确定性下的跨期价值影响。

其次，本文以中国为建模背景，将“双碳”目标下的排放路径设置为约束条件。考虑到中国已提出明确的碳达峰碳中和目标时间，模型不再通过气候—经济反馈内生得到最优排放路径，而是直接基于减排目标设定排放路径约束。这有助于聚焦现实政策需求，在既定约束下探索何种研发与部署路径最为经济。尽管模型以中国为主要研究对象，我们仍保留了气候模块以模拟气候损害，并外生设定全球其他国家的排放路径为SSP2-4.5情景[4]。

1.3 参数与情景设置

1.3.1 排放路径约束

本文设定的各排放路径情景均满足中国已承诺的“双碳”目标及2035年国家自主贡献目标。如图2所示，三种情景的差异主要体现在2035年之后的减排时序：线性情景假定排放自2035年起以恒定速率逐步下降；提前行动情景则在2035年后迅速加速减排；而延迟行动情景则先维持相对较高的排放，随后再加速下降趋近于碳中和。考虑生态碳汇，三种情景最终均在2060年达到碳中和目标要求的合理剩余排放水平[16]。本文设定的基准情景为线性情景。

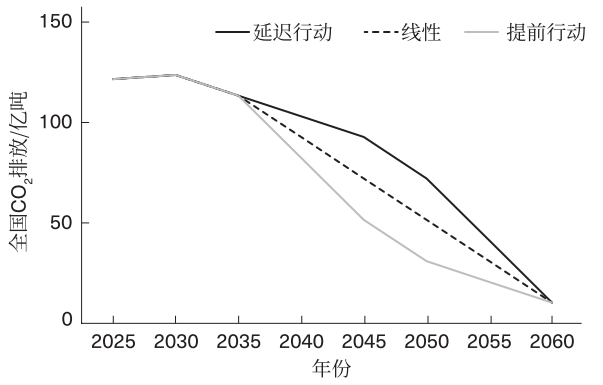

图2　三种排放路径的减排时序情景设定

1.3.2 人口情景

采用联合国《世界人口展望2024》[17]对中国的中位情景人口预测作为基准，同时纳入其低位95%与高位95%的不确定性区间，设置三种人口情景（表1和表2）。总体人口在所有情景下均呈下降趋势，至2060年中情景人口降至11.4亿人，而低情景与高情景的总人口分别收缩至10.0亿人与12.6亿人。劳动年龄人口（15～64岁）则下降更为显著，中情景下从2025年的9.9亿人降至2060年的6.1亿人，低情景下进一步降至5.5亿人，高情景下相对缓降至6.7亿人。

表1　中国人口总数情景设定[17] 单位：亿人

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
低情景	14.1	13.8	13.4	12.8	12.3	11.6	10.8	10.0
中情景	14.2	14.0	13.7	13.4	13.1	12.6	12.0	11.4
高情景	14.2	14.2	14.1	14.0	13.8	13.5	13.1	12.6

表2　中国劳动年龄人口情景设定[17] 单位：亿人

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
低情景	9.9	9.7	9.2	8.5	7.9	7.1	6.2	5.5
中情景	9.9	9.7	9.3	8.6	8.1	7.5	6.7	6.1
高情景	9.9	9.8	9.4	8.7	8.2	7.7	7.1	6.7

1.3.3 不确定性参数

技术不确定性通过研发回报的对数正态分布建模[7]，并以乘性随机冲击$\theta_{B,t}$的标准差σ表征路径的不确定性强度。本文将技术划分为两类：对先进适用技术，设定$\sigma=0$，反映其研发回报的可预期性；对前沿突破性技术，设置基准分布（$\sigma=0.7$）和宽分布（$\sigma=2$）两种情景，以体现其多数时期进展缓慢、少数时期实现跃迁的研发特征。为控制可比性，所有技术研发回报的分布均值设为一致，模拟结果仅受不确定性设定影响。

