

创新、内生增长与气候变化: 2018 年度诺贝尔经济学奖 得主的贡献简评

段宏波^{1,2} 蔡宗武²

(1. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190;

2. Department of Economics, University of Kansas, Lawrence, USA KS66045)

摘要: 2018 年度的诺贝尔经济学奖颁给了著名美国经济学家 William D. Nordhaus 和 Paul M. Romer 教授, 以表彰其在技术创新、气候变化和内生经济增长领域的卓越贡献。稀缺性是经济学的核心属性, 而知识和创新是我们应对自然资源稀缺性制约的有效手段, 两位诺奖获得者通过构建市场经济与自然资源和知识的交互作用模型, 有力拓展了经济分析的范畴。Nordhaus 的研究主要集中在气候变化经济学领域, 他提出了分析全球变暖问题的经济学方法, 将新古典经济理论与大气物理、化学等方法相结合, 开创性地建立了动态集成的气候经济模型 (DICE), 对社会碳成本 (SCC) 管理以及基于市场机制的气候变化解决方案进行了深入研究。Romer 的主要贡献是创新性地提出了四要素增长理论 (自然资本、劳动、人力资本和知识创新), 建立了内生经济增长模型, 将知识作为资本投入考虑到经济和技术体系中, 模拟了经济决策和市场条件决定新技术创造的过程。Romer 的理论重新燃起了经济学界对内生增长的浓厚兴趣, 实践层面也引导产生了大量的相关法规和政策。本文旨在对两位教授在技术创新、气候变化和内生经济增长领域的主要研究成果进行梳理和总结, 简评相关理论的应用进展及实践贡献, 继而揭示对未来国内外相关研究和政策设计的指导性意义。

关键词: 诺贝尔经济学奖; 研究贡献简评; 气候变化; 技术创新; 内生经济增长

DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2018.10.001

引 言

2018 年 10 月 8 日, 诺贝尔经济学奖评选结果在瑞典首都斯德哥摩揭晓, 耶鲁大学的 William D. Nordhaus 教授和纽约大学的 Paul M. Romer 教授由于其在技术创新、气候变化和内生经济增长等方面的杰出贡献而共同获得本年度的诺贝尔经济学奖。根据诺贝尔评奖委员会的公告, 两位经济学家的贡献是方法论层面的, 其研究为我们理解内生经济增长与气候变化的根本原因和潜在后果提供了清晰的洞见。他们发展了一系列方法来解决当前时代面临的最基本和最迫切的问题: 全球经济的可持续发展和世界人口福利的改善。尽管实现稳定、绿色、可持续的全球经济增长需要更多学者和利益相关方长期不懈的努力, 但本届诺奖得主们的研究发现让我们能更加接近所寻求问题的答案。

诺奖评审委员会将奖项颁给 William Nordhaus 和 Paul Romer 很大程度上暗示着两位经济学家在技术创新、气候变化和内生经济增长研究方面做出了共同的贡献。事实上, 两者的研究确实存在紧密的关联。Nordhaus 的主要获奖贡献是率先将宏观经济、地球物理、大气化学相耦合, 构建了动态气候经济集成评估框架, 为系统研究气候变化对经济增长和人口福利的影响提供了基本范式, 为潜在气候变化损害的减缓提供了有效政策解决方案。Nordhaus 对气候变化风险进行综合经济评估的方法基底依然是 Solow-Ramsey 分析思想, 评估优化的实现本质上体现的是人类经济活动产生的污染流量 (负外部性) 引起环境污染存量增加, 继而造成经济反馈损失的过程; 且技术创新, 尤其是能源技术的创新在其提出的“净经济福利” (负外部损失内部化) 概念中扮演着重要的角色, 也很大程度上左右着集成优化评估的过程^[1]。同样, Romer 的研究也基于 Solow 内

收稿日期: 2018-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71874177; 71631004; 71503242)。

作者简介: 段宏波, 中国科学院大学经济与管理学院副教授, 硕士生导师, 博士; 蔡宗武, 美国堪萨斯大学经济系 Charles Oswald 讲席教授, 博士生导师。

生经济增长理论的拓展。Solow 模型发现了由储蓄率、人口增长率和技术水平共同作用的人均资本和产出水平的均衡,这里的技术水平主要指全要素生产率(TFP)和要素的配置效率水平;Solow 模型揭示了 TFP 在经济增长过程中的重要性,但却没有告诉人们技术进步应该如何决定,Romer 正是从知识和创新的角度对这一开放命题进行了贡献,且研究了发挥知识正外部性效果的机制。由此可见,两位诺奖获得者都秉持了外部性内部化的探索思路,致力于开发技术创新在内生经济增长方面的潜力,Nordhaus 侧重于应对气候变化外部性挑战的视角,而 Romer 则更多地从经济增长驱动力本身出发。

本文的余下部分安排如下:第二部分聚焦 William Nordhaus 的研究和发现,着重评述其主要的学术贡献及影响;第三部分同平面切换到 Paul Romer;最后是全文总结,以期对未来国内外的气候变化和内生增长研究提供可借鉴的思路,并启示相关经济和环境政策的制定。

William D. Nordhaus 的研究贡献

Nordhaus 教授早期的研究主要集中在经济周期、宏观增长、劳动工资、价格与税收、利润与生产率等传统经济学领域,同时对中国、东欧和前苏联等地区的经济转型和改革也抱有浓厚的兴趣。自上世纪 70 年代开始,其研究重心开始逐步向气候和环境经济学转型,取得了一系列举足轻重的学术成果,尤其是开创性地发展了全球变暖经济学研究方法,为人类应对气候变化挑战提供科学解决方案,这也为今下获颁诺贝尔经济学奖埋下了伏笔。Nordhaus 为世人所知源于其与诺奖得主 Paul A. Samuelson 合著的《经济学》,这本书被誉为当前世界上最为实用和畅销的经济学教科书,并被邀请多次再版^[2]。Nordhaus 能被 Samuelson 选为《经济学》新版的合著者当然不仅限其在传统经济领域的已有作为,更多是鉴于其在经济学新领域——气候变化经济学方向的探索和贡献,这些初创性研究也使得他成为了这一时下热门领域的奠基人。

