

气候变化经济影响研究进展及展望

刘远^{1,2} 薛颖² 尹宜舟¹

(1 国家气候中心, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 如何评估气候变化对经济的影响, 既关注二氧化碳(CO₂)减排的成本, 又权衡减排的收益, 是一个具有挑战性的问题。本文分析了气候变化经济影响的研究现状, 明确了气候变化经济影响的基本概念, 对气候变化经济影响进行了分类, 总结了气候变化经济影响评估模型研究现状, 展望了气候变化经济影响的未来发展趋势, 为后续完善气候变化经济影响评估体系提供借鉴。

关键词: 气候变化, 经济影响, 间接经济影响, 综合评估模型

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.06.002

Progress and Prospects of Research on the Economic Impact of Climate Change

Liu Yuan^{1,2}, Xue Ying², Yin Yizhou¹

(1 National Climate Centre, Beijing 100081; 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract: Assessing the economic impact of climate change (EICC), with a focus on the cost of carbon dioxide (CO₂) emission reduction and the balancing of reduction benefits, presents a challenging problem. This article investigates the current state of research on the EICC, identifies its concept, offers the classification of EICC, summarizes the current research on models for assessing EICC, and provides an outlook on future trends of EICC. It aims to offer insights and references for the enhancement of the EICC assessment system.

Keywords: climate change, economic impact, indirect economic impact, integrated assessment model

0 引言

气候变化在全球范围内造成了规模空前的影响, 并且这些影响正在持续增加。近30年来, 每5年地球表面平均温度都依次比前一个5年更高, 2018—2022年是有气象记录以来最热的5年^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 1850年以来, 最近40年的每个10年全球地表温度都相继比此前的任何一个10年要更暖^[2]。

随着气候变化与人类活动相关的更为清晰的证据被发现, 气候变化相关的经济学问题已成为学界和政界的重要议题之一。关于不确定性理论^[3]、未来适应的重要性^[4]以及气候变化临界点的巨大影响^[5-6]等已有大量研究。政府和非政府机构越来越关注温室气体的减排成本以及应对气候变化所采取的适应措施成本

的估算^[7], 从而为气候减缓和适应政策的设计提供依据。但是, 目前对气候变化经济影响的认识和构成较为模糊, 这也阻碍了气候变化经济影响评估的发展。气候变化经济影响的评估是一项跨学科的研究, 建立在气候学、物理学、生态学和经济学等多个学科之上, 评估体系较为复杂。目前关于气候变化经济影响的构成及定义尚未达成共识, 不同文献的评估范畴和表述不一致, 也造成了研究结果之间的可比性较差。例如, 多数研究将评估结果表述为“经济损失/损害”(economic losses/economic damage)或“经济后果”(economic consequences); 一些研究将结果表述为“国内生产总值的一阶影响”(first-order effects on GDP)或“直接成本”(direct cost); 一些研究表述为“GDP损失”(GDP losses)、“GDP变化率”(GDP change rates)或“总经济成本”(total economic cost); 也有一些研究关注了气候变化的“波及影响”(ripple effect)、“部门和区域经济后果”(sectoral and regional economic consequences)以及“跨部门气候变化风险”(inter-sectoral climate change risks)。

收稿日期: 2023年9月15日; 修回日期: 2024年6月11日

第一作者: 刘远(1992—), Email: lliuyuan@cma.gov.cn

通信作者: 尹宜舟(1984—), Email: yin_yizhou@foxmail.com

资助信息: 国家自然科学基金项目(42305180); 中国气象局气象灾害风险评估青年创新团队(CMA2023QN01)

同样，灾害经济损失的评估也涵盖了灾害学、地理学和经济学等多个学科的基础理论。灾害经济损失和气候变化经济影响在评估方法上存在一定程度的一致性，一些关于气候变化经济影响评估的研究就是假设未来的气候变化情景发生在当下，从而评估其经济影响，就是将气候变化模拟为一次灾害事件。目前，关于灾害经济损失的分类已经形成了基本的框架。本文在灾害经济学基本理论的基础上，划分了气候变化经济影响的构成，并给出了各部分经济影响的定义，分析了气候变化经济影响评估模型的发展和应用现状，并展望了气候变化经济影响评估的发展趋势。

1 气候变化经济影响的概念和分类

1.1 气候变化经济影响的概念

气候变化经济学的初衷是为了从经济学角度更加合理地治理全球气候，为达到这样的目的，需要权衡气候变化应对措施的成本与收益（或者反之，不采取气候行动产生的经济影响）^[8]。因此，广义而言，气候变化经济影响包括两个方面：应对气候变化所需的额外成本，以及气候变化冲击生态和人类系统各个方面造成的经济影响^[9-10]。