2 低碳技术研发的不确定性与投资需求

绿色低碳技术创新伴随着高度不确定性，准确识别这种内在的风险特征是理解技术投资逻辑与制定支持政策的基础。低碳技术研发面临的不确定性来源于技术本身的可行性与成本演进路径，并根植于政策预期、市场环境与基础设施条件的动态变化。许多关键减排技术依赖复杂工程体系与跨环节协同，其早期研发阶段难以稳定反映长期性能与经济性；与此同时，碳价信号、配套制度与区域基础设施建设的时空匹配，又持续改变企业与金融部门对长期项目的风险认知与资本配置。在这一背景下，研发投资不再只是对单项技术前景的判断，而是对一组潜在技术机会及其未来部署环境的整体权衡。更重要的是，技术创新具有显著的阶段累积特征，早期投入虽未必立即转化为成本下降或减排增量，却深刻影响后续规模化扩散的可行边界。一旦在高不确定性阶段形成系统性观望或低投入，潜在突破性技术的成长空间将被压缩，并可能在后期减排压力上升时放大对既有技术路径的依赖。本节将基于低碳技术创新不确定性的来源与特点，使用模型刻画不确定性对研发投入决策的影响，并探讨其启示。

在其他参数保持基准设置的前提下，本文比较了不确定性程度对最优研发投入的影响。图 3、图 4 分别对应研发回报的基准分布情景与宽分布情景，柱高表示各阶段的最优研发投资规模。由于模型以 5 年为一期，以下各图中任一年度所对应的投资额为该年作为最后一年的 5 年周期投资总额。

对比基准分布与宽分布两种情景的模拟结果，技术不确定性的提高显著提升了前沿技术的期望投资价值，促使研发策略由低强度的维持性投入转向高强度的持续性投入。当研发回报呈现“高风险、高收益”的宽分布特征时，为了提高实现技术突破的概率并获取潜在的高额减排收益，最优策略表现为显著扩大投资规模、延长高强度投入窗口期，并进一步提高前沿技术在研发组合中的资金占比。

从投入强度来看，不确定性的增强显著提高了对前沿技术的研发投资需求。数据显示，基准情景下前沿技术的投入维持在每期 0.1 万亿～0.27 万亿美元区间；而在宽分布情景下，最优投资规模明显提升，第一期的投资即突破 0.5 万亿美元，接近基准情景的两倍；在后续年份，其投入强度也始终维持在基准情景的 2～5 倍水平。这表明，面对厚尾分布的潜在高回报，理性的决策需要大幅增加资金强度，以加速知识资本的积累。

从投入时序来看，不确定性的增强使研发资金呈现出“早投入、长维持”的特征。在基准情景中，前沿投入在 2030 年达到峰值后即迅速回落。相较之下，宽分布情景下的资金支持在 2045 年以前始终维持在 0.5 万亿美元以上的高位，之后才缓慢下行。这种高强度投入窗口期的显著延长，反映了系统需要利用更长的时间窗口进行持续攻关，利用早期的知识沉淀撬动未来的成本下降，以对冲后期技术突破失败的风险。

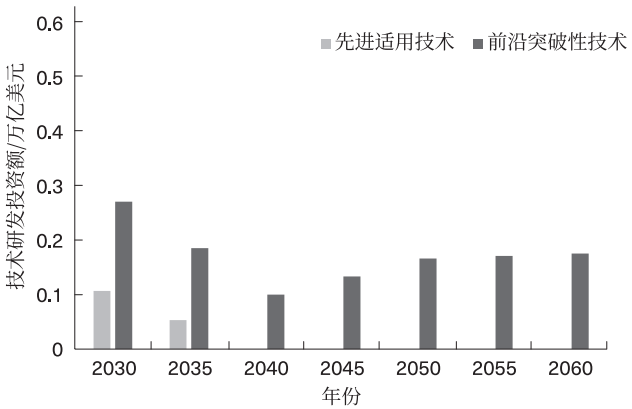

图 3　最优研发投资路径（基准分布情景）

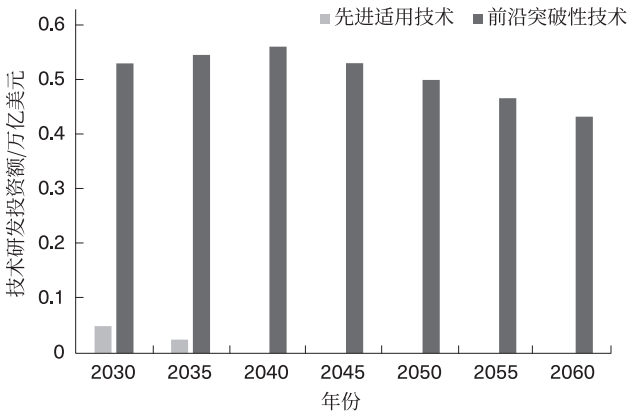

图 4　最优研发投资路径（宽分布情景）

从技术配置结构来看，资源在前沿突破性方向的集中度随着不确定性的增加而显著提升。在基准情景中，第一期的前沿突破性技术在总投资中的占比约为 73%；而在宽分布情景下，这一占比迅速提升至 91%。这表明，在深度减排的资源配置逻