提及 Nordhaus 的研究贡献必然离不开“气候变化经济学”、“综合评估模型(IAM)”等关键词。基于此,本部分将分别从气候变化经济学、综合评估模型以及综合评估框架的拓展应用等几个方面来展开评述。

1、气候变化与气候变化经济学

气候变化是人类活动可能引起的全球变化的重要部分,传统意义上,是涉及地球物理、大气化学、生态学等纯自然科学的研究范畴。温室效应(greenhouse gases effect, GHGs)是气候变化的核心内涵,它表征了从温室气体(包括二氧化碳 CO₂、氮氧化物 NO_x、甲烷 CH₄ 以及氢氟碳化物 HFCs 等)排放到温室效应形成,再到气候反馈损失的全过程,即人类生产生活活动不可避免地产生大量的温室气体排放,当排放的速度超过自然沉降率时,会打破原始的碳循环引起排放流量到存量的转化效应,不断累积的存量的作用效果是使得地表平均温度升高,继而对人类社会带来一系列不可估量的负影响^[3,4]。基于此,政府间气候变化专家委员会(IPCC)推出的前两次综合评估报告(AR1-1990 和 AR2-1995)均以自然科学工作组的研究为支撑。

事实上,大气化学、生态学、地球物理等自然科学方法的优势主要在于帮助人们认识气候变化过程,同时提供气候变化事实证据,并分析气候变化的潜在成因,而在气候变化对人类社会的影响定量、可能损失的价值评估和政策应对选择等重要方面难有效力,这也为经济学的介入提供了契机。Nordhaus 正是把握了这一良好契机,开创了气候变化经济学的研究。从经济学角度看,气候变化问题主要由于排放负外部性的存在:每个人都贡献了不等量的温室气体排放,却没有为此付出成本,而一旦排放累积引起温室效应,气候损失则由全社会承担。因此,长期来看,人类赖以生存的整个地球环境将很可能沦为“公地悲剧”,这显然是经济学中广泛探讨的市场失灵的表现。1982 年,Nordhaus 在美国经济评论(The American Economic Reviews, AER)上发表的短文充分反映了那一时期气候经济学思想的萌芽,他在文中对化石燃料燃烧相关的碳排放引起的全球变暖影响进行了初步认识,即我们应该视气候变化如自然资源稀缺性一般为诅咒,还是可以像对其他公共物品一样进行收益-成本角度的经济评估。事实上,温升引起的全球负外部性是一种比自然资源稀缺性更难以应对的挑战,工业革命以来全球经济增长的实践表明,技术进步可以带来大幅规模报酬递增效应,这为打破资源诅咒促进经济稳定增长提供了可能;相反,由大气中温室气体累积所引起的负外部影响不可逆且难以消除,特别是以 CO₂ 为代表的温室气体存量、惰性强、衰减慢,一旦温室效应突破社会经济系统的临界值(tipping point),其对人类的影响很可能是灾难性的^[5]。此外,他在文中还进一步指出,人类旨在减少温室气体排放的政策措施必须经由经济系统方能发挥效力^[6]。该文尽管简短,但涉及的很多气候变化研究议题至今仍占据主流,包

括对排放控制国际合作的论述、政策选择的机制设计以及多重不确定性所扮演的角色等。

此后,气候经济学的内涵在一系列经济学家的研究和探讨下得到了不断丰富和深化。例如:Cline^[7]较早出版了《全球变暖经济学》一书,从成本-收益角度系统估算了长期变暖的经济损失,涉及农业影响、海平面上升、林业损失、水资源短缺和空调电力需求增加等诸多方面,并讨论了动员各国共同应对气候挑战的可能机制,开启了全面推动气候变化经济学研究的序章。Nordhaus 本人也在 1994 年出版了一部题为《管理全球公地:气候变化经济学》的专著,首次系统提出了构建碳循环系统与传统经济系统动态耦合的设想,为后期综合评估模型的发展奠定了基础^[8]。Fankhauser^[9]和 Mendelsohn 和 Neumann^[10]的工作也进一步稳固和深化了气候变化与经济分析间定量关系的研究框架。在 Nordhaus 等学者的研究引领下,自 2001 年的第三次综合评估报告(AR3)开始,气候经济研究在 IPCC 后续历次报告中扮演了越来越重要的角色,尤其在第三工作组和第四工作组的报告研究中^[11]。

2、气候变化综合评估模型

认识到气候变化的经济属性,并提出从经济角度审视全球变暖的影响只是气候经济学研究的开端,更复杂的是如何程式化气候-经济分析框架,量化气候变化的影响。这一复杂的问题显然也在相当长时期内困扰了在传统经济学领域不无建树的 Nordhaus 教授,通过梳理其发表记录不难发现,自其研究重心转移开始的后续 10 年里,其在主流经济学顶级期刊发表的文章数量显著下降(例如:10 年间仅在 AER 发表 1 篇)。事实上,对气候-经济研究框架的程式化即构建气候经济系统集成模型,而这一目标的实现面临着诸多困难。首先,气候变暖本身具有许多复杂的属性,例如:全球性(形成的全球性、影响的全球性以及合作解决的全球性)、长期性(排放过程的长期性以及排放控制和损失减缓过程的长期性)、外部损害性(对自然系统与社会经济系统的损害)、技术依赖性(能源系统低碳化转型、无碳技术的内生进步)、不确定性(反馈损失的不确定性、技术发展的不确定性、经济增长的不确定性)等,而模型构建需要反映所有这些必备属性,这使得气候-经济建模成为了一个多维度、多领域交叉的复杂科学问题^[1]。其次,刻画这些属性要求建立传统宏观经济框架与大气碳循环、生态系统、能源系统等复杂交互关系,以反映经济活动产生碳排放,到改变大气循环系统和生态系统,再反馈作用到经济系统的全过程,完成这一任务对于仅具有人文社科领域研究经历的学者而言,面临的挑战是不言而喻的。再次,复杂系统模型建立之后,其有效性的验证和实践实施还严格依赖于优化算法的编制以及大规模数值模拟实验的开展;因此,无论从软件还是硬件上还面临着较大的挑战,尤其在计算机技术还远落后于当下的 30 年前。

