

DOI: 10.16538/j.cnki.fem.2018.11.011

# 技术创新、气候变化与经济增长理论的扩展及其应用

## ——2018年度诺贝尔经济学奖得主主要经济理论贡献述评

李宝良<sup>1</sup>, 郭其友<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 经济与金融学院, 福建 泉州 362021; 2. 厦门大学 经济学院, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 瑞典皇家科学院将2018年度的诺贝尔经济学奖授予保罗·罗默和威廉·诺德豪斯, 以表彰他们把技术创新和气候变化纳入宏观经济学分析框架从而对经济增长理论发展所做出的杰出贡献。本文在简要回顾索洛新古典经济增长模型理论与实证研究的基础上, 重点阐述罗默和诺德豪斯对扩展经济增长理论及其应用的主要理论贡献, 以及他们的研究是如何构成西方经济学中既有经济持续增长可能性又有经济负增长乃至突然崩溃的相对完整的增长理论逻辑体系的。同时, 简要讨论他们的理论对发展中国家, 特别是我国在制定有关促进技术创新、转变经济增长方式以及构造绿色发展体系等政策措施方面的借鉴意义。

**关键词:** 罗默; 诺德豪斯; 经济增长; 技术创新; 内生增长模型; 气候变化; 整合评估模型

**中图分类号:** F270 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4950(2018)11-0144-11

### 一、引 言

经济增长理论是经济学研究既古老又前沿的论题。纵观经济发展史, 在过去的一两百年以来, 尽管全球经济整体上保持一个相对稳定且快速的生长。但是, 不同国家的经济增长存在巨大差异。有些国家在短期内实现了经济的快速增长, 有些国家经历并保持比较长期的稳定增长, 有些国家的经济则长期停滞不前, 还有一些国家出现了持续的负增长乃至面临突然崩溃的状态(Mankiw等, 1995; 赫尔普曼, 2007)。因此, 如何解释经济增长的机制以及为什么国与国之间经济增长率会存在如此巨大的差异等, 成为宏观经济学热衷于探讨的核心话题之一。

众所周知, 在构建经济增长模型解释经济增长现象的理论中, 以索洛(Robert Solow)的新古典经济增长模型(Solow, 1956)最具代表性。在索洛模型中, 一国可以通过资本积累在短期内实现快速的经济增长。但是, 由于受到资本边际收益递减规律的约束, 如果没有假设的外生技术进步, 那么随着资本积累的增加, 资本边际收益最终将递减到零, 其结果是出现经济增长

收稿日期: 2018-11-01

基金项目: 2018年度福建省社会科学规划一般项目(项目批准号: FJ2018B057)

作者简介: 李宝良(1980—), 男, 华侨大学经济与金融学院副教授, 经济学博士;

郭其友(1963—), 男, 厦门大学经济学院教授, 经济学博士(通讯作者)。

的停滞。为此,要解释持续的经济增长现象,就必须假设有一个正的外生技术进步率。索洛正因创立了一种论述经济增长背后的因素的理论结构而荣膺1987年度诺贝尔经济学奖。但是,索洛模型仍存在着许多不尽如人意之处。特别是,索洛模型并未最终解释经济为何会持续增长的现象;同时,索洛的模型也难以解释某些国家经济持续负增长的现象和经济增长突然崩溃的现象。罗默和诺德豪斯在索洛模型的基础上分别将技术创新和气候变化引入经济增长理论的分析中,在很大程度上弥补了索洛模型的不足之处。

瑞典皇家科学院将2018年度的诺贝尔经济学奖授予保罗·罗默和威廉·诺德豪斯,以表彰他们把技术创新和气候变化纳入宏观经济学分析框架从而对经济增长理论发展所做出的杰出贡献。从更一般的意义上讲,他们的研究实际上是探讨了知识和自然与经济增长之间的关系。因此,瑞典皇家科学院在公告中称,通过构建解释市场经济如何与知识和自然相互作用的模型,大大扩展了经济分析的范围。

## 二、学术生涯简介与主要论著概述

保罗·罗默(Paul M. Romer)1955年出生于美国科罗拉多州,现任纽约大学斯特恩商学院经济学教授、城市化项目创办负责人和马龙(Marron)城市管理研究所主管。在此之前,罗默先后在加州大学伯克利分校、芝加哥大学、罗切斯特大学、斯坦福大学等多所大学的经济系执教。他还是美国国家经济研究的副研究员、美国艺术与科学院院士,以及华盛顿全球发展中心和渥太华麦克唐纳—劳里尔研究所的非常驻学者。罗默因为在内生经济增长领域的贡献,1997年被美国《时代》杂志评为美国最有影响力的25位名人之一,2002年获得雷克滕瓦尔德奖(Recktenwald Prize),2016年受邀担任世界银行首席经济学家。

1977年,罗默在芝加哥大学获得数学学士学位之后,辗转求学于麻省理工学院和加拿大皇后大学,之后又回到芝加哥大学并于1983年获得经济学博士学位。罗默在芝加哥大学读博士期间开始紧随经济增长理论的研究前沿。他在理性预期学派代表人物卢卡斯(Lucas)等人的指导下完成了其博士论文。该论文致力于构建数理模型将技术进步内生,刻画了技术进步是如何作为人们有意识研发活动的结果。该论文试图弥补索洛模型有关外生技术进步假设的理论缺陷。罗默最重要的代表作是以前博士论文为基础,先后于1986年和1990年在《政治经济学期刊》上发表的“递增报酬与长期增长”(Romer, 1986)和“内生技术进步”(Romer, 1990)这两篇举足轻重的论文,这两篇论文分别标志着内生增长理论的两个发展阶段的开始<sup>①</sup>。罗默将技术创新引入经济增长理论中,考虑了技术创新的正的外部性,从而在他的内生经济增长模型中经济有持续增长的可能性。