辑下，成熟的先进适用技术仅被定位于近期过渡手段，而战略资源必须高度集中于具备长远潜力的前沿方向，以实现长期深度减排所需的颠覆性技术跨越。

上述结果表明，如果仅着眼于节约短期成本而忽视不确定性下的长期发展，将导致资源配置偏离社会最优路径。因此，研发支持策略的制定必须高度警惕路径依赖与技术锁定的风险。若仅基于短期成本效益进行资源配置，可能导致对当前较为成熟、回报更确定的先进适用技术形成过度依赖。随着减排约束逐步收紧，系统将被迫持续压榨这些技术的边际潜力，技术路径趋于收缩和单一，形成技术路线的锁定。而一旦成熟技术难以再支撑更大规模的减排压力，转向前沿技术将成为必然选择，若早期未能及时投入、积累知识与经验，前沿技术往往尚未具备可行的成本与部署能力，将迫使系统在短期内承受高昂成本或减排滞后的代价，造成较大的福利损失。

此外，现实中技术发展路径所面临的不确定性不仅体现在参数取值的非确定性上，更在于参数分布的形式本身可能难以事先判断。本文模型中的不确定性设定提供了一种分析方式，但现实中的不确定性往往更具开放性与不可预测性。因此，为了在实践中形成合理的研发投资决策，需要建立前沿引领技术、颠覆性技术的预测、发现、评估和预警机制，作为应对长期不确定性的工具。通过情景推演、阶段性目标设定与专家判断的持续更新，为技术路线选择与资源分配提供方向性支持。

3 研发投资需求的宏观影响因素分析

前文分析表明，技术本身的风险特征即不确定性是塑造研发投资策略的内在基础。需要进一步考虑的是，技术创新活动并非孤立存在，而是嵌入在特定的宏观经济与政策环境之内。最优研发路径的选择，不仅取决于技术本身能否实现突破，更取决于外部系统减排需求的紧迫性及宏观趋势演变带来的资源约束变化。从决策逻辑上看，研发投入的边际价值受影响于外部系统对减排的需求强度及技术在系统中的替代空间。宏观经济与政策环境通过改变减排约束、资源禀赋与要素结构，重塑技术进步在不同阶段的必要性与可行性，进而影响研发投入的最优强度与时序安排。因此，有必要将技术决策置于外部边界条件之下加以考察。

因此，本节将视角转向外部系统，重点考察两类关键的外部边界条件：一是由减排时序界定的政策约束，它决定了技术突破的时间窗口与紧迫度；二是由人口演变引致的经济结构变迁，它决定了经济系统对技术替代的依赖程度与承载能力。最后，本文简要探讨了若干其他影响因素，为未来政策应对与模型拓展提供方向。

3.1 不同减排时序下的技术创新投资需求

在构成外部系统边界的诸多变量中，减排时序代表着气候战略与政策约束。在气候政策讨论中，围绕尽早推进还是循序渐进的减排步调分歧始终存在。收紧排放约束的时间安排可能改变研发投入的时间分布和资金压力，从而影响整体效率与成本路径。提前行动可降低累积排放与转型风险，而延迟行动将技术进展与政策执行的压力推向后期，也可为技术知识积累和成本下降留出更多时间。这种减排时序反映了实现“双碳”目标的不同节奏和路径，决定了排放约束的时间变化，也对应着技术突破、示范与产业化的不同窗口期。比较不同减排时序下的研发投资结构，有助于理解技术创新在实现气候目标过程中的时点效应和资源配置优先级。