鼓舞人心的是,尽管历经重重困难,Nordhaus 教授在强压之下依然推出了第一个从经济视角研究经济、排放、气候变化的系统模型—动态集成的气候经济模型(DICE),该模型后来成为了气候变化综合评估模型(IAM)家族的奠基之作。Nordhaus 从传统宏观经济角度给出了对气候变化问题的理解,即人为排放在大气系统中由流量到存量的转变过程可以看作一种自然“负资本”的累积,而我们采取的应对全球变暖的排放控制行动则是减缓这一“负资本”累积的“正投资”,这要求人们在放弃当前可用消费与获得未来更多长期消费两种选择中间找到平衡^[1,12]。基于此,DICE 模型以新古典经济理论为基础构建了描绘人类生产、投资和消费等活动的宏观经济子模块,同时通过耦合三碳库模型(three carbon-reservoir)和简化的气候模型刻画了社会经济系统与碳循环和大气系统间的复杂动态关联,建立了综合评估模型的基本研究框架,如图 1 所示。

在人均消费水平不断增长和边际消费效用(marginal utility of consumption)逐步递减的事实下,DICE 模型以贴现的代际全球福利效用最大化为目标,通过跨期优化消费流寻求系统的最优解方案。这里的效用是对数化的人均消费水平的函数^①,代际人均消费的重要性通过人口规模大小表征,而跨期的效用分配则取决于消费贴现因子,后者由纯时间偏好率和边际消费弹性共同决定^[13]。具体地,记 W 为福利目标函数,表示为贴现的人口加权的消费效用之和, c 为人均消费,则

$$W = \sum_{t=1}^T U(c(t), L(t)) R(t)$$

此处 $L(t)$ 为人口表征的劳动力投入, $R(t)$ 是效用的跨期贴现因子,且 $R(t) = (1+\sigma)^{-t}$ 。效用函数 $U(t)$ 可表

①此处的消费应理解为广义消费(generalized consumption),既涵盖传统市场化的商品和服务消费,同时也包括非市场化的消费项目,例如闲暇、健康状况和环境服务等。

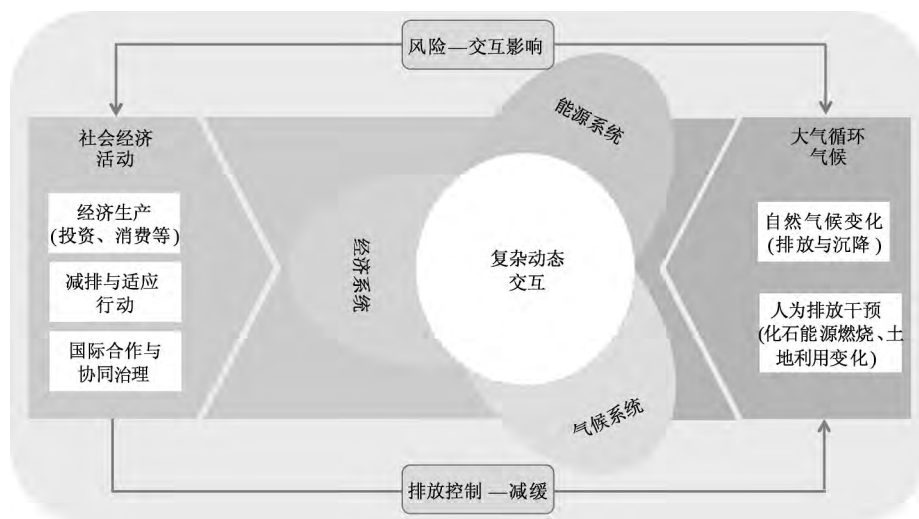


图 1 气候变化综合评估模型的一般性框架

示为

$$U(c(t), L(t)) = L(t) \left(\frac{c(t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right)$$

这里暗含了三点假设：其一，假设存在全球层面的中央计划者，负责整个集成系统的优化决策，且其行为具有完美预见性^②；其二，边际消费效用弹性 α 是非时变的常量，可理解为对代际效应分配不公平性的厌恶程度。一般而言，弹性表征了不同代际边际消费效用的递减状况，当 α 接近于零时，则意味着代际效用是可以完全替代的，此时决策者对不公平性的厌恶程度较低；而当 α 接近 1 时，则表示决策者是高度不公平性厌恶的；其三，单个时期内消费的价值是与人口数量成比例的。

Nordhaus 在其 2013 年的更新版 DICE 模型手册中指出，DICE 既可以被视为政策优化模型，也可以理解为简单的复杂系统预测模型，但无论作何种理解，最大化中央计划人的经济目标函数都是十分关键的环节^[13]。那么，我们应当如何理解模型优化的结果呢？Nordhaus 在该模型手册中给出了答案：从一般性角度看，模型优化是一种模拟竞争市场系统行为的方式；从规范视角看，优化结果为比较气候变化背景下各种替代路径或政策机制对经济福利的影响提供了可能。

随后，Nordhaus 与其华人学生杨自力一起将单区域的 DICE 模型拓展到多区域层面，构建了多区域集成的气候经济模型 RICE^③，并基于该模型分析了气候变化政策中不同国家的战略选择，即纯粹的市场竞争解决方案（完全不合作）、有效多方合作结果（完全合作纳什均衡）和非合作均衡（有限合作）。该研究发现：整体上，与非合作策略相比，合作策略将带来更高的减排水平；对不同国家而言，合作策略与非合作策略下的排放控制水平存在很大差异，而高收入国家很可能在合作中付出更高的经济代价^[15]。基于该模型的最新成果为 2010 年由 Nordhaus 主笔发表在美国科学院院刊（PNAS）上的文章，该文基于 RICE2010 讨论了实现 2℃ 温升目标所需要的碳价路径，认为即使各国如期完成“哥本哈根协议”既定的减排任务，也很难达成全球温控 2℃ 的目标^[16]。基于两个模型的研究实践，Nordhaus 给出了气候变化综合评估模型的一般性运行流程，如图 2。此外，Nordhaus 还致力于 DICE 和 RICE 模型的持续更新和代码共享，贡献模型的大力推广和应用；最新的 DICE 模型版本为 DICE2016，RICE 模型版本为 RICE2010，模型的程式和代码均可在其个人网站上免费下载，且包括 Excel 和 GAMS 两个软件版本。