威廉·诺德豪斯(William D. Nordhaus)1941年出生于美国新墨西哥州的阿尔伯克基市,现任耶鲁大学斯特林(Sterling)经济学教授。他自1967年以来一直在耶鲁大学任教。1973年获得经济学终身教授职位,同时也是森林学和环境研究院教授。1986年至1988年担任耶鲁大学教务长。诺德豪斯是美国国家科学院的成员、美国艺术与科学学院院士、美国国家经济研究局(NBER)研究员、华盛顿特区经济活动布鲁金斯小组高级顾问、美国经济学会和东部经济协会执行委员、美国经济学会联邦统计委员会的首任主席。在卡特执政期间,他曾担任总统经济顾问委员会成员。2004年,诺德豪斯被美国经济学会授予杰出会员奖章。诺德豪斯被誉为全球研

<sup>①</sup>罗默除了在经济增长方面的研究极具创造性外,在实践中也富有企业家的创新精神。在斯坦福大学期间,他曾暂时离开学术界,创立了一家生产在线习题集的公司,创立一家旨在帮助学生提高努力程度和课堂参与的教育科技公司。更重要的是,罗默在理论研究的基础上,还身体力行试图复制“宪章城市”的成功经验,使之成为发展中国家经济增长的引擎。这个创意在其2009年的TED演讲中提出。他论证道,如果有更好的规则和制度,不发达国家可以走上一条不同但是更好的经济发展轨道。在他的模型中,东道国将把宪章城市的责任移交给一个更发达的受托国,这将允许出现新的治理规则,从而有助于促进技术创新,进而扩散到东道国,并对东道国形成示范效应。

究气候变化经济学的顶级分析师之一和美国最有影响的50名经济学家之一。

诺德豪斯早年曾在法国巴黎政治学院求学,1963年在耶鲁大学完成本科教育。在本科高年级时他选修了詹姆斯·托宾等名师的课程。之后,他到麻省理工学院学习,并于1967年获得经济学博士学位。在此期间,他得到了保罗·萨缪尔森、罗伯特·索罗等经济学大师的指导。他对经济学研究有着广泛的兴趣,研究范围涉及工资和价格行为、健康经济学、国民经济核算方法改进、政治经济周期理论、生产力和新经济,但主要围绕经济增长与自然资源、气候变化的经济学以及经济增长的资源约束等主题展开研究。自20世纪70年代以来,诺德豪斯在专业期刊上发表了大量文章,发展了全球变暖的经济分析方法,包括构建了经济和气候变化整合评估模型,用于分析应对气候变化的有效政策路径。诺德豪斯著述颇丰,代表作包括《发明、增长与福利:增长过时了吗?》《能源的有效利用》《改革联邦政府管制》《管理全球公共事物》《均衡问题:全球变暖的政策选择》等。诺德豪斯把二氧化碳等温室气体排放导致的全球变暖的负外部性引入经济增长模型中,得出经济有持续负增长甚至可能突然崩溃的结论。也就是说,如果全球变暖到达一定的临界值,那么气候可能发生突变,甚至可能导致全球经济崩溃。

### 三、内生增长理论:知识外部性与技术创新

#### (一)索洛经济增长模型的缺陷

罗默和诺德豪斯对长期经济增长的分析都是建立在索洛经济增长模型的基础上。众所周知,自第二次世界大战以后到20世纪50年中期,世界经济经历一个快速发展的阶段,达到了历史高峰。但是经济增长率不仅不平稳,而且富国与穷国之间经济增长率存在很大的差异。经济增长离不开资本、劳动、生产技术等投入要素。为了解释这些经济增长现象,经济学家试图从投入要素方面去解释经济增长的问题。但是普遍认为,资本是人均产出增长的主要力量,机器、设备、建筑等形式的资本会对经济中的激励因素作出反应,是一个内生的过程;而劳动和生产技术则由经济激励之外的其他因素决定的,是一个外生的过程。因此,资本积累就成为长期经济增长分析的重心。索洛(Solow, 1956)关于资本积累对经济增长影响的理论就是描述完全竞争的经济下,其产出增长对应于资本和劳动投入的增长,因此被称为新古典经济增长理论<sup>①</sup>。

索洛模型的主要内容是,假设一个国家GDP的生产过程可以用柯布—道格拉斯生产函数刻画,生产要素的投入包括资本、劳动和劳动扩增型技术进步<sup>②</sup>。索洛使用有效劳动将总和和生产函数转化为人均产出生产函数,从而对经济增长进行分析。索洛解释了资本积累对一国经济增长的影响以及不同国家之间增长轨迹的不同。假如一国初始的人均有效资本存量小于均衡人均有效资本存量,那么该国的资本密集度将上升,人均产出也将随之上升;但是在长期内,人均有效资本存量将趋于稳定,使得人均产出趋于稳定,且以不变的速度增长,该速度等于技术进步的速度。在此过程中,人均产出增长率从一个相对较高的水平逐渐下降到与技术进步率相同的水平。反之,假如一国初始的人均资本存量大于均衡人均资本存量,那么该国的资本密集度将逐渐下降到长期均衡水平,在此过程中,人均产出增长率收敛于技术进步率。在均衡增长路径上,人均产出增长率由外生的技术进步率决定,索洛模型也因此被称为外生增长模型。