本节在基准参数设定下，仅改变减排时序，比较提前行动、线性、延迟行动三类减排路径对前沿突破性技术最优研发投入的影响（图 5）。结果表明，提前行动的减排路径使 2031—2040 年阶段的研发投入更高，延迟行动则相对较低。这说明提前行动的减排时序会相应使研发投入提前。自 2050 年起，延迟行动情景所需的投资持续增加并在 2055—2060 年阶段处于最高水平，提前行动则相对较低，说明延迟行动的减排时序把研发投资压力推向了中后期。

从研究期内的投资总量上看，以 3% 的折现率 [7] 计算，提前行动情景的累积投入净现值最高（3.66 万亿美元），延迟行动情景次之（3.65 万亿美元），线性情景最低（3.62 万亿美元）。三者数值较为接近，表明减排时序的差异主要影响了资金投入的时间分布，而对累积经济投入影响有限。

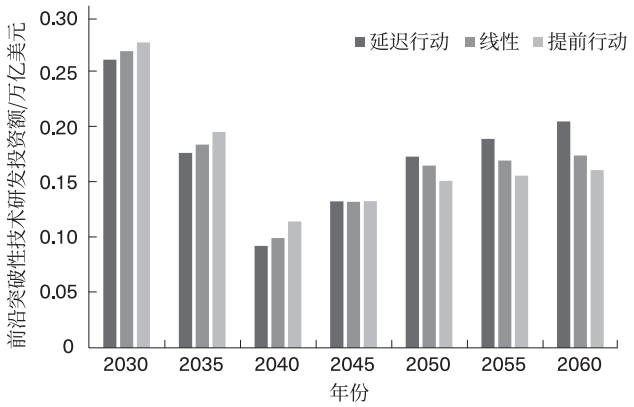

图 5　不同减排时序情景下的前沿突破性技术研发投资最优路径

图中情景间的差异幅度反映了依据中长期减排节奏进行前瞻性研发规划的必要性。本文结果显示，2031—2040 年，由减排路径差异引致的研发投资需求差异最高约为 25%，投资规模的情景间差异约为每年 50 亿美元。与之相比，全球主要国家 2019 年用于清洁或低碳能源技术研发的公共支出总额约为 250 亿美元 [18]。当然需要指出的是，该数据仅限于公共部门预算，而本文模型结果对应的是全社会的研发投入，覆盖范围较大。

模型估算的投资额差异数值可作为决策中判断的基准：若经评估后认为该幅度的变动对整体投资计划的冲击有限，则在技术投资分析中任意假设线性或其他形式的减排路径并不会带来实质偏差。反之，如果影响显著，就不可忽视未来减排路径的不确定性对研发资金配置的影响。也就是说，在制定 2031—2040 年的投资计划时，也需将 2040 年之后的政策走向与减排节奏纳入考虑，审慎进行研发投资部署。

3.2 不同人口情景下的技术创新需求

与减排时序这一决策偏好驱动的政策约束不同，人口演变代表了基础的结构性特征。近年来，我国人口出现负增长，人口老龄化程度持续加深。人口规模下降一方面可能会直接降低总体消费需求、能源需求，使减排约束放松，从而减少低碳技术的投资需求 [19]；但另一方面，老龄化加剧会降低劳动力数量、推高社会福利支出，使经济约束收紧，从而增加投资低碳技术、降低其成本的需求 [20]。这里，我们基于不同人口情景评估了人口变化对技术创新需求的影响（图 6）。

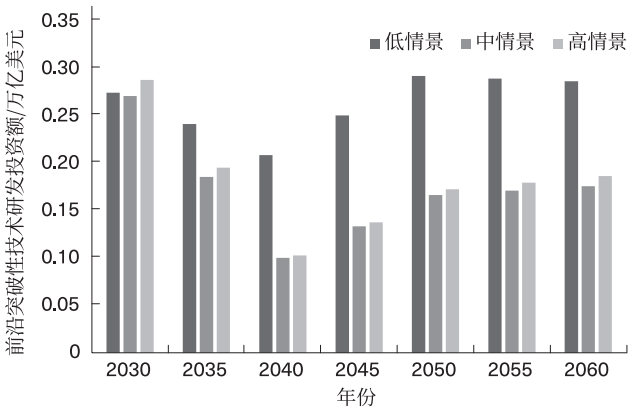

图 6　不同人口情景下的前沿突破性技术研发投资最优路径

结果表明，低人口情景在 2035 年以后各阶段的最优投入均明显高于中情景与高情景，而中情景与高情景在多数年份接近。人口下降并伴随老龄化加深时，最优解更倾向于加大前沿研发强度，而在人口由中情景升至高情景的范围内，研发强度的变化幅度较小。