②DICE 模型要求消费、投资和能源等一系列内生变量都最终服务于代际贴现福利（效用）的最大化，这实际上就将求解问题转变为给定一组价格寻找市场均衡的传统经济学分析。因此，只要是市场手段（无论是庇古税或排放许可）来控制排放，福利最大化目标都需要在市场均衡的状态下实现；而根据 Arrow 不可能性定理，这需要假设代际系统中存在中央计划者^[14]。

③早期的 RICE 模型将全球拆分为八大国家和地区，中国、美国等经济、人口和碳排放大国单列，其他国家划分在不同的区域之中，涉及 OECD-欧洲、中低收入地区、中等收入地区和高收入地区等几大类；每个区域独立决策，在设置的不同博弈情景中作出选择。模型假设人口增长趋于稳定，并引入能源投入作为 CD 生产要素，一定程度上拓展了 Solow 模型，但其技术变化依然是作的外生假定，这也是后来 Romer 的主要贡献之处。

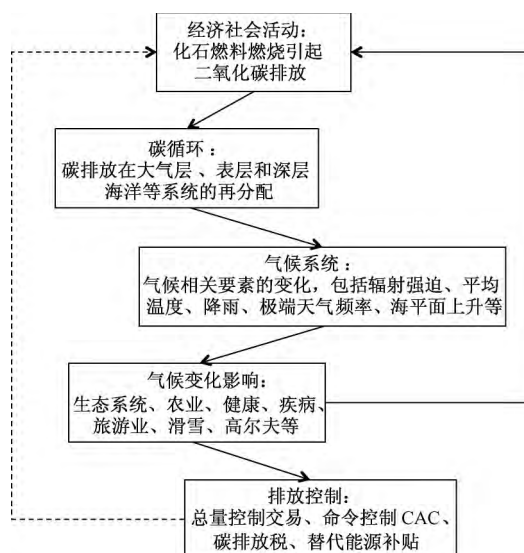


图 2 综合评估模型的运行优化流程

3、IAM 框架的拓展应用

自 Nordhaus 提出发展 IAM 的构想以来, 诞生了一系列以其 DICE 模型的雏形为基础的综合评估模型, 代表性的多区域模型包括: Peck 和 Tiesberg^[17] 于上世纪 90 年代开发的碳排放轨迹评估模型(Carbon Emissions Trajectory Assessment ,CETA) 经济合作与发展组织(OECD) 主导开发的 GREEN 模型(GeneRal Equilibrium EnbiroNmental Model) ^[18] ,以 GREEN 为基础由麻省理工学院(MIT) 团队主持构建的排放预测与政策分析模型(Emissions Prediction and Policy Analysis Model ,EPPA) ^[19] ,著名能源经济学家 Alan S. Manne 等合作发展的全球和地区温室气体减排政策影响模型(Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reductions policies ,MERGE) ^[20] ,1992 年由剑桥大学商学院的 Chris Hope 教授为研究欧盟问题而发展的温室气体影响政策分析模型(Policy Analysis for the Greenhouse Effect ,PAGE) ^[21] ,以及 2006 年由意大利马特艾基金会(Fondazione Eni Enrico Mattei ,FEEM) 主导开发的全球技术变化混合模型(World Induced Technical Change Hybrid model ,WITCH) 等^[22]。因此可以说,Nordhaus 搭建的气候-经济耦合研究框架引领了气候变化综合评估模型发展的趋势,同时也掀起了世界各国气候政策探讨和集成经济分析的潮流^[23]。

近 20 年里,对 DICE 以及 RICE 模型的拓展主要集中在技术进步的内生化和不确定分析方面^④:对前者而言,代表性的模型有内生技术低碳化模型(DE-carbonisation Model with Endogenous Technologies for Emission Reductions ,DEMETER)、内生技术变化的气候经济集成模型(Endogenous Technological change Integrated Climate Economy model ,ENTICE) 以及 Logistic 技术驱动的 3E 系统集成模型(Energy-Economy-Environment Model with Endogenous Technological change by employing Logistic curves ,E3METL) 等^[24-26];而 IAM 的不确定性分析则包括基于 DICE 的直接随机化和针对其他派生模型的不确定性研究^[5, 27-30]。经过数十年的发展, IAM 模型已在研究不同减排情景下的能源需求变化、碳排放路径变化、边际减排成本分析、气候损失估计、潜在政策评估等诸多方面产生了大量的应用实践,这些模型发展和实际应用已使得 IAM 模型逐渐成为了研究气候变化问题的主流工具^[31]。

Paul M. Romer 的研究贡献

如果说描述 Nordhaus 教授学术贡献最贴切的关键词是“气候经济学”和“综合评估模型”,那么 Romer 教授的关键词则是“内生经济增长”和“技术创新”,这也符合诺贝尔经济科学奖颁奖词中的描述。事实上, Romer 教授与其导师 Robert E. Lucas 是新增长理论的主要创建者,整体上,两者均将关注重心放在了人力资

④这里也体现了很多 Paul Romer 教授的贡献,本文将在第三部分详述。此外,William Nordhaus 教授的代表性贡献还包括提出“净经济福利指标”(net economic welfare),该指标是当前被世界各国广泛讨论的“绿色 GDP”概念的前身。本文研究的关注点在于诺奖成果,故对此未作详述。

本对经济增长的贡献上,但 Romer 明显更关注人力资本与创新知识在非竞争性和排他性上的区别。Romer 的研究为突破新古典经济增长理论的局限性提供了可能的途径;特别地,其提出的“内生经济增长理论”为传统经济增长研究提供了新的视角。围绕内生增长,Romer 教授还在技术创新、知识溢出模型方面有一系列开创性学术成果。基于此,本部分将从这几个关键方面对其具体学术成就及其影响进行梳理和简评。