在索洛的开创性研究之后,新古典经济增长模型成为经济增长分析的主导方法。20世纪60年代以后一些学者如凯斯(Cass, 1965)等人把拉姆齐(Ramsey)的消费者最优化分析引入新古典增长理论中,对外生的储蓄率进行内生动态化,使索洛模型得到了细化和扩充。

<sup>①</sup>斯旺也提出了一个类似的新古典经济增长模型(Swan, 1956),因此通常将他们的模型并称为索洛—斯旺模型。

<sup>②</sup>在柯布—道格拉斯生产函数中,资本的份额和劳动的份额总和等于1,这是一个关键的假设,由此生产函数具有规模报酬不变的特征,从而与完全竞争假设相一致;一国的消费和储蓄受其产出的约束,即产出被分配于消费和储蓄两种不同的用途,索洛假设储蓄等于产出的一个稳定比例,即储蓄率是一个常数;储蓄被用于投资,资本积累则取决于上期资本存量扣除折旧加上投资;此外,索洛还假设了一个外生的技术进步率。

然而,索洛模型并非完美无缺。经济增长核算揭示了索洛模型的最主要缺陷。经济增长核算表明,全要素生产率(TFP)是经济增长的最主要源泉。经济学家一般将全要素生产率的增长归因为技术进步的贡献。但是,技术进步在索洛模型中是外生的,因而也无法解释全要素生产率的增长。同时,外生的技术进步假设还导致了一些严重的问题。一是一国的长期均衡经济增长率不会受到经济激励因素的影响;二是难以解释国与国之间经济增长率之间的差异。此外,索洛模型中只包括了资本、劳动和劳动扩增型技术进步三个生产要素投入,没有考虑自然资源对经济增长的束缚。

20世纪80年代中后期,罗默在分析长期经济增长数据的基础上,进一步对索洛模型的推论提出了质疑。他根据麦迪逊人均GDP增长率的数据,通过计算了11个国家的十年平均经济增长率后发现,每一个国家后十年平均经济增长率超过先前十年平均增长率的概率均大于50%。因此,经济增长倾向于加速而非放缓(Romer, 1986)。罗默还注意到,国与国之间人均实际收入的增长率存在很大的差异。增长最快和最慢的国家之间存在大约10%的巨大差异,而且初始人均收入与经济增长率之间不存在系统性的联系。因此,索洛模型的绝对收敛推论并不成立(Romer, 1987)。为此,罗默通过构建经济增长模型来解释各国经济增长率持续性且持久差异性。

## (二)基于知识外部性的内生增长模型

索洛模型对于解释经济的长期增长趋势的缺陷在于假设了一个固定的外生技术进步率。对此,罗默最初考虑的问题是,如果没有固定的外生技术进步,经济是如何维持持续增长的?索洛模型为什么要有这个假设?在柯布—道格拉斯生产函数中,由于资本的份额小于1,如果没有技术进步,受边际收益递减规律的约束,资本的边际产出将随着资本的积累而逐渐下降到零;反之,当存在一个大于零的技术进步率,资本的边际产出将不会下降到零。为此,罗默提出了极富影响力的观点,要实现可持续的增长,诸如资本积累要素的边际产出必须严格为正(Romer, 1986)。也就是说,资本积累的边际产出不能表现出边际递减特征。由于边际产出也不能是递增的,边际产出只能是常数,即产出是资本的线性函数。

更一般地,当经济增长来源于某一生产要素的内生积累时,要使得长期的均衡增长率恒定不变,则产出对该要素积累必须是线性的。如果在柯布—道格拉斯生产函数中,当资本的份额等于1而劳动的份额等于零时,索洛模型就退化成为AK模型<sup>①</sup>,即该模型的生产函数是资本的线性函数,劳动要素在生产中不起任何作用。当模型的相关参数满足一定的条件时,经济将以一个正的恒定的速度持续增长。但是,AK模型面临必须解释为什么资本积累的边际产出不会递减的难题。此外,AK模型中劳动份额等于零也与实际经济数据难以兼容。

1986年,罗默把知识纳入增长模型的分析之中,并使之成为内生变量。他在一个有知识外部性的分散化经济中推导了一个带有正的劳动份额的AK模型,从而一并解决了上述这两个问题(Romer, 1986)。在他的模型中,产出是资本的线性函数,因而经济可以维持持续的增长;同时,企业只需支付其所使用的资本和劳动的成本,但无需为知识的外部性支付代价。罗默之所以强调知识的外部性,因为他认为产出不仅依赖于传统模型中的资本和劳动要素,还依赖于企业的私有知识存量以及经济的整体知识存量;单个企业有对私有知识进行投资的激励,在这个过程中增加经济中的整体知识存量,由此产生了外部性。进一步地,罗默提出了一个产品种类扩张的模型作为索洛模型的替代。在这个模型中,种类多样化偏好和专业化使得资本能够维持一个正的边际产出,从而使得经济可以持续增长(Romer, 1987)。

在罗默研究的带动下,其他学者考虑如何在没有技术进步的情况下解决资本边际产出递减对经济增长造成的障碍,由此发展了许多内生经济增长模型。例如,卢卡斯提出了一个基于人力资本的经济增长模型。其中,人力资本的持续内生积累使得资本的边际产出不会随着资本