在前期的气候变化经济学研究中，学者更多地关注应对气候变化的成本，旨在探索最合理的气候政策，从而为全球气候治理建言献策，对气候变化本身造成的经济影响关注较少。此外，由于早期的数据处理能力有限、气候变化科学的局限性以及物理建模不完善等，气候变化本身的经济影响估算往往是大尺度的建模，处理机制较为理想化，且因果关系并不明确。多数研究只估计气候变化经济影响的损失函数^[11-14]，缺少物理影响环节。得益于近年来跨学科研究的迅速发展，气候要素与物理影响更灵活的关系已被识别。因此，近期的研究致力于构建“气候变化-物理影响-经济影响”评估框架，重点评估气候变化冲击生态和人类系统各个方面造成的经济后果。

1.2 气候变化经济影响的分类

为厘清气候变化经济影响的概念与分类，首先对灾害经济学的相关理论进行介绍。自然灾害经济损失的划分依据是经济学中的“存量”和“流量”概念^[15]。“存量”指某一时间点上现存的经济量值，如某一时刻企业所拥有的厂房和设备的总价值；“流量”指某一时期内发生的经济量值，如企业一个月内生产的产品以及利润的情况等^[16]。自然灾害经济损失评估中，根据影响的存量和流量的不同，也就是以存量和流量为划分标准，把自然灾害经济损失分为直接经济损失和间接经济损失。直接经济损失为存量损失，间接经济损失为直接经济损失的后果，为流量损失^[17-18]。

参考自然灾害经济损失的分类，将气候变化经济影响划分为直接经济影响和间接经济影响。图1给出了自然灾害经济损失和气候变化经济影响的分类依据。虽然参考了灾害经济学理论，也将气候变化造成的经济影响分为直接经济影响和间接经济影响，但是与自然灾害经济损失中的直接经济损失和间接经济损失存在区别。自然灾害的损失中有明显的财产破坏，即经济学理论中的存量损失，但是气候的平均态变化并不会导致存量损失。自然灾害造成的财产破坏导致的减产是自然灾害间接经济损失的一部分（间接经济损失I），而气候变化经济影响评估中因物理影响的产出变化为直接经济影响，气候变化的间接经济影响对应了自然灾害的间接经济损失II。气候变化的直接和间接经济影响均对应经济学中“流量”的概念。因此，气候变化经济影响评估的核心是衡量气候变化的物理影响导致的对应行业经济产出的变化，重点关注产业关联在其中的作用。

关于气候变化直接和间接经济影响的概念详述如下。气候变化的直接经济影响指气候变化冲击生态系统和人类系统各个方面导致的对应行业经济产出的变化，通常计为GDP的百分比。相关研究也称其为“一

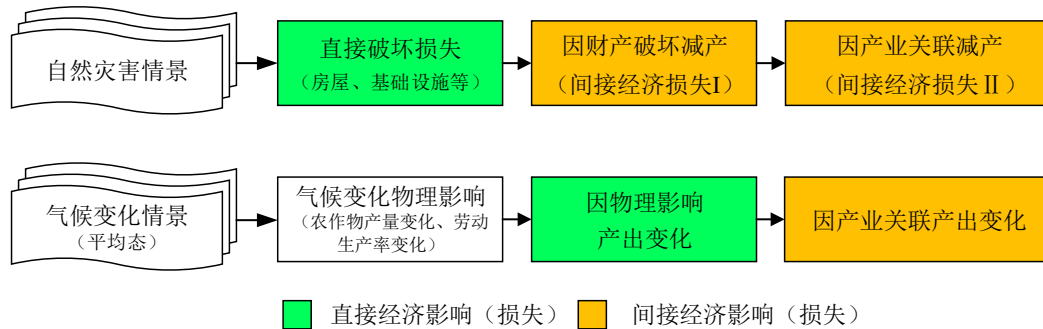


图1 自然灾害经济损失和气候变化经济影响的分类^[19]

Fig. 1 Classification of natural disaster economic loss and economic impact of climate change^[19]

阶经济影响”^[20-21]或“直接经济成本”^[22]。直接经济影响是直观的和显性的，与气候变化的物理影响一一对应，例如农作物单产变化造成农业产出的变化，或者劳动生产率的变化造成相关行业产出的改变。气候变化的间接经济影响指由于直接经济影响造成的相关行业产出变化，通过地区间和行业间的贸易联系波及其他地区和其他行业造成的一系列复杂经济效应（或高阶影响），通常计为GDP的百分比。“波及影响”“行业和地区经济后果”和“跨部门气候变化风险”均属于间接经济影响的范畴。这种影响是抽象的和隐性的，与气候变化的物理影响不直接相关，需要建立经济学模型进行量化。从自然灾害经济损失的概念与分类可以看出，自然灾害经济损失的评估不仅需要衡量自然灾害造成的直接财产损失，同时也应该对产业关联造成的间接经济损失给予关注。目前自然灾害经济损失评估中已经发现间接经济损失在量上可能与直接经济损失相当，甚至超过了直接经济损失。因此，对于气候变化经济影响评估而言，产业关联的影响也不容忽视。