1、Solow 模型与内生经济增长

讨论 Romer 在内生经济增长方面的学术成就便不得不提及 1956 年 Robert M. Solow 在《经济学季刊》(The Quarterly Journal of Economics)发表的题为“对经济增长理论的贡献”一文,文中 Solow 教授将经济增长这个复杂宏观的议题用一个十分简单的模型表达了出来^[32]。在其模型中,经济体可以通过对部分产出的储蓄来实现资本的动态累积,而不断积累的资本主要两个用途:即资本的“广化”——为新增的人口提供资本和资本的“深化”——提升经济体中的人均资本存量^[33]。鉴于资本边际产出递减的事实,随着资本的积累,资本的边际产出最终趋零,此时经济体会达到一个均衡;而新增储蓄则全部被用于资本的“广化”,以满足人口增长对资本的需求。在均衡状态下,经济体中的人均资本以及对应的人均产出都会处于固定的稳态,这意味着经济体中人们的生活水平也会保持不变。那么,人均产出和人均资本由什么决定呢?Solow 的研究给出的答案是:人口增长率、储蓄率和技术水平。因此,如果这三个要素均保持不变,那么无论经济体处于何种发展阶段,其人均资本和产出水平都将随着时间的推移而趋于均衡。事实上,现实中很多国家的人口增长率和储蓄率在相当长时期内都是稳定的,那么促进这些国家经济增长的因素就只有一个——技术进步,或更加确切地说,全要素生产率(Total Factor Productivity, TFP) 这里的 TFP 既包括技术的进步演化,也涵盖配置效率的改进。

由此可见,技术之于经济增长的重要性分析首见于 Solow 的研究,但在其模型中技术是纯外生的变量,换言之,Solow 模型并没有阐释技术的形成和演化机理,这也为后来 Romer 的研究提供了突破口。Romer 对这个问题的深入探讨反映在其代表性论文“规模报酬递增与长期增长”中,该文开辟了在一一般均衡框架中研究内生经济增长的决定因素的可能性^[34]。具体地,Romer 构建了一个简单的两阶段模型,将允许部分溢出的私有知识考虑到连续可微的其企业生产函数 F 中,而产出依赖于企业特定的生产投入 k_i 和 x_i ;若总共有 N 个企业,则加总的知识水平 $K = \sum_{i=1}^N k_i$ 。为保证优化问题竞争均衡的存在性,Romer 假设对给定的知识存量 K ,生产函数 F 是凹的,这意味着当 K 为常量时, F 关于 k_i 和 x_i 是一次齐次的。基于此,并考虑到 F 与知识存量 K 间的正向关系,我们得到了规模报酬递增的生产关系,即给定任意的 $\phi > 0$,

$$F(\phi k_i, \phi K, \phi x_i) > F(\phi k_i, K, \phi x_i) = \phi F(k_i, K, x_i)$$

在 Romer 的这篇经典的研究中,其引入了“规模报酬递增”的概念来解释可持续的经济增长,而在传统的经济学中,投入要素的规模报酬通常被假定为是递减的。一般而言,知识可以视为是一种公共物品(Public Good),因而具有典型的非竞争性(Nonrivalry)和非排他性(Nonexcludability);当这种公共品被作为投入要素作用于生产时,就会引发显著的正外部性,从而导致规模报酬递增效应的出现,而一旦有了规模报酬递增效应,持续的经济增长也就成为了可能。总结起来,Solow 这份研究的贡献主要体现在三大方面:(1)揭示了知识这类带有外部性属性的生产要素的特性,发展了考虑知识投入的聚合产出函数,为经济长期稳定甚至快速增长提供了驱动力;(2)探讨了如何将边际收益递增和市场完全竞争统一在一一般均衡框架中,建立了考虑内生技术变化的竞争均衡模型;(3)阐明了在外部性存在的情形下市场竞争机制将导致次优结果的产生,因此政府应当通过征税或补贴等手段对市场进行干预,通过将外部性内生化来重新实现社会最优。

Romer 这篇文章的问世激发了宏观经济领域大批学者对内生增长的研究兴趣,其中不乏著名的经济学家在内生经济增长理论和实证研究方面完成的诸多优秀的工作。例如:1995 年的诺贝尔经济学奖得主 Lucas 从三个方面研究了经济增长的驱动机制,尤其强调了技术变化和人力资本的重要作用,这里的人力资本既可以通过教育培训产生,也可以依靠“干中学”(Learning-by-Doing, LBD)来累积^[35]。Barro^[36]基于 1960–1985 年间 98 个国家的历史数据分析了人力资本、政府消费、公共投资、教育以及政治稳定性对经济增长的影响。Grossman 和 Helpman^[37]研究了重要贸易国家知识溢出效应与经济增长的关系,发现国际贸易会引起与国内创新外部性共存的外部性的产生,而后者则将引起创新水平的下降;因此,贸易促进政策可以抑制创新外部性的不利影响,继而加速经济增长并提高贸易国家的福利水平。Aghion 和 Howitt^[38]基于熊彼特的创造性破坏过程发展了一个内生增长模型,强调了由知识累积诱导的旧技术和旧工业创新的过时性,并指出旧技术的及

时淘汰对经济增长有积极的影响。Stokey 和 Rebelo^[39] 利用内生增长模型定量评估了税收改革对经济增长的影响,并给出了模型和参数值选择的依据,其研究佐证了 Robert M. Lucas 的工作发现,即税收改革对美国经济增长率的影响较小。

2、内生技术变化

Romer 在内生增长模型中提到的技术(TFP)与知识的积累密切相关,而后者实际上是由市场中的经济体有目的的创造和推动的,这也暗示了“知识”或者“创意”不同于其他投入品的特殊性的存在。1990 年,Romer 在《政治经济杂志》发表了另一篇代表性论文,着重探讨了知识(人力资本)的正外部性作用于内生经济增长的过程^[40]。文中均衡模型的增长主要由技术进步驱动,而后者则由以利润最大化为目标的代理人作出的创意投资决策引发;这里的技术投入既不是传统商品也不是公共物品,而应该理解为具有非竞争性和部分排他性的独特物品。具体地,记劳动投入为 L ,人力资本为 H_Y , $x = \{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ 是企业的投入清单,则传统柯布-道格拉斯(Cobb-Douglas, CD) 生产函数可拓展为

$$Y(H_Y, L, x) = H_Y^{\alpha} L^{\beta} \sum_{i=1}^{\infty} x_i^{1-\alpha-\beta}$$