<sup>①</sup>柯布—道格拉斯生产函数中资本的份额和劳动的份额总和等于1,当劳动份额趋向于零时,则资本的份额趋向于1,由此退化成为AK模型。

的积累下降到零,从而实现了在没有技术进步的情况下的持续增长(Lucas,1988)。斯托基和雷贝洛在常规的资本之外加入了政府提供的基础设施这一公共产品作为另一个生产要素,构建了一个两要素增长模型。在这个模型中,如果基础设施和常规资本的联合产出是线性的,那么经济将以一个恒定的速度增长(Stokey和Rebelo,1995)。

上述研究构成了罗默的第一代内生增长模型。在这些模型中,知识积累被动形成于资本积累的过程中,持续的经济增长作为正常资本积累的一个副产品而出现。第一代内生经济增长模型并没有直接研究技术创新问题,因而难以理解技术创新如何受经济激励因素的影响而变化。

### (三)基于内生技术创新的内生增长模型

按照索洛模型的推论,长期的均衡人均产出增长率收敛于技术进步率。在技术进步率被假设为外生不变时,一国的长期均衡经济增长率将不会受到经济激励因素的影响。这意味着经济政策不会对经济长期均衡增长率产生影响。这也是索洛模型备受质疑的原因之一。

1990年,罗默对市场经济中扩大产品种类的技术创新研发决策进行建模,探讨经济激励因素是如何影响企业技术创新意愿的,进而发展了新一代的内生经济增长模型。他对内生技术创新的论证基于三个前提:第一,技术创新是经济增长的核心,这与索洛模型的观点是一致的。第二,技术创新很大程度上是企业根据市场激励采取有目的行为的结果,即技术创新是内生的。这与索洛模型的外生进步假设不同。第三,技术创新不同于其他普通商品生产,这是对技术创新进行建模的关键所在。

罗默首先借助公共物品的研究论证了技术创新与其他商品的差别特征。尽管技术创新也是由资本和劳动创造的,但是有两个不同:第一,技术创新通常是非竞争性的,某个企业使用某项新技术后并不会影响其他人企业使用该技术;第二,技术创新在某种程度上又具有排他性,即它能够排除其他人的使用。罗默指出,排他性是技术创新能在市场经济中出现的的关键之一。因为并不是所有的技术创新都具有排他性,有些技术创新一旦公布就难以排除其他人使用,这使其很难由市场经济来发展,也有一些技术创新可以通过加密技术或是实施管制乃至专利制度等方式排除其他人的使用。进而,罗默论证了技术创新具有的特殊成本结构。他指出,技术创新通常具有规模报酬递增效应。新技术研发往往需要巨额的固定成本投入,新技术一旦研发完成,其后生产的边际成本就很低。例如一款复杂的软件研发过程需要大量投入,而一旦研发完成后其复制成本则相当低。技术创新的这一特殊成本结构特征,使其与规模报酬递增紧密相关,但却与完全竞争市场中的边际成本定价不相容。如果以完全竞争市场的边际成本定价方式进行定价,企业将无法收回前期巨额的固定成本投入。这样,纳入技术创新的经济增长建模就遇到了困难。这就是说,如果技术进步率与其他生产要素同时被纳入模型,则生产函数将呈现规模报酬递增特征,但却与完全竞争市场难以兼容。此外,罗默还考虑了技术创新的另一个特征,即技术的存量越大越有利于新技术的研发。因此,新技术在带来垄断利润的同时,也在无意中创造了可以供其他研发者利用的新知识,减少了每一个研发者在未来进一步开展研发活动的成本,这就是技术创新的外部性。

罗默借助迪克西特—斯蒂格利茨提出的垄断竞争分析框架(Dixit和Stiglitz,1977),构建了一个扩大产品种类的内生技术创新模型。在模型中,企业把资源投入到扩大产品种类的研发,技术创新受到专利制度的保护从而获得垄断利润,这又激励了企业的研发意愿。企业通过权衡研发的成本和垄断利润来进行研发决策,直到研发活动所带来的私人回报率等于其他可替代投资的回报率。同时,技术创新通过外部性降低了进一步研发的成本,促进未来更多的技术创新。就扩大产品种类的技术创新而言,它也将导致更大的竞争,反过来降低了垄断利润。因此,专利制度中的保护期限的设置其实也是双刃剑。保护的期限越长,当前的技术创新会得到更多

的垄断利润,但是会抑制未来的技术创新。因此,技术创新要权衡各种经济政策激励。罗默的模型考虑了这些经济力量之间的权衡,它既使得用于研发的资源投入保持不变,经济也将保持平稳的持续增长。因此,与索洛模型不同,罗默预言经济增长率是由资源配置内生决定的。

同时,罗默还比较了分散经济下的研发决策和仁慈的计划者下的社会最优研发决策的差别。研究表明,一个仁慈的计划者要权衡的是劳动力在最终产品生产与技术创新中的配置。相比于社会最优配置,在分散化市场经济均衡中的资本积累少且研发的投入不足,即使在专利保护期限无限长的情况下也是如此。因此结果会降低长期均衡经济增长率。这事实上是市场失灵问题,需要政府借助精心设计的政策(比如研发补助等措施)来纠正。

罗默对内生技术进步的研究奠定了内生经济增长理论的基石,也由此引发了内生经济增长模型研究的第二波热潮。罗默研究的是一种扩大产品种类的技术创新。他对研发过程的具体设定为不同产品可以完全相互替代,可资利用的产品种类由于技术创新得以扩大。其他一些研究者则提出了另外一些研发过程替代性设定的分析框架。例如,阿吉翁和霍伊特考虑了产品质量改进、新产品代替旧产品的技术创新,即新旧产品在功能上完全可替代,但是新产品生产成本更低。创新企业通过技术创新创造出新产品替代现有企业的旧产品,从而抢走现存企业的生意,甚至将其逐出市场,这就是熊彼特(Schumpeter)所谓的“破坏性创造”过程。他们将这一创造性破坏机制融入经济增长模型之中(Aghion和Howitt, 1992),以此证明这一过程也是技术创新的重要驱动因素。另外一个重要的扩展是格罗斯曼和赫尔普曼对贸易、创新和增长之间关系的研究(Grossman和Helpman, 1991),该模型也表现出与罗默模型相似的动态特征。