2 气候变化经济影响的研究进展

2.1 经济学方法

学术界对于气候变化经济影响的评估主要包括两大类评估方法：第一类侧重气候变化的微观调研，主要包括直接市场评价法、揭示偏好法以及陈述偏好法；第二类侧重适应气候变化的综合评估模型。第一类评估方法主要将一些气候情景应用于生态系统模式中，通过市场或非市场方法评估气候变化所带来的直接经济影响，这类方法的模型结构相对简单，发展起步较早。近年来，第二类评估方法正迅速发展，本文将重点对综合评估模型方法进行梳理。

2.2 综合评估模型发展概况

气候变化的复杂性与社会经济系统的复杂性相互交织，导致了气候变化经济影响认识的长期性和曲折性。起初，由于气候变化问题本身存在广泛争议，其经济影响的研究也在相当长的时间里属于冷门领域，直到2006年《斯特恩报告》(Stern Review)问世，以及开创气候变化经济学研究的威廉·诺德豪斯获得2018年诺贝尔经济学奖，气候变化的经济影响得到了政策制定者、学者和公众的广泛关注，相关领域的研究热度持续增长^[23]。

为了更好地了解气候变化这一复杂问题，科学家们越来越多地使用跨学科的方法和工具来研究气候问题的物理和社会经济方面的影响。物理学家开发出非常复杂的地球系统模型，例如大气环流模式(General

Circulation Model, GCM)评估了大气化学和全球气候的变化。由于模型对历史数据的拟合效果良好，以及基于理论与经验在物理法则上建立的方程体系，使GCM得到了学界的广泛认可^[24]。物理机制的模型对于气候变化研究的推动作用显而易见。在物理模型识别并预测气候变化的基础上，为了进行社会经济分析，经济学家和决策者们开始转向评估气候变化问题的另一个工具——综合评估模型(Integrated Assessment Model, IAM)。IAM汇集了来自不同学科的研究成果，从影响温室气体排放的人类(经济)活动开始，延伸到将排放与大气温室气体浓度联系起来的大气物理化学过程，将大气温室气体浓度与全球气候联系起来的气候和辐射过程，以及将气候变化联系到价值影响的生态、环境、社会和经济过程。

IAM的研究已经经历了数十年的发展历程。“综合评估”的概念起源于20世纪60年代后期对全球环境问题的相关研究。20世纪80年代，威廉·诺德豪斯发表的一系列研究被认为是气候变化综合评估模型的雏形^[25]，随后他将社会经济系统与地球系统整合在一个模型中以评价气候政策的实施效果，标志着IAM在气候变化研究领域的起源^[26]。此后，IAM进入快速发展阶段，从其基础框架演化出多种不同版本的模型，如温室气体影响政策分析模型(policy analysis of greenhouse effect, PAGE)、区域与全球温室气体减排政策影响评估模型(model for estimating the regional and global effects of greenhouse gas reductions, MERGE)、不确定性/谈判/分布式气候框架模型(climate framework for uncertainty, negotiation and distribution, FUND)以及评估全球环境综合模型(integrated model to assess the global environment, IMAGE)等。表1为国际上部分主流气候变化综合评估模型的基本情况。

表1 主流气候变化综合评估模型(IAM)对比
Table 1 Comparison of major Integrated Assessment Models (IAM)

模型名称	开发者或开发机构	模型方法	模拟精度	是否开源
DICE	William Nordhaus	最优化模型	全球单个区域	是
PAGE	Chris Hope	模拟模型	全球8个区域	是
IMAGE	荷兰环境评估署	模拟模型	全球26个区域	否
MERGE	Alan Manne, Robert Mendelsohn, Richard Richels	最优化模型	全球5个区域	是
AIM	日本国立环境研究所	可计算一般均衡模型	全球17个区域	否
FUND	Tol R S J	最优化模型	全球16个区域	是
RICE	William Nordhaus and Zili Yang	最优化模型	全球12个区域	是
EPPA	美国麻省理工学院	可计算一般均衡模型	全球28个区域	否