显然,该生产函数与传统 CD 函数的区别主要在于对人力资本投入的考虑,以及不同资本存量间相互替代的程度差异。均衡模型中,Romer 构建了三个经济部门,即最终产品生产部门、中间产品生产部门和研发部门。研发部门通过投资生产知识或创意,并将其卖给中间产品部门,而中间产品部门则产出耐用资本设备并将其租赁给终端产品生产部门以获得租金,而后者负责生产供经济体消费的最终产品。据此看来,合理分配三个部门的投入品(自然资本、人力资本和劳动)是保证经济稳定增长的关键环节。此中的政策问题主要在于研发部门的知识产出具有显著的外部性,使得研发的部门私有收益远小于其带来的社会收益;因此,为激励研发活动的开展,就需要尽可能将研发的外部效应内部化,以尽可能消减私人收益和社会收益之间的差异,此时,进行专利、版权、生产者补贴等政策机制的设计和法律法规的建设就显得尤其重要。此外,Romer 在文中给出经济增长 g 与总资本投入 H (人力资本 H_Y 与其他资本 H_A 之和)间的关系,即给定贴现率 ρ ,效用增长率 $\sigma \in [0, 1)$,这一关系可下式表示

$$g = \frac{\delta H - \Lambda \rho}{\sigma \Lambda + 1}$$

其中, Λ 由技术参数 α 和 β 共同决定,且 $\Lambda = \alpha / (1 - \alpha - \beta)$ ($\alpha + \beta$)。事实上,当参数 $\delta = 1$ 时,上式表达的关系可以简单描述为图 3^[40]。

尽管在当前看来,Romer 的很多研究发现,例如:知识创新对经济增长的驱动作用,研发知识的外部性等都显而易见,但在当时,TFP 在经济模型研究中一直是作为黑箱存在的,而 Romer 对打开黑箱的尝试无疑具有开创性意义。从谷歌学术(Google Scholar)的统计数据来看,Romer^[34, 40] 这两篇经典论文的单篇引用量都在 25 000 次以上,这也从侧面印证了其研究工作的巨大影响力。虽然此后相当长时期内,Romer 由于投身创业和“宪政城市”的试点而淡出了学界,但这些早期研究的革命性贡献仍然使得其加冕诺奖实至名归。

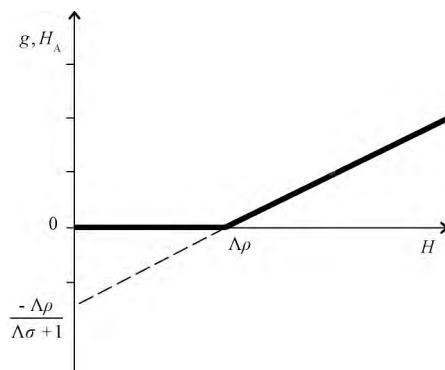


图 3 经济增长与资本存量(人力资本)间的关系演示

3、知识创新、内生增长与气候变化

通过对两位诺奖得主研究成果的梳理不难发现,Nordhaus 考虑的是如何把气候变化产生的负外部性内部

化到经济增长过程中,而 Romer 则致力于将具有正外部性的创新知识内生到经济增长过程。尽管两人的研究着力点显著不同,但都汇聚到一个经典问题:即如何与时俱进地认识经济发展并促进其可持续增长。表面上看,Romer 的研究与 Nordhaus 的工作不大相关,但实际上,Romer 的技术进步思想在 Nordhaus 的气候变化研究中有许多潜移默化的体现。根本上,温室气体排放的控制依赖于绿色低碳能源对传统化石能源的有效替代,而清洁能源的发展离不开知识创新驱动的技术进步^[41]。事实上,在 Romer 技术内生思想的影响下,许多学者在进行气候变化问题研究中普遍开始考虑在综合评估的框架中引入内生技术进步的效果,代表性的有 David Popp 教授基于 DICE 模型构建的 ENTICE 和 ENTICE-BR 模型^⑤,FEEM 于 2006 年发展的内生技术诱导混合模型 WITCH 以及 Duan 等于 2013 年开发的内生技术扩散驱动的 3E 系统集成模型 E3METL 等^[22 25 26 42]。

结论及展望

本文通过建立学术关键词集对 2018 年度诺贝尔经济科学奖得主 William D. Nordhaus 教授和 Paul M. Romer 教授的研究贡献进行了梳理和简评,其中 Nordhaus 的学术成就主要体现在“气候变化经济学”和“综合评估建模”等方面的奠基式贡献,而 Romer 的开创性研究则集中于“知识创新”和“内生经济增长”。具体地,尽管 Nordhaus 教授在传统宏观经济领域不乏建树,例如:机会主义周期理论的提出、对新兴市场经济改革的分析以及“净经济福利”指标的首创等,但其最突出的贡献依然集中在对气候变化问题的开创性研究,包括发展气候经济学的分析范式,实现地球物理、大气化学和生态学等自然科学工具与传统经济理论的系统融合,并构建基础性的综合评估模型框架等,这些工作对全球能源资源的有效利用、排放控制政策的制定以及国际合作应对气候变化挑战意义重大。Romer 的研究主要关注经济可持续增长的驱动机制,即将知识创新和人力资本作为与实物资本相等投入品内生到经济增长模型中,提出了著名的“四要素”内生增长理论,率先认识并探讨了知识的正外部性及其在促进资本深化、推动生产的规模效益递增方面的积极作用。Romer 创立的新增长理论打破了传统经济理论的研究桎梏,为发掘经济增长的内生驱动力提供了有效途径,特别是在当下传统经济增长引擎发力不足、人口红利普遍消失、可持续发展转型紧迫的多重压力下。

经济学的核心任务是探讨如何在有限的资源约束下通过资源最优配置来实现经济福利的最大化。世界经济发展到今天,可持续的增长除了受到土地、矿产、能源、水等传统意义上的自然资源约束外,还受制于最大的外部约束——环境(包括地球环境和大气环境);因此,人类经济社会的发展已逐步告别了单纯追求经济增长和发展效率的时代,转而向绿色可持续增长的新阶段过渡,这一阶段对增长模式和发展质量提出了更高的要求,尤其是如何建立社会经济系统与自然生态系统的良性互动,减缓气候变化和局地环境污染对经济社会的反馈影响,促进人与自然的和谐发展等。Nordhaus 和 Romer 的研究对这一系列关键问题提供很好的解答,为后人对绿色可持续增长的拓展和深化研究以及政府层面相关的政策引导和机制设计均具有普适启发性意义。