在罗默对内生经济增长理论研究的推动下,有关经济增长实证分析也成为学术热点。例如,罗默对索洛模型绝对收敛推论的质疑引发了巴罗等人的进一步研究。目前,条件收敛已经成为共识,即有相似特征和政策的国家倾向于收敛到相似的人均收入水平(Barro, 2015)。一些经济学家还设计了基于自然实验的计量经济学方法以解决内生性问题,从而识别驱动因素对经济增长的因果性关系。这方面的实证研究仍然在进行,他们集中探讨了相对技术适应性和创新、人力资本的改进、实物资本的积累、国际贸易、不平等、制度和政治等问题。

在罗默对内生经济增长的研究中,经济增长包括了更多的可能性。较之于索洛模型中经济增长最终将收敛于外生的技术进步率不同,由于存在知识的外部性或者技术创新的外部性,经济增长可以不受边际收益递减规律的约束,经济增长率并不必然下降;反而有可能随时间而上升并最终收敛于某个稳定的经济增长率,甚至有无限上升的可能性。

#### 四、整合评估模型:气候变化与经济增长

正如前面阐述的,在索洛模型中不考虑自然资源对经济增长的束缚。实现的经济发展表明,自然资源对经济增长的约束无时不在。在人类经济社会发展的不同阶段,自然资源对经济增长的束缚作用的种类及其表现形式会有不同。在现代工业文明阶段,依赖于消耗大量的化石能源。其结果是一方面取得了经济的快速增长,但是另一方面,导致了二氧化碳等温室气体排放的大量增加,造成了全球变暖。因此,诺德豪斯将气候变化纳入经济增长框架之中,即把经济系统与生态系统整合在一个模型框架中,探讨了气候变化与经济增长之间的相互作用。

然而,与罗默对内生技术进步建模一样,诺德豪斯对气候变化与经济增长之间相互作用的建模也存在着许多困难。其中最主要的问题有三个方面:一是化石燃料消耗导致的二氧化碳排放增长进而引起全球变暖与气候变化的过程问题。二是全球变暖和气候变化造成经济损失的估计问题。三是经济增长与气候变化之间的相互作用机制,即如何刻画它们的双向反馈循环问题。诺德豪斯从20世纪70年代开始,试图逐步地解决这些问题。

### (一)碳循环模型和经济损害估计

诺德豪斯的早期研究并未将气候变化纳入经济增长的框架中进行分析,他最初研究的主题是如何能够以最低的成本将气候变化控制在可容忍的水平。根据自然科学的研究,气候变化主要是由二氧化碳等温室气体<sup>①</sup>排放导致的全球变暖引发的,因此,要控制气候变化,就要控制二氧化碳浓度。进而,要控制二氧化碳的浓度,就必须了解二氧化碳排放在自然界中的循环过程。然而,要对这一过程进行建模就必须了解其中复杂的物理化学和生物学过程,诸如光合作用、大气和海洋以及不同海水层之间的气体交换。

1975年,诺德豪斯大量援引自然科学的研究成果,构造了一个碳循环模型(Nordhaus, 1975)。该模型中有7个不同的碳库,分别是对流层、平流层、海洋上层、深海、短期生物圈、长期生物圈和海洋生物圈。由7个碳库的碳存量构成了一个列向量。根据自然科学的研究,这7个碳库之间的流动大约与其存量呈正比。在这个假设下,碳循环模型由一阶线性方程组成,第2年的碳存量的列向量等于某个系数矩阵乘以第1年碳存量的列向量加上二氧化碳排放列向量。其中,由于二氧化碳的排放于对流层,因此二氧化碳排放列向量除了第一个元素外其余元素皆为零,而系数矩阵则刻画了碳在不同碳库之间的流动。这个模型刻画了大气二氧化碳浓度以及其他二氧化碳碳存量对不同排放的反应。此外,由于二氧化碳排放主要是由于化石燃料消耗引起的,诺德豪斯还相当详细地描述了全球能源需求的一个局部均衡模型。他将全球GDP路径视为给定,并将其作为能源需求模型的输入变量。能源有4种用途,即电力、工业、居民和运输;地区有2个,即美国和其他地方;能源有6种形式,即石油、天然气、煤炭、页岩气、铀235和铀238等;其开采、转化和运输成本和储量也被考虑在内。

要以最低的成本控制气候变化,理解气候变化对经济损害的估计是另一个重要研究课题。20世纪70年代,还有没有有关气候变化损害效应的总和指标。为此,诺德豪斯基于对二氧化碳对全球气温和海平面影响的分析,探讨了不同二氧化碳浓度路径的可能后果。在缺乏经济成本估计的情况下,以此作为计算不同二氧化碳排放路径的经济成本。

这些研究构成了整合评估模型的前期基础。然而,把生态系统与经济系统整合在一个模型框架是一个及其艰难和复杂的课题。它既要考虑经济是如何受到化石燃料消耗而导致气候变化的约束,还要考虑经济又是如何影响气候变化,气候变化又是如何反过来影响经济的不同政策,最终又是如何影响经济增长的这一复杂过程。此外,还必须把自然科学的知识融合到一个适当的长期增长模型之中。受到这些问题的困扰,诺德豪斯对气候变化和经济增长之间相互作用的研究在20世纪80年代几乎没有进展。