上述IAM分别从具有特定学科重点的不同类型的模型演变而来,根据模型方法可分为最优化模型、一般均衡模型和模拟模型^[27]。最优化模型按其目标函数分为福利最大化模型和成本最小化模型,用于解决气候政策涉及的优化问题,例如碳税和碳价的标准制定^[28]、温室气体减排路线的设计以及温室气体分配方案的确定^[29]等;一般均衡模型对经济主体的行为机制进行了细致刻画,通过寻找一组均衡价格使商品和要素市场的供给和需求均衡,进而模拟和预测不同气候政策对经济系统的冲击^[30-31];模拟模型基于物理机制模型,通过外生的排放参数决定未来每个时期可用于生产的碳排放量,气候结果不受经济模块的影响,用于评估未来各种可能的排放情景下的物理影响^[32]。虽然不同的IAM基于不同的模型方法、为不同目的开发,但实际上IAM介于关注地球系统的模型(包括GCM、生物物理模型等)和关注社会经济系统的模型(例如一般均衡模型、能源系统模型等)之间(图2)。

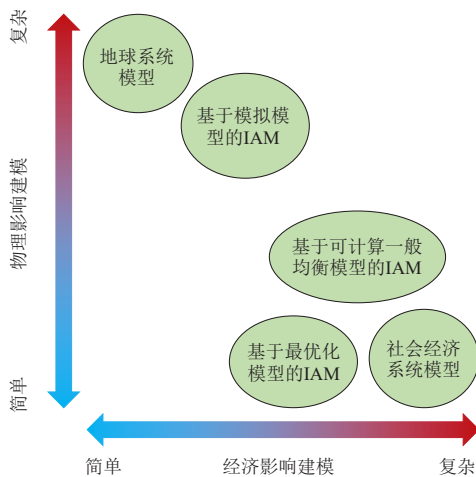


图2 根据物理影响和经济影响建模复杂程度区分的IAM^[32]
Fig. 2 IAM classified by the modeling complexities of physical and economic impacts^[32]

不难发现,目前主流IAM的基础多数依靠复杂的经济学建模,其建模目的多是评估气候变化政策的社会成本。气候变化的物理影响机制涉及关键的反馈回路^[33],但是在基于经济模型建模的IAM中,这些物理影响的反馈回路强度在很大程度上是未知的,多数是依靠粗略的估计或有限过程的建模^[34-35]。IAM中物理影响的反馈回路通过损害函数建立,但是缺乏广泛的理论和经验基础。并且,IAM的评估结果对损害函数十分敏感,例如,若将损害函数指数从2增加至3,会使IAM的评估结果增加3~10倍^[36]。此外,由于缺乏模拟人与地球系统中相关物理机制的足够细节,这些基于经济模型建模的IAM往往不具备处理广泛温度变

化的能力^[37-38]。

相反,基于物理机制模型的建模捕获了相对详细的生物物理过程,并包含了广泛的环境指标,但是这也使得这些IAM的结构迅速复杂化^[32]。例如,对于农作物生长模型而言,采用区域气候要素参数、土壤层参数和作物品种参数作为输入数据的模型可能在田间尺度上表现良好,但是这样的模型并不适用于需要大量农作物单产作为输入数据的IAM。此外,基于物理机制模型建模的IAM往往并不开源,这也降低了相关模型的可操作性,“黑箱”特征越发显著。

综上所述,所有气候变化经济影响评估模型的共同特征是它们都描述了社会经济系统和地球系统的组合,以便更好地了解全球气候变化问题。然而,为了有效地实现这一目标,这些模型必须足够详细以解决问题,但又要足够简单以适用于评估,并且涉及复杂关系的同时不失去透明度,包括探索不确定性。因此,气候变化经济影响评估模型建模的关键权衡是细节与简化。

2.3 气候变化经济影响评估进展

本文在IPCC第六次评估报告^[2]和两份关于气候变化经济影响评估综述的基础上^[34, 39],审查了自1982年以来,近40年的全球气候变化经济影响研究。目前已通过同行评审且科学界认可度较高的关于气候变化经济影响的研究文章有24篇(表2),这24篇文章的选取参考了表1中的主流IAM。虽然这些IAM分别得到了广泛应用,且已发表的研究远大于表2列举的数量,但表中仅选取了其开发者版本的研究,这些研究的认可度更高并且得到了广泛的讨论。表2中经济影响的估计以GDP的百分比作为衡量标准。

上述研究多数是升温3℃以内的气候变化经济影响评估,预估值显示,若全球平均气温相对于工业革命前上升2.5℃,造成的全球经济影响约为GDP的1.3%(11个预估值的平均值)。但是纵观这11项研究,学者对升温2.5℃时经济影响的符号并不一致:2项预估值为正、9项预估值为负。气候变化造成的经济影响是获益还是损失,是大是小,取决于所考虑的时期、评估范畴和地点。