这样的模式表明，老龄化冲击下的经济约束收紧在技术研发投资决策中占据了主导地位。对比中、低人口情景，老龄化导致的劳动年龄人口占比下降意味着单位劳动需承担更多的社会福利、能源支出等负担。由于有效劳动供给下降与资本积累放缓，经济支出约束加速收紧，更迫切需要降低能源技术成本。因此，经济系统对技术进步的依赖程度上升，研发投资的边际价值上升，推动最优方案向更高的研发强度倾斜。与此相反，在中情景到高情景的区间内，经济规模可能已足以吸收既定排放约束带来的成本冲击，排放约束的影子价格变化有限，故前沿研发最优强度的变化幅度较小。

可见，尽管人口下行与老龄化趋势可能抑制总体能源需求，但这并不必然意味着对低碳创新的需求同步下降，反而可能加剧对前沿突破性技术的依赖。人口演变是影响“双碳”目标实现路径的重要变量，需要在系统观念下深入研究。

3.3 其他因素的可能影响

上述分析中，本文探讨了减排时序与人口变量对技术创新投资方向和强度的影响，评估了宏观趋势性变化对最优决策路径的影响。本节进一步简要提出若干尚未纳入模型的重要影响因素并讨论其潜

在效应。

首先是数智化技术的发展。一方面，数智化技术可提升全要素生产率，使研发资金更为充裕；在能源系统、交通、建筑等多个领域中也展现出优化运行、提升能效的潜力，有望赋能减排与转型。另一方面，数智化技术的发展也带来显著的能源消耗压力，尤其是在算力密集型应用快速扩展的背景下，其对电力需求和碳排放的影响不容忽视。因而，数智化转型对技术创新既是推动力量，也可能成为新的资源约束因素。在分析技术路径与研发投入时，应系统评估其对知识增长与能源系统的双重影响，确保避免高能耗的数智化应用掣肘低碳转型的长期空间。

其次是资本存量的更替。更快的资本更新可淘汰高碳资本，缓解来自高碳基础设施的碳锁定效应，进而可能降低对降成本型技术创新的总体需求。与此同时，更快的资本更新本身也是一种加速的社会经济代谢过程，可能伴随更高的能源资源需求，从而在短期内可能加重减排压力。因此，需要系统评估加速资本转型是否会产生净效益，探讨如何通过政策设计引导合理的更新周期，兼顾减排需求、技术演进与经济承载能力。

最后是人民生活水平提高与消费偏好变化。随着人均收入增长和生活水平不断提高，居民消费结构正从以生存型、基础型消费为主，逐步向发展型、享受型和服务型消费转变。生活水平提升所伴随的消费结构演化，既可能影响短期的能源资源压力，也可能在长期内推动绿色低碳生活方式的普及，对创新路径选择和研发投入方向产生影响。

4 结论与政策建议

（1）充分考虑低碳技术创新的核心特点，提升研发资金配置效率。绿色低碳技术的研发普遍面临高度不确定性、回报滞后以及收益分布偏斜等挑战。其中，具备前沿突破潜力的关键技术在实现长期深度减排方面具有不可替代的作用，需要持续的较高强度投入。同时，先进适用技术在近中期减排中具有更直接的落地空间，减排贡献主要通过规模化扩散和持续迭代释放。因而，研发资金配置需形成前沿突破性技术攻关与先进适用技术推广迭代相结合的组合结构，以兼顾远期深度减排潜力与近期减排效率。尤其是为了确保未来的低成本减排可行性，当前的研发投资组合必须突破短期成本视角的局限，即使在缺乏当前成本优势的情况下，也需为具备长远潜力的关键技术保持必要的投入强度与战略冗余。现实中，这种以高成本、高风险换取远期不确定回报的特征，与市场主体偏好短期确定性收益的投资逻辑存在错配。若完全依赖市场机制配置资源，可能出现投资不足的问题。为缓解上述市场失灵，首先可增强碳价信号的可预期性和延续性，逐步完善碳市场的覆盖范围与定价机制，引导社会预期与低碳技术投资方向相一致。其次，财政支持体系应更充分考虑不同研发阶段的风险—回报特征，针对早期高不确定性技术，给予更高容忍度和更灵活的绩效评估方式，避免短期效率导向抑制潜在高价值技术的发展空间。同时，应优化激励结构，提升支持工具在关键领域的匹配度与指向性。此外，财政与绿色金融政策应实现协调联动，建立更具韧性的长期投融资体系，以提升对远期回报型技术的风险承受力。