### (二)整合评估模型

1994年,诺德豪斯出版《管理全球公共事物》一书,构建了“气候—经济动态整合模型”(dynamic integrated model of climate and the economy, DICE),并对模型结果进行了详细分析。该模型是将二氧化碳排放、二氧化碳浓度变化、气候变化、损害、排放控制包括在一个闭环系统中的第一个动态模型,能够用于估计减缓气候变化不同路径的成本和效益以及分析控制策略的动态影响。该模型融合了当时自然科学最新研究成果,将气候和经济的主要因素融合到了一个最优化框架之中,其中包含了三个相互作用的模块:

第一,碳循环模块:该模块的主要目标是对全球二氧化碳排放如何影响大气二氧化碳浓度的过程进行建模。该模块援引了大量生物、化学等自然科学的研究成果,刻画了二氧化碳排放在三个不同的碳库——大气、海洋表面和生物圈、深海之间的循环。其输出变量是大气二氧化碳浓度的时间路径。

<sup>①</sup>《京都议定书》中规定控制的6种温室气体为:二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟碳化物、六氟化硫,其中以二氧化碳为主。

第二,气候模块:该模块的主要目标是对大气二氧化碳浓度如何影响地球接受和释放能量流的净额进行建模。该模块援引了大量生物、化学等自然科学的研究成果,刻画的是地球能量预算随时间变化的情况,其输出变量是全球气温的时间路径,该变量是气候变化的关键指标。

第三,经济增长模块:该模块的主要目标是对全球经济产出进行建模。经济产出的投入包括资本、劳动和能源,其中的一部分能源来自于化石燃料,由此产生二氧化碳排放。该模块刻画了诸如碳税和碳排放额度等不同气候政策如何影响经济产出和二氧化碳排放,其输出变量是GDP、福利和二氧化碳排放以及气候变化引致的损失的时间路径。

由上述三个简单但却是动态相互作用的模块所构成模型是诺德豪斯的第一代的气候变化综合评估模型。该模型使得人们可以模拟在自然和经济运行的不同假设条件下的经济 and 气候未来如何共同演化的情形。此外,还可以用于评估碳税等气候政策干预措施的后果,以及评估不同全球情景和特定政策干预的合意性等问题。诺德豪斯最新版本的DICE-2016R2演示了整合评估模型如何用于政策分析(Nordhaus, 2018)。他模拟了四种政策措施的情形,分别是:(1)基准情形。假设2015年之后没有新的气候政策变化;(2)最优情形。选择碳税最大化全球福利,其中关于未来世代福利重要性的传统贴现率假设;(3)斯特恩报告情形。选择碳税最大化全球福利,但是不同于情形(2)的是,其中关于未来世代福利重要性采纳斯特恩报告中的贴现率(Stern, 2007),也就是更加重视未来世代的福利;(4)气温上升不超过2.5℃的情形。选择全球福利成本最小的碳税,它足够高,使得全球气温不会比1900年平均气温高2.5℃以上。诺德豪斯模拟的这四种情形下二氧化碳排放的时间路径表明,不同的碳税路径意味着排放进而气候变化的程度显著不同:在情形(2)中,碳税每吨30美元开始,并且以全球GDP增长速度相同的速度上升。在情形(3)和(4)中,碳税提高6—8倍,二氧化碳排放下降迅速得多。

但是,第一代整合评估模型缺乏对世界各国在气候变化问题上的冲突与合作的考虑。针对这个问题,诺德豪斯与其合作者开发了第二代的整合评估模型,即气候—经济区域整合模型(RICE)。其中的经济增长模块将世界经济分成8个独立的区域(Nordhaus和Yang, 1996)。从博弈论的角度看,DICE考虑的是合作博弈的情形,RICE则同时考虑合作博弈和非合作博弈的情形。他们用后者探讨了纯市场解、有效合作博弈解、非合作博弈解三种情况下气候变化政策的差异,研究发现,有效合作博弈情形下二氧化碳减排水平要比非合作博弈解高得多;在合作博弈和非合作博弈情形下,不同国家的减排控制水平差异很大;高收入国家是合作博弈解中的最大输家。

鉴于气候变化的高度复杂性,气候变化与经济增长相互作用的研究仍有待完善。例如,模型的非线性问题,模型参数的高度不确定性、气候变化对不同地区损害程度不同的异质性问题,人类如何适应气候变化的问题,政策考虑中的贴现率问题,等等。以模型的非线性为例,前述的整合评估模型中将碳循环、气候变化和经济增长三个模块中各个变量的关系简化为线性关系,然而气候变化极其复杂,特别是可能存在着非线性关系。例如,当全球平均气温到达某个临界点,超出这个临界点将可能会出现气候突变,气候变化的敏感性将急剧上升。更重要的是,各种非线性的叠加及其相互作用,这些都是简化的线性模型无法刻画的。这就是简化的代价。因此,正如诺德豪斯一直不断强调的,简化过程中必须极其小心,以免出现不可靠的结论。2013年,诺德豪斯在整合评估模型中考虑了天气突变可能导致的非线性问题(Nordhaus, 2013)。他在自然科学领域和经济领域中分别选取了一个参数,对参数的极端值进行设定,从而考虑了天气突变的影响。具体而言,诺德豪斯假设气候的敏感度为10,损害的阈值是3℃,超过该温度将使得经济增长模块中损失函数对温度变化的敏感性从2增加到6。诺德豪斯将这些参数组合加入整合评估模型模拟了气候变化与经济增长的共同演化过程,发现如果没有政策干