2.4 气候变化经济影响特征分析

2.4.1 初期为正、中后期变负

综合考虑表2中24项研究的预估结果表明,初期适度的变暖对经济的影响是积极的,而进一步变暖将导致净损失(图3)。图3中的实线以分段线性模型描述了气候变化的经济影响,可以发现,经济影响在升温达到1.7℃后变负。值得注意的是,全球升温约1.1℃

表2 气候变化经济影响的预估值
Table 2 Estimated economic impacts of climate change

主要作者	发表年份	升温/°C	经济影响/(% GDP)			
			预估值	标准差	下限值	上限值
Nordhaus ^[25]	1982	2.5	-3.0		-12.0	5.0
Nordhaus ^[26]	1991	3.0	-1.0			
Nordhaus ^[40]	1994	3.0	-1.3			
Nordhaus ^[41]	1994	3.0	-3.6		-21.0	0.0
		6.0	-6.7			
To ^[42]	1995	2.5	-1.9			
Nordhaus等 ^[43]	1996	2.5	-1.4			
Plambeck等 ^[44]	1996	2.5	-2.9		-13.1	-0.5
Mendelsohn等 ^[45]	2000	2.5	0.0			
Nordhaus等 ^[46]	2000	2.5	-1.5			
To ^[47]	2002	1.0	2.3	1.0		
Maddison ^[48]	2003	2.5	0.0			
Rehdanz等 ^[49]	2005	0.6	-0.2			
		1.0	-0.3			
Hope ^[50]	2006	2.5	-1.0		-3.0	0.0
		3.0	-0.9	0.1		
Nordhaus ^[52]	2008	3.0	-2.5			
Deschênes等 ^[53]	2007	2.8	3.4		-5.7	12.3
		2.5	-0.2			
Ciscar等 ^[54]	2011	5.4	-1.0			
		3.2	-5.1			
Bosello等 ^[56]	2012	1.9	-0.5			
Roson等 ^[57]	2012	2.9	-2.1			
		5.4	-6.1			
Fankhauser ^[58]	2013	2.5	-1.4			
Nordhaus ^[59]	2013	2.9	-2.0			
Roson等 ^[20]	2016	3.0	-2.5	4.5		
Dellink等 ^[60]	2019	2.5	-2.0		-1.0	-3.3

注：升温指标代表全球平均温度相对于工业革命前（1851—1900年）的变化；经济影响以GDP损失作为衡量标准；预估值代表各研究预测的升温条件下经济影响中位数，个别研究也提供了标准差和置信区间的上下限。

后增量影响就变成了负面。最初收益的部分原因是大气中的CO₂含量更高可以减轻植物的水分胁迫，并可能使其生长更快^[61]。此外，全球经济的产出主要集中在温带地区，变暖减少了该地区的供暖成本和与寒冷有关的健康问题^[62]；尽管变暖在热带地区的影响可能是负面的，但热带地区的经济规模相对较小^[63]；这意味着在全球气温小幅上升的时期内，全球高收入地区的收益超过了低收入地区的损失。

关于气候变化经济影响的估计值存在较大不确定性。图3中的虚线是从表2中报告的一些标准误差得出的，描绘了95%的置信区间。但是，鉴于大部分研究并未报告不确定性，并且24组估算值并不是由24个不

同的模型得出的，因此该结果可能是对真实不确定性的低估。值得注意的是，图中所示的不确定性是右偏的，也就是说，气候变化造成巨大负面经济影响的可能更大。

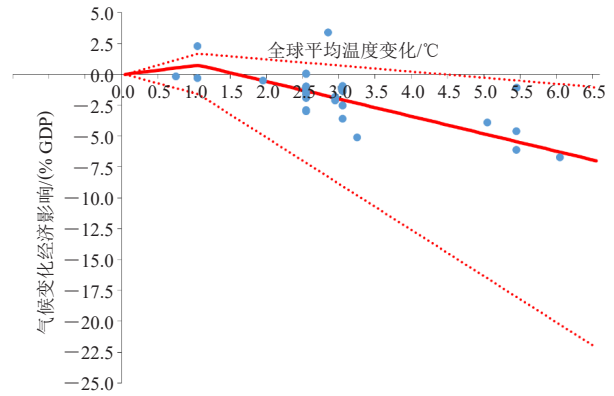


图3 气候变化的经济影响研究结果汇总^[39]
Fig. 3 Summary of the estimates on economic impacts of climate change^[39]