（2）强化系统观念，构建跨部门协同的低碳政策体系。本文的结果表明，低碳研发的边际价值不仅取决于技术本身的特征，还可能受到系统中其他重要变量变化趋势的显著影响。正如模型分析所示，减排时序的快慢重塑了研发投入的窗口期与强度分布，而人口老龄化趋势则通过收紧劳动力与财政约束，显著放大了经济系统对前沿技术进步的替代性需求。这样的联动关系意味着，技术研发作为低碳转型中的关键决策变量，必须嵌入复杂的社会经济系统进行考察。在政策实践中，应强化跨部门协同和长期视角下的系统筹划。需超越部门视角，从系统性整体出发，统筹能源系统、产业系统与社会系统的协同演化路径。在能源系统中，技术路径选择与资源配置需兼顾未来消费结构与终端用能模式的变化；在产业系统中，低碳转型涉及的不仅是关键工艺和设备的升级，更包括价值链条中上下游的联动变革，应通过标准牵引、示范推广与供应链协同加速先进适用技术的规模化应用，并通过工程验证与示范工程打通前沿突破性技术从研发到产业化的关键环节；而在社会系统中，消费行为、生活方式及公众预期将深刻影响技术采纳节奏与治理路径的可持续性。因此，应构建跨系统的政策协调机

制，推动不同领域之间形成动态一致的技术需求反馈与资源联动机制，实现财政、产业、社会等领域政策的协同设计和联合实施。

（3）增强政策前瞻性，将长远趋势纳入当前决策。本文分析显示，未来几十年长期趋势所塑造的减排边界条件，可能反向决定当下的研发投入是否充足。例如，模型结果表明，即便是在制定 2030—2040 年的投资计划时，也需要将 2040 年之后的减排时序安排与人口老龄化演变等长期变量纳入考量，否则容易造成研发布局与长远需求脱节，技术发展偏离最优路径。这要求研发支持体系具备前瞻性视角，并在制度层面构建起动态评估的策略。建议在国家层面建立滚动式技术路线图与情景评估框架，并在《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》等政策文件的基础上，常态化开展关键技术成熟度评估、成本学习与扩散路径监测、政策成效量化评估。路线图设计也可区分前沿突破性技术与先进适用技术两类对象，前者强调长期攻关和不确定性管理，后者强调扩散监测、应用成效评估与政策工具的动态校准，以提升转型政策在不同阶段的适配性。同时，可加强支持社会学习的制度基础，通过信息反馈机制，以及与学术界和产业界的持续互动，不断修正和更新对人口演变、资源约束、人工智能技术发展等关键变量的判断，增强政策体系对未来路径不确定性的适应性，确保当前政策议程能够对接未来需求，真正把握绿色低碳转型的战略主动权。

参考文献

[1] 王灿 . 碳中和愿景下的低碳转型之路 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 13-15.

[2] SUN Y D, ZHU S P, WANG D P, et al. Global supply chains amplify economic costs of future extreme heat risk[J]. Nature, 2024, 627(8005): 797-804, doi: 10.1038/s41586-024-07147-z.

[3] IEA. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector[R]. Paris: IEA, 2021.

[4] THE CORE WRITING TEAM, LEE H, ROMERO J. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: IPCC.

[5] ACEMOGLU D, AGHION P, BURSZTYN L, et al. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131-166, doi: 10.1257/aer.102.1.131.

[6] COPPENS L, DIETZ S, VENMANS F. Optimal climate policy under exogenous and endogenous technical change: making sense of the different approaches[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2025, 133: 103216, doi: 10.1016/j.jeem.2025.103216.

[7] WEBSTER M, FISHER-VANDEN K, POPP D, et al. Should we give up after Solyndra? Optimal technology R&D portfolios under uncertainty[J]. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 2017, 4(S1): S123-S151, doi: 10.1086/691995.