预,天气突变的后果将是灾难性的,损失将上升到全球GDP的96%,世界经济将陷于崩溃状态。

总之,诺德豪斯奠定了将索洛模型扩展用于刻画经济与气候变化长期相互作用的基础,极大地提高了我们对自然资源特别是气候变化对经济增长影响的理解。诺德豪斯对气候变化与经济增长的分析表明,经济有持续负增长的可能性,特别是他对气候突变与经济增长之间关系的研究可以清楚地看到经济增长出现突然崩溃的可能性。但是,在宏观经济学的经典教科书(罗默,2014)和经济增长的经典教科书(巴罗和萨拉—伊—马丁,2010;琼斯,2002)以及专著(赫尔普曼,2007)的论述中,并没有将诺德豪斯的研究纳入其中。可以相信,诺德豪斯得奖将有助于人们进一步了解诺德豪斯对宏观经济学贡献,进而加深对自然界与经济增长相互依存关系的认识,从整体上更好地把握经济增长的问题。

## 五、评价及启示

半个多世纪以来,科技创新的引擎推动了社会生产力的极大提高,人类社会保持了前所未有的经济增长速度。与此同时,自然资源的消耗和环境生态的恶化问题也日益突出。罗默和诺德豪斯的经济增长理论正是将人类发展面临的困境与可能的解决路径纳入研究视野,从而在经济增长理论研究上取得突破和建树。他们的经济增长理论不仅弥补了新古典经济增长模型的缺陷,而且极大地拓展了现代经济增长理论研究及其应用领域。他们的理论有助于深化了人们对持续经济增长的理解,特别是他们的技术创新政策、环境评估方法等为包括我国在内的发展中国家如何转换经济增长动能以及制定可持续发展的政策措施提供了参照。

一是对经济增长现实及其前景应持有审慎的态度。自古典经济学以来,经济学家一直关注经济增长可持续性的问题。其中既有如亚当·斯密的乐观主义,也有如托马斯·马尔萨斯和大卫·李嘉图的悲观主义(斯诺登和文,2009)。悲观主义者假设在土地等资源不变下,人口以几何积数的速度增长时,报酬递减规律将发挥作用,人类社会经济发展的前景黯淡。20世纪50—70年代,世界主要发达国家经济经历了高速发展,发展中国家也经历较快的发展历程,出现了盲目的增长乐观主义。罗马俱乐部的《增长的极限》(1972)的出版引起了人们对传统增长方式理论的反思。近年来,随着人工智能等技术的发展,一种与“增长停滞论”截然相反的乐观情绪又开始盛行。诺德豪斯对于技术进步降低资源和环境的限制持乐观态度,但他不是盲目的技术狂热者。因此,罗默和诺德豪斯的经济增长理论告诉人们,经济增长存在复杂系统的约束,对经济增长现实及其前景应持有审慎的态度。经济既有持续增长的可能性,也有持续负增长的可能性,甚至还有存在经济突然崩溃的可能性。关键的是,各国必须采取有效的措施,激励技术进步与遏制环境生态恶化,形成可持续的经济增长机制。

二是发展中国家的追赶应着重于创新政策环境的建设。很多发展经济学将显著的技术差距看成是穷国面临的最主要问题,认为要缩小与富国的收入差距必须追赶技术进步。罗默认为,世界范围内大部分的贫困现象可以通过技术追赶而以相对较小的代价加以消除。但真正的问题是,贫困国家的限制并非“工具差距”而是“观念差距”(斯诺登和文,2009)。为此,罗默强调必须采取政策来填补国家之间的“观念差距”(Romer, 1993)。由于“观念”是非竞争性产品,它需要有特定的产权制度来保证观念的改进,以激励贫困国家加速技术变革。对于我国来说,当前正在加快实施国家创新驱动发展战略。“十九大”报告明确指出:“创新是引领发展的第一动力,是建设现代化经济体系的战略支撑。”因此,我们必须着力构建有利于科技创新的政策体系与创新文化氛围,建设与完善知识产权创造、保护和运用机制。

三是加大对外开放程度是缩小技术及收入差距的重要途径。技术(观念)的创造与传播成为现代经济增长的重要推动力。内生经济增长理论强调观念交流对激发技术创新的重要性(Romer, 1990, 1993)。即一国与其他国家接触越多就越有可能从他国研发活动中获得好处。我

们可以引申出这一结论:那些阻隔观念自由流动或者设立壁垒阻碍技术传播与吸收的国家将遭受相对的停滞。因此,贸易政策和开放程度影响创新和增长。我国改革开放四十年的实践充分证明,对外开放是繁荣发展的必由之路。“十九大”报告提出“推动形成全面开放新格局”。为此,必须树立正确的开放思想观念,拓展开放范围和层次,构建开放型经济新体制,全面提升对外开放水平。

四是各国应携手共同应对气候变化。二氧化碳不管排放于哪里都将在大气中停留成几百年,由此推动全球变暖。正因为这样,诺德豪斯的经济增长理论强调了气候变化内生于经济活动。当前,发展中国家消除贫困、发展经济依然是首要任务,而发达经济体特别是美国则是全球温室气体排放的主要国家。鉴于气候变化的高度复杂性,气候变化与经济增长相互作用的研究仍然存在许多问题有待完善。因此各国如何应对气候变化可能存在很多冲突。但是,目前应该树立各国携手起来共同应对全球气候变化的基本理念。同时,从《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》到《巴黎协定》,也是各国共同应对气候变化的集体行动成果的体现。各国应通过国际合作的具体措施提高应对气候变化的成效。