从研究角度看,首先,尽管自 Nordhaus 推出经典的 DICE 模型以来,IAM 得到了前所未有的发展和应用,但当前来看颇具影响力的模型均发展自美国或欧洲等地,而中国等新兴经济体国家在模型发展方面的实力整体偏弱,这意味着推动针对发展中国家气候经济研究的 IAM 发展依然是一项极具前景的工作^[43]。其次,在 Romer 内生技术变化思想与 IAM 的结合方面可续有作为。事实上,内生增长理论模型有两类:一类建立在 Kenneth J. Arrow 教授 1962 年提出的“干中学”思想上^[35 44],另一类即 Romer 提出的将不完全竞争和内生技术进步综合考虑的内生增长模型^[33 40];而当前来看,IAM 框架下考虑的内生技术多归属第一类,即利用所谓的单因素或双因素学习曲线来内生刻画能源经济系统中的技术演变^[22 26 45 46]。再次,IAM 对未来长时间尺度内气候变化影响的分析严格依赖于经济发展与关键气候变量间确切历史关系的确定(对应到 IAM 中气候损失对经济产出作用函数的参数取值),而目前无论是全球层面还是就中国而言,对这一关系的认识均十分有限,其依赖于经济、能源、气候等多维大数据系统工作平台的建立和更多实证估计工作的开展。

中国目前正处于产业结构转型、探索新型经济增长路径的关键时期,Nordhaus 和 Romer 的研究和思想将

⑤Popp^[25]通过实证估计能源研发与 GDP 增值间的历史关系,将生产函数的能源投入进行了细分(能源投入和非能源投入),特别将能源研发创造的知识资本作为一种替代传统能源的投入要素作用于生产,从而在经济增长中兼顾温室气体排放的控制。Popp 的研究是 Romer 思想应用于综合评估框架的典型示例。

对中国经济从高速增长到高质量发展的转变带来诸多有益的启示:(1) 巩固碳市场试点的实践成果,完善全国统一碳交易市场的机制建设和制度安排,切实推行经济增长与环境保护并举的可持续发展长期战略,努力实现习近平总书记规划的“绿水青山就是金山银山”的远景目标;(2) 推动气候变化研究与环境政策制定的紧密结合,提高政策设计的科学性和可靠性,强化排放交易市场、碳税、资源税、补贴等多重政策手段的组合以有效控制气候变化对中国的可能影响;(3) Nordhaus 研究得到的气候变化对欠发达地区影响更甚的结论要求我们在关注经济发展不均等的基础上重视气候损失的区域不均衡性,因此,国家在出台经济发展和气候治理政策时要充分考虑这一新增不均衡性的潜在影响;(4) Romer 的内生增长理论强调了知识创新之于经济发展的重要性,这意味着政府应当把握好基础设施投资和技术发展投资的再平衡,逐步将公共投资的重心向促进基础性产业创新和技术研发的方向调整,同时培植政策土壤以引导和聚集私有资本的力量进行新技术开发;(5) 进一步强化大学、科研院所等机构的知识创新主战场地位,稳增科研投入,同时继续深化科研体制改革,宽松科研环境,提高科研待遇,全面激发研究人员的投入积极性;(6) 知识创新的正外部性使得研发活动的社会收益远高于私有收益,这是促进可持续创新活动开展的关键性阻碍。为此,需要强化专利在确立知识产权归属方面的主导性效力,建立完善的知识产权保护制度,切实保障科研人员和机构的研发收益,开创欣欣向荣的研发局面。此外,坚定对外开放战略,积极推动全球产业链的知识、科技交流和技术合作也是加速知识积累、驱动经济内生增长的有效途径。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 向国成,李宾,田银华. 威廉·诺德豪斯与气候变化经济学——潜在诺贝尔经济学奖得主学术贡献评介系列[J]. 经济动态,2011(4):103-107
- [3] IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment[M]. New York: Cambridge University Press,1990
- [4] Wigley T., Raper S. Interpretation of High Projections for Global-Mean Warming[J]. Science,2001,293(5529):451-454
- [5] Cai Y. Y., Judd K. L., Lenton T. M., et al. Environmental Tipping Points Significantly Affect the Cost-Benefit Assessment of Climate Policies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(15):4606-4611
- [6] Nordhaus W. D. The Global Commons I: Costs and Climatic Effects, How Fast Should We Graze the Global Commons[J]. The American Economic Review: Papers & Proceedings,1982,72(2):242-246
- [7] Cline W. R. The Economics of Global Warming[M]. Washington D. C: Institute for International Economics,1992
- [8] Nordhaus W. D. Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change[M]. Cambridge, MA: The MIT Press,1994
- [9] Fankhauser S. The Economic Costs of Global Warming[J]. Global Environmental Change,1994,4(4):301-309
- [10] Mendelsohn R., Neumann J. E. The Impact of Climate Change on the United States Economy[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press,1999
- [11] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)][R]. IPCC, Geneva, Switzerland,2014
- [12] Nordhaus W. D., Boyer J. Warming the World: Economic Models of Global Warming[M]. Cambridge, MA: The MIT Press,2000
- [13] Nordhaus W. D., Sztore P. DICE 2013R: Introduction and Users' Manual[R]. Second Edition, Yale University, October,2013
- [14] Arrow K. J. A Difficulty in the Concept of Social Welfare[J]. Journal of Political Economy,1950,58(4):328-346
- [15] Nordhaus W. D., Yang Z. L. A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies[J]. The American Economic Review,1996,86(4):741-765
- [16] Nordhaus W. D. Economic Aspects of Global Warming in a Post-Copenhagen Environment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2010,107(26):11721-11726
- [17] Peck S. C., Teisberg T. J. CETA: A Model for Carbon Emission Trajectory Assessment[J]. The Energy Journal,1992,13(1):55-77
- [18] Burniaux J., Martin J., Nicoletti G., et al. GREEN-A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emissions: A Technical Manual[R]. OECD Economics Department Working Paper, No. 104. Paris: OECD Publishing,1991