2.4.2 经济影响复杂

气候变化造成的物理影响将在不同地区和不同行业间相互作用产生一系列复杂经济效应，这种影响隐藏在地区和经济部门间产业关联背后，在现阶段评估中未能得到广泛重视。

着眼于经济系统的贸易联系，一些研究采用投入产出分析，例如，Wenz等^[64]基于全球供应网络模型提供了与劳动生产率相关的经济损失评估，发现1991—2011年贸易加剧对损失的放大比气候变化更强；Schenker^[65]研究了气候变化影响的国际溢出效应，表明气候变化影响着贸易条件和行业竞争力；多数研究认为气候变化对能源需求的影响微乎其微，因为供暖需求的减少被制冷需求的增加抵消了，但是气候变化对能源的有限影响可能会对经济产生更大的影响，因为能源需求波动产生的经济影响可能在能源系统或产业结构中被放大^[66]；Zhang等^[67]基于美国气候变化经济损失的估计值^[8]，评估了其在世界范围内的空间波及后果，结果表明美国经济的下滑会通过贸易网络波及全球，造成全球经济的下滑。

2.4.3 地区差异明显

经济影响有明显的空间分异。首先，气候变化的影响存在地区差异；其次，不同地区的气候变化适应能力也不同。前者与地理位置相关，例如，气候变化影响下，纬度较高的地区农业生产可能受益，而低纬度地区当前的温度更接近农作物生长最适温度的上限，进一步的变暖使这些地区更加远离最适温度^[68]。后者与社会经济发展水平相关，气候变化适应能力即

改变调整的能力，这取决于技术的有效性和对技术的支付能力等，欠发达地区通常缺乏现代技术以抵御气候变化（例如空调、农作物保险和药物等），并且可能缺乏调动资源用于大规模基础设施的能力，有时甚至缺乏政治意愿。表2所列的24项研究中的13项包括了气候变化对大区域别经济影响的估计；3项研究评估了国家级别的经济影响^[48-49, 55]。这些评估表明，欠发达地区比发达地区更容易受到气候变化的影响。经济影响的分布结果表明，世界上最贫穷的国家和地区（约占全球1/2）承受了气候变化的大部分损失，而最富裕的国家和地区（约占全球1/4）几乎没有影响^[68]。

3 气候变化经济影响研究的未来发展趋势

整体而言，目前国内外学者借助翔实的气候模式数据、依靠复杂的物理机制模型和经济学模型建模，对气候变化的物理影响有了较充分的认识，并在全球尺度和区域尺度定量评估了气候变化造成的经济影响。然而，在气候变化的物理影响评估、间接经济影响评估、区域异质性评估等方面还有待进一步的发展。

1) 气候变化物理影响评估需要完善。已有研究更注重气候减缓和适应政策的制定及优化，评估重点为温室气体减排目标的设定、减排路线的设计、减排方案的分配以及适应措施的成本。因此，当前评估框架多数基于经济学模型构建，虽然考虑了气候变化的物理影响以及由此造成的经济影响，但这些经济影响仅通过与CO₂等变量建立的函数关系引入^[37]，缺少相关理论的支持。这在早期的评估中是可以接受的，但是随着计算能力的增长、数据的获取，以及非实验研究因果推断的统计理论的进步^[69]，近年来在气候变化物理影响方面的研究进展是迅速的，气候要素与生物物理之间更灵活的关系已被识别和估算^[70]，然而，目前对气候变化经济影响的评估中并未反映出这些进展。因此，需要更广泛的物理影响建模以获得气候变化更为可靠的经济影响评估。

2) 间接经济影响评估应予以重视。目前的研究对于地区间和行业间的产业关联造成的一系列复杂经济效应未能充分识别，而这种间接影响是不容忽视的，例如，农作物减产对生产链下游行业的冲击、升温导致的劳动生产率下降对室外劳动力的影响等对不同地区不同行业的打击。这些影响已在少数评估中被关注，但尚未得到广泛研究。尤其是对于中国这样的气候变化敏感地区，需要更加深入地评估气候变化的多重经济后果。