五是应我国以技术创新引领绿色发展新动力。我国经济经历了改革开放四十年的发展,土地、水资源、生态环境的约束日益突出。因此,科技创新、绿色发展成为转变我国经济发展方式、确保经济的持续稳定增长的必然选择。党的十八届五中全会明确提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念。“十九大”报告指出要“构筑尊崇自然、绿色发展的生态体系”。因此,我们可以借鉴包括罗默和诺德豪斯在内的有关技术创新、气候变化与经济增长理论研究的成果,坚定科技创新、绿色发展的信念,探索一条适合国情的发展道路,制定相关的科技创新、生态环境保护政策,优化创新、绿色发展的环境,将我国建设成为人与自然和谐共生的现代化国家。

#### 主要参考文献

- [1]Aghion P, Howitt P. A model of growth through creative destruction[R]. National Bureau of Economic Research, 1990.
- [2]Barro R J. Convergence and modernisation[J]. *The Economic Journal*, 2015, 125(585): 911-942.
- [3]Cass D. Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation[J]. *The Review of Economic Studies*, 1965, 32(3): 233-240.
- [4]Dixit A K, Stiglitz J E. Monopolistic competition and optimum product diversity[J]. *The American Economic Review*, 1977, 67(3): 297-308.
- [5]Grossman G M H, Helpman E. Innovation and growth in the global economy[J]. MIT Press, Cambridge, 1991.
- [6]Lucas Jr R E. On the mechanics of economic development[J]. *Journal of Monetary Economics*, 1988, 22(1): 3-42.
- [7]Mankiw N G, Phelps E S, Romer P M. The growth of nations[J]. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1995, 1995(1): 275-326.
- [8]Solow R M. A contribution to the theory of economic growth[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1956, 70(1): 65-94.
- [9]Nordhaus W D. The political business cycle[J]. *The Review of Economic Studies*, 1975, 42(2): 169-190.
- [10]Nordhaus W D. Managing the global commons: The economics of climate change[M]. Cambridge, MA: MIT press, 1994.
- [11]Nordhaus W D, Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies[J]. *The American Economic Review*, 1996: 741-765.
- [12]Nordhaus W. Integrated economic and climate modeling[A]. *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*[C]. Elsevier, 2013, 1: 1069-1131.
- [13]Nordhaus W. Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies[J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2018, 10(3): 333-60.
- [14]Romer P M. Increasing returns and long-run growth[J]. *Journal of Political Economy*, 1986, 94(5): 1002-1037.
- [15]Romer P M. Growth based on increasing returns due to specialization[J]. *The American Economic Review*, 1987, 77(2): 56-62.

- [16]Romer P M. Crazy explanations for the productivity slowdown[J]. *NBER Macroeconomics Annual*, 1987, 2: 163-202.
- [17]Romer P M. Endogenous technological change[J]. *Journal of Political Economy*, 1990, 98(5, Part 2): S71-S102.
- [18]Romer P M. Two strategies for economic development: Using ideas and producing ideas[J]. *Strategic Management of Intellectual Capital*, 1998, 6(suppl 1): 211-238.
- [19]Stokey N L, Rebelo S. Growth effects of flat-rate taxes[J]. *Journal of Political Economy*, 1995, 103(3): 519-550.

## Technology Innovation, Climate Change, and the Extensions and Applications of Economic Growth Theory: A Review of Main Contributions by 2018 Nobel Economics Laureates

Li Baoliang<sup>1</sup>, Guo Qiyou<sup>2</sup>

(1. *School of Economics and Finance, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China*; 2. *School of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

**Summary:** The 2018 Nobel Prize in Economics was awarded jointly to two American economists Paul M. Romer and William D. Nordhaus for their respective contributions to integrating technological innovations and climate change into long-run macroeconomic analysis. Specifically, Romer demonstrated that technological innovations are created by purposeful activities in market economy, thus developing a theory of endogenous economic growth. Nordhaus demonstrated that climate change not only acts as a constraint on human activity, but also as something greatly influenced by economic activity, and provided tools to investigate the interaction between climate change and economic growth.

This paper firstly makes a brief review of Solow's neo-classical economic growth model on which Romer's and Nordhaus' contributions built on, then discusses the motivations, main ideas and implications of their contributions, emphasizing how they solved the problems when integrating technological innovations and climate change into economic growth theory, and highlighting how these contributions shape the relatively complete logical system of the theory of economic growth in Western economics which not only contains the possibilities of sustained economic growth, but also contains the possibilities of negative economic growth and even sudden collapse.

Their contributions to economic growth theory deepen our understanding of sustained economic growth, and their technological innovation policies and environmental assessment methods provide a reference for developing countries, including China, on how to change the momentum of economic growth and formulate policies and measures for sustainable development. This paper finally discusses the following five implications. First, we should be cautious about the reality and prospects of economic growth. Second, the catching up of developing countries should focus on the construction of innovation policy environment. Third, increasing the level of foreign trade and the degree of opening up is an important way to narrow the technology and income gap with developed countries. Fourth, all countries should work together to tackle climate change. Fifth, China should take technological innovations to lead the new driving force for green development.

**Key words:** Paul M. Romer; William D. Nordhaus; economic growth; technology innovation; endogenous growth model; climate change; integrated assessment models

(责任编辑:雨 橙)