- [19] Babiker M. , Reilly J. , Mayer M. , et al. The MIT Emission Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions , Sensitivities , and Comparisons of Results [R]. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change , Report No 71. Cambridge: MIT , 2001
- [20] Manne A. S. , Mendelsohn R. , Richels R. G. MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies [J]. *Energy Policy* , 1995 , 23(1) : 17-34
- [21] Hope C. , Anderson J. , Wenman P. Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model [J]. *Energy Policy* , 1993 , 21(3) : 327-338
- [22] Bosetti V. , Carraro C. , Galeotti M. , et al. WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model [J]. *The Energy Journal* , 2006 , 27: 13-37
- [23] 段宏波. 能源-经济-环境系统建模与新能源技术扩散研究 [D]. 中国科学院大学博士学位论文 , 2013
- [24] van der Zwaan B. C. C. , Gerlagh R. , Klaassen G. , et al. Endogenous Technological Change in Climate Change Modeling [J]. *Energy Economics* , 2002 , 24: 1-19
- [25] Popp D. ENTICE: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming [J]. *Journal of Environmental Economics and Management* , 2004 , 48: 742-768
- [26] Duan H. B. , Fan Y. , Zhu L. What ' s the Most Cost-Effective Policy of CO₂ Targeted Reduction: An Application of Aggregated Economic Technological Model with CCS? [J] *Applied Energy* , 2013 , 112: 866-875
- [27] Hu Z. L. , Cao J. , Hong L. J. Robust Simulation of Global Warming Policies Using the DICE Model [J]. *Management Science* , 2012 , 58(12) : 2190-2206
- [28] Berger L. , Emmerling J. , Tavoni M. Managing Catastrophic Climate Risks under Model Uncertainty Aversion [J]. *Management Science* , 2016 , 63(3) : 587-900
- [29] Lemoine D. , Traeger C. P. Economics of Tipping the Climate Dominoes [J]. *Nature Climate Change* , 2016 , 6: 514-519
- [30] Gillingham K. , Nordhaus W. D. , Anthoff D. , et al. Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multi-Model Comparison [J]. *Journal of the Association of Environmental & Resource Economists* , 2018 , 5(4) : 791-826
- [31] Arrow K. , Cropper M. , Gollier C. , et al. Determining Benefits and Costs for Future Generations [J]. *Science* , 2013 , 341(6144) : 349-350
- [32] Solow R. M. Contribution to the Theory of Economic Growth [J]. *The Quarterly Journal of Economics* , 1956 , 70(1) : 65-94
- [33] Romer P. M. Growth Based on Increasing Returns due to Specialization [J]. *The American Economic Review: Papers and Proceedings* , 1987 , 77(2) : 56-62
- [34] Romer P. M. Increasing Returns and Long-Run Growth [J]. *Journal of Political Economy* , 1986 , 94(5) : 1002-1037
- [35] Lucas R. E. On the Mechanics of Economic Development [J]. *Journal of Monetary Economics* , 1988 , 22(1) : 3-42
- [36] Barro R. J. Economic Growth in A Cross Section of Countries [J]. *The Quarterly Journal of Economics* , 1991 , 106(2) : 407-443
- [37] Grossman G. M. , Helpman E. Trade , Knowledge Spillovers , and Growth [J]. *European Economic Review* , 1991 , 35(2-3) : 517-526
- [38] Aghion P. , Howitt P. A Model of Growth through Creative Destruction [J]. *Econometrica* , 1992 , 60(2) : 323-351
- [39] Stokey N. L. , Rebelo S. Growth Effects of Flat-Rate Taxes [J]. *Journal of Political Economy* , 1995 , 103(3) : 519-550
- [40] Romer P. M. Endogenous Technological Change [J]. *Journal of Political Economy* , 1990 , 98(5) : S71-S102
- [41] Duan H. B. , Zhu L. , Fan Y. Modeling the Evolutionary Paths of Multiple Carbon-Free Energy Technologies with Policy Incentives [J]. *Environmental Modeling & Assessment* , 2015 , 20: 55-69
- [42] Popp D. ENTICE-BR: The Effects of Backstop Technology R&D on Climate Policy Models [J]. *Energy Economics* , 2006 , 28: 188-222
- [43] Duan H. B. , Zhang G. P. , Wang S. Y. , et al. Robust Climate Research: A Review on Multi-Model Analysis [R]. Working Paper , University of Chinese Academy of Sciences , 2018
- [44] Arrow K. J. The Economic Implications of Learning by Doing [J]. *The Review of Economic Studies* , 1962 , 29(3) : 155-173
- [45] Kypreos S. , Bahn O. A MERGE Model with Endogenous Technological Progress [J]. *Environmental Modeling and Assessment* , 2003 , 8: 249-259
- [46] Gillingham K. , Newell R. G. , Pizer W. A. Modeling Endogenous Technological Change for Climate Policy Analysis [J]. *Energy Economics* , 2008 , 30(6) : 2734-2753

*Innovation , Endogenous Growth and Climate Change: Comments on Works of the 2018 Nobel Prize
Winners in Economic Sciences*

Duan Hongbo^{1 2} and Cai Zongwu²

(1.School of Economics and Management , University of Chinese Academy Sciences , Beijing 100190;

2.Department of Economics , University of Kansas , Lawrence , USA KS66045)

Abstract: The 2018 Nobel Prize in Economic Sciences was awarded to Professors William D. Nordhaus and Paul M. Romer for their outstanding contributions to climate change , technological innovation and endogenous economic growth research. Natural scarcity is one of core properties of economics , while knowledge and innovation are effective ways to break the bottleneck of resource scarcity. Two Nobel Prize winners in 2018 made great contributions to these areas by establishing interactional model of market economy , knowledge and natural resources. To be specific , the emphasis of Professor Nordhaus' s research has long been placed on climate change economics. He was the first to lay down the economic analysis framework on climate change , and creatively built a dynamic integrated climate economic model (DICE) , which has been broadly employed to manage social cost of carbon (SCC) and provide market-oriented strategies for tackling climate change. Professor Romer proposed the famous four-factor growth theory (i.e. , physical capital , labor , human capital and knowledge) , and developed an endogenous economic growth model by incorporating knowledge stock into economic production. His research heavily re-spurs the academic interests in economic growth , and in practice , promotes the making of plenty of regulations and policies associated with economic development. This work dedicates to reveal the contributions of Professors Nordhaus and Romer' s works , summarizes the state-of-the-art lessons abstracted from their theories and applications , and indicates possible directions for future research and policy-making on knowledge creation , technological change and economic growth.

Key words: Nobel Prize in economic sciences , comments , climate change , technological innovation , endogenous economic growth