3) 国家内部的地区差异认识不足。目前的气候变

化经济影响评估多数以国家作为评估单元，全球大致趋势表现为低纬度地区的经济影响严重，随着纬度的升高气候变化对经济的负影响减弱，北半球高纬地区可能存在正影响^[71]。对于如中国这样纬度跨度大的国家，气候变化经济影响的国家内部地区差异是显而易见的，但在现有气候变化经济影响研究中，中国通常被视为一个同质化的实体^[72]，忽视了气候变化经济后果在中国不同地区的不均衡分布。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2022[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: the Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Weitzman M L. On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change[J]. The Review of Economics and Statistics, 2009, 91(1): 1-19.
- [4] De Bruin K C, Dellink R B, Tol R S J. AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model[J]. Climatic Change, 2009, 95(1): 63-81.
- [5] Lemoine D, Traeger C. Watch your step: optimal policy in a tipping climate[J]. American Economic Journal: Economic Policy, 2014, 6(1): 137-166.
- [6] 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 of the United States of America, 2015, 112(15): 4606-4611.
- [7] Stern N H. Stern Review: the Economics of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] Hsiang S, Kopp R, Jina A, et al. Estimating economic damage from climate change in the United States[J]. Science, 2017, 356(6345): 1362-1369.
- [9] National Research Council. Advancing the Science of Climate Change[M]. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2010.
- [10] World Bank. World development report 2010: development and climate change[R]. Washington, D.C.: World Bank Group, 2010.
- [11] Anthoff D, Tol R S J. The impact of climate change on the balanced growth equivalent: an application of FUND[J]. Environmental and Resource Economics, 2009, 43(3): 351-367.
- [12] Tol R S J. On the uncertainty about the total economic impact of climate change[J]. Environmental and Resource Economics, 2012, 53(1): 97-116.
- [13] 张海玲, 刘昌新, 王铮. 气候变化综合评估模型的损失函数研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 40-49.
- [14] 董文杰, 袁文平, 滕飞, 等. 地球系统模式与综合评估模型的双向耦合及应用[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1215-1219.
- [15] 吴吉东. 基于适用区域投入产出模型的四川省汶川地震间接经济损失评估[D]. 北京: 北京师范大学, 2010.
- [16] 唐彦东, 于汐. 灾害经济学研究综述[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 117-120, 145.
- [17] Parker D J, Green C H, Thompson P M. Urban Flood Protection Benefits: a Project Appraisal Guide[M]. Aldershot, UK: Gower Technical Press, 1987.
- [18] 吴吉东, 李宁, 温玉婷, 等. 自然灾害的影响及间接经济损失评估方法[J]. 地理科学进展, 2009, 28(6): 877-885.
- [19] 解伟. 自然灾害经济影响评估与恢复策略研究: 基于CGE模型的模拟分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2014.
- [20] Roson R, Sartori M. Estimation of climate change damage functions for 140 regions in the GTAP9 database[R]. Washington, D.C.: The World Bank, 2016.
- [21] Cai W J, Zhang C, Suen H P, et al. The 2020 China report of the Lancet Countdown on health and climate change[J]. The Lancet Public Health, 2021, 6(1): e64-e81.
- [22] Takakura J, Fujimori S, Takahashi K, et al. Cost of preventing workplace heat-related illness through worker breaks and the