[8] JIN W. Path dependence, self-fulfilling expectations, and carbon lock-in[J]. Resource and Energy Economics, 2021, 66: 101263, doi: 10.1016/j.reseneeco.2021.101263.

[9] 段宏波 , 朱磊 , 范英 . 能源—环境—经济气候变化综合评估模型研究综述 [J]. 系统工程学报 , 2014, 29(6): 852-868, doi: 10.13383/j.cnki.jse.2014.06.014.

[10] FERNÁNDEZ-VILLAVERDE J, GILLINGHAM K T, SCHEIDEGGER S. Climate change through the lens of macroeconomic modeling[J]. Annual Review of Economics, 2025, 17: 125-150, doi: 10.1146/annurev-economics-091124-045357.

[11] PASQUALINO R, PEÑASCO C, BARBROOK-JOHNSON P, et al. Modelling induced innovation for the low-carbon energy transition: a menu of options[J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(7): 073004, doi: 10.1088/1748-9326/ad4c79.

[12] NORDHAUS W D. Rolling the “DICE”: an optimal transition path for controlling greenhouse gases[J]. Resource and Energy Economics, 1993, 15(1): 27-50, doi: 10.1016/0928-7655(93)90017-O.

[13] POPP D. ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2004, 48(1): 742-768, doi: 10.1016/j.jeem.2003.09.002.

[14] POPP D. Comparison of climate policies in the ENTICE-BR model[J]. The Energy Journal, 2006, 27(S1): 163-174.

[15] POWELL W B. Perspectives of approximate dynamic programming[J]. Annals of Operations Research, 2016, 241(1): 319-356, doi: 10.1007/s10479-012-1077-6.

[16] YUE X, ZHOU H, CAO Y, et al. Large potential of strengthening the land carbon sink in China through anthropogenic interventions[J]. Science Bulletin, 2024, 69(16): 2622-2631, doi: 10.1016/j.scib.2024.05.037.

[17] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2024[R]. New York:

United Nations, 2024.
[18] IEA. Energy Technology RD&D Budgets[R]. Paris: IEA, 2020.
[19] BRETSCHGER L. Malthus in the light of climate change[J]. European Economic Review, 2020, 127: 103477, doi: 10.1016/j.euroecorev.2020.103477.
[20] BRETSCHGER L. Nature and the ultimate resource: sustainability with poor input substitution[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2025, 133: 103209, doi: 10.1016/j.jeem.2025.103209.

Investment Allocation and Pathway Optimization for Technology R&D Supporting Deep Decarbonization

XU Shuntian[1], WANG Can[2,3], ZHU Junming[1*]
(1. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Climate Change and Sustainable Development, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Achieving CO_2 peaking and carbon neutrality targets requires sustained low-carbon technological progress and large-scale deployment. Investment allocation in R&D is the key driver of low-carbon technological progress, involving joint decisions over investment intensity, timing, and technology portfolios. This study develops a China energy-economy optimization model with endogenous technological change. It distinguishes between advanced applicable technologies and frontier breakthrough technologies based on the uncertainty characteristics of R&D returns, and analyzes the optimal R&D investment pathways toward carbon peaking and carbon neutrality targets using a multi-stage stochastic dynamic optimization framework. The results show that uncertainty in R&D returns substantially increases the optimal investment intensity for frontier breakthrough technologies. To capture the "high-risk, high-reward" opportunities under uncertainty, maintaining a relatively high level of R&D effort is essential for ensuring the feasibility and cost-effectiveness of long-term emission reductions. Further analysis incorporating mitigation timing and population scenarios reveals that R&D investment trajectories begin to diverge in the near to medium term across early-action, linear, and delayed-action decarbonization pathways, indicating that R&D deployment strategies need to account for the long-term orientation of climate policy. The low-population scenario requires more than twice the R&D investment in frontier breakthrough technologies compared to medium- and high-population scenarios, providing a scenario-based illustration of the systemic influence of socio-economic structural changes. Based on these findings, the paper recommends systematically strengthening the support systems for innovation activities across both mature and emerging technologies, enhancing cross-sectoral and cross-disciplinary coordination, and establishing forward-looking mechanisms for technology foresight and assessment.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality targets; technological innovation; R&D investment; pathway optimization