- benefit of climate-change mitigation[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(6): 064010.
- [23] 黄承芳, 李宁, 刘丽, 等. 气候变化下农业领域的国际文献特征与热点演变: 基于CiteSpace V的文献计量分析[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(8): 477-488.
- [24] Satoh M. *Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [25] Nordhaus W D. How fast should we graze the global commons?[J]. *The American Economic Review*, 1982, 72(2): 242-246.
- [26] Nordhaus W D. To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect[J]. *The Economic Journal*, 1991, 101(407): 920-937.
- [27] 魏一鸣, 米志付, 张皓. 气候变化综合评估模型研究新进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 1905-1915.
- [28] Persson T A, Azar C, Lindgren K. Allocation of CO₂ emission permits - economic incentives for emission reductions in developing countries[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(14): 1889-1899.
- [29] O'Neill B C, Riahi K, Keppo I. Mitigation implications of midcentury targets that preserve long-term climate policy options[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(3): 1011-1016.
- [30] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于CGE模型的CO₂减排对中国经济的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(12): 1621-1624.
- [31] Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. Carbon taxation policy in China: how to protect energy- and trade-intensive sectors?[J]. *Journal of Policy Modeling*, 2007, 29(2): 311-333.
- [32] Stehfest E, van Vuuren D, Kram T, et al. Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0-model description and policy applications[R]. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), 2014.
- [33] Helmuth B, Kingsolver J G, Carrington E. Biophysics, physiological ecology, and climate change: does mechanism matter?[J]. *Annual Review of Physiology*, 2005, 67: 177-201.
- [34] Tol R S J. The economic effects of climate change[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2009, 23(2): 29-51.
- [35] Revesz R L, Howard P H, Arrow K, et al. Global warming: improve economic models of climate change[J]. *Nature*, 2014, 508(7495): 173-175.
- [36] Stern N. The economics of climate change[J]. *American Economic Review*, 2008, 98(2): 1-37.
- [37] Pindyck R S. Climate change policy: what do the models tell us?[J]. *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3): 860-872.
- [38] Stern N. The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models[J]. *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3): 838-859.
- [39] Tol R S J. The economic impacts of climate change[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2018, 12(1): 4-25.
- [40] Nordhaus W D. Expert opinion on climatic change[J]. *American Scientist*, 1994, 82(1): 45-51.
- [41] Nordhaus W D. *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*[M]. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [42] Richard S J T. The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations[J]. *Environmental and Resource Economics*, 1995, 5(4): 353-374.
- [43] Nordhaus W D, Yang Z L. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies[J]. *American Economic Review*, 1996, 86(4): 741-765.
- [44] Plambeck E L, Hope C. PAGE95: an updated valuation of the impacts of global warming[J]. *Energy Policy*, 1996, 24(9): 783-793.
- [45] Mendelsohn R, Dinar A, Dalfelt A. *Climate change impacts on African agriculture*[R]. Washington: World Bank, 2000.
- [46] Nordhaus W D, Boyer J. *Warming the world: Economic Models of Global Warming*[M]. Cambridge: MIT Press, 2003.
- [47] Tol R S J. Estimates of the damage costs of climate change, Part II. Dynamic estimates[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(2): 135-160.
- [48] Maddison D. The amenity value of the climate: the household production function approach[J]. *Resource and Energy Economics*, 2003, 25(2): 155-175.
- [49] Rehdanz K, Maddison D. Climate and happiness[J]. *Ecological Economics*, 2005, 52(1): 111-125.
- [50] Hope C. The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern[J]. *Integrated Assessment*, 2006, 6(1): 19-56.
- [51] Nordhaus W D. Geography and macroeconomics: new data and new findings[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(10): 3510-3517.
- [52] Nordhaus W D. *A Question of Balance*[M]. New Haven: Yale University Press, 2008.
- [53] Deschênes O, Greenstone M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather[J]. *American Economic Review*, 2007, 97(1): 354-385.
- [54] Ciscar J C, Iglesias A, Feyen L, et al. Physical and economic consequences of climate change in Europe[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(7): 2678-2683.
- [55] Maddison D, Rehdanz K. The impact of climate on life satisfaction[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2437-2445.
- [56] Bosello F, Nicholls R J, Richards J, et al. Economic impacts of climate change in Europe: sea-level rise[J]. *Climatic change*, 2012, 112(1): 63-81.
- [57] Roson R, van der Mensbrugge D. Climate change and economic growth: impacts and interactions[J]. *International Journal of Sustainable Economy*, 2012, 4(3): 270-285.
- [58] Fankhauser S. *Valuing Climate Change: the Economics of the Greenhouse*[M]. London: Routledge, 2013.
- [59] Nordhaus W. *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*[M]. New Haven: Yale University Press, 2013.
- [60] Dellink R, Lanzi E, Chateau J. The sectoral and regional economic consequences of climate change to 2060[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2019, 72(2): 309-363.
- [61] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations[J]. *Science*, 2006, 312(5782): 1918-1921.
- [62] Haines A, Kovats R S, Campbell-Lendrum D, et al. Climate change and human health: impacts, vulnerability, and mitigation[J]. *The Lancet*, 2006, 367(9528): 2101-2109.
- [63] Hsiang S M, Meng K C. Tropical economics[J]. *American Economic Review*, 2015, 105(5): 257-261.
- [64] Wenz L, Levermann A. Enhanced economic connectivity to foster heat stress-related losses[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1501026.
- [65] Schenker O. Exchanging goods and damages: the role of trade on the distribution of climate change costs[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 54(2): 261-282.
- [66] Hasegawa T, Park C, Fujimori S, et al. Quantifying the economic impact of changes in energy demand for space heating and cooling systems under varying climatic scenarios[J]. *Palgrave Communications*, 2016, 2(1): 16013.
- [67] Zhang Z T, Li N, Xu H, et al. Analysis of the economic ripple effect of the United States on the world due to future climate change[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(6): 828-840.
- [68] Mendelsohn R, Dinar A, Williams L. The distributional impact of climate change on rich and poor countries[J]. *Environment and Development Economics*, 2006, 11(2): 159-178.
- [69] Carleton T A, Hsiang S M. Social and economic impacts of climate[J]. *Science*, 2016, 353(6304): aad9837.
- [70] Auffhammer M, Schlenker W. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation[J]. *Energy Economics*, 2014, 46: 555-561.
- [71] Burke M, Hsiang S M, Miguel E. Global non-linear effect of temperature on economic production[J]. *Nature*, 2015, 527(7577): 235-239.
- [72] Mi Z F, Meng J, Guan D B, et al. Chinese CO₂ emission flows have reversed since the global financial crisis[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1712.

(编辑: 郑秋红)