

# 气候变化计量经济学 方法研究进展

李承政 李旭辉 顾海英

**摘要** 全球气候变化是人类社会共同关注的一个热点问题。然而，目前国内对气候变化经济学方法论的研究并不多见。首先，界定了天气、气候、天气效应和气候效应等几个气候变化经济学的基本概念，并介绍了利用天气变化识别气候变化效应的科学理论基础。然后，介绍了气候经济学领域比较常用的计量经济学方法及其在实证研究中的应用，具体包括生产函数法、特征价格法等截面数据分析方法，固定效应模型、分布滞后模型、非线性模型和交互项方法等面板数据分析方法，以及以长期平均法、长期差分法为代表的混合分析方法。文章还进一步对这些分析方法的特色和优缺点进行了比较。最后，对气候变化计量经济研究方法的发展现状进行了简要评述并指出未来值得研究拓展的方向。

**关键词** 气候 天气 气候变化效应 识别 实证方法

[中图分类号] F06 [文献标识码] A [文章编号] 2095 - 851X (2019) 01 - 0095 - 17

## 一、引言

全球气候变化所引发的一系列生态、环境、社会和经济问题正威胁着人类的生存和发展。政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change,

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目“气候变化背景下低碳农林业发展战略及政策研究：基于作用、潜力和成本效益的分析” (批准号：71333010)；国家社会科学重大项目“共享发展理念下的我国新型城乡土地制度体系构建研究” (批准号：16ZDA019)；广东省自然科学基金青年项目“空气污染、极端天气对中国农村老年人劳动供给行为的影响研究” (批准号：2018A030310658)。

**【作者简介】** 李承政 (1986 -)，暨南大学经济与社会研究院助理教授，邮政编码：510632；李旭辉 (1981 -)，上海交通大学安泰经济与管理学院博士研究生，邮政编码：200030；顾海英 (1957 -)，上海交通大学安泰经济与管理学院教授，邮政编码：200030。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

IPCC) 第五次评估报告第一工作组报告指出: 2012年之前的30年可能是过去1400年中平均气温最高的三个10年(中等信度)。全球气候变暖使人类社会经历了由冰川消融(高信度)、海平面上升(高信度)和极端天气事件(如热浪、强热带风暴和强降水事件等)增多(中等信度)所造成的不良后果(Stocker et al., 2013; 沈永平、王国亚, 2013)。实证研究领域的诸多证据表明, 气候变化的影响是多维度的, 天气(气候)变化已经对国民收入、经济增长、农业生产、工业和旅游业、人类健康、劳动生产率、能源需求、冲突/政局稳定、人口迁移和生物多样性等多个领域造成显著的影响(Dell et al., 2014; Pachauri et al., 2014)。

20世纪80年代以来, 中国大陆的气候已经发生了显著的变化。总体来说, 气候变暖的趋势非常明显, 极端天气(气候)事件的发生频率和分布也出现了变化(秦大河, 2015)。气候变化是否已经对中国经济和社会产生显著的影响, 中国在适应气候变化方面的表现如何, 现阶段可供利用的适应措施以及未来潜在的适应机会会有哪些? 到目前为止, 国内学者对这些领域鲜有研究。量化气候变化的经济影响需要有针对性的分析工具, 目前主要包含自上而下(Top-down)和自下而上(Bottom-up)两种研究途径。其中, 自上而下的途径以综合评估模型(Integrated Assessment Models, IAMs)为代表, 主要包括最优化模型(Optimization Model)、可计算一般均衡模型(CGE Model)和模拟模型(Simulation Model)。本文侧重综述气候变化计量经济方法。<sup>①</sup> 过去十多年该领域已经获得了长足的发展, 然而国内对气候计量方法学的综述研究仍然非常少见。本文介绍了气候经济学基本概念、识别气候效应的理论基础和可采用的计量研究方法及其具体应用, 旨在为中国学者进行气候经济学本土化和国际化研究提供文献来源以及计量分析方法上的参考。

本文的结构安排如下: 第二部分是介绍气候经济学的基本概念和方法论基础, 通过概念界定, 指出了天气与气候的区别和联系, 并归纳出气候变化效应的识别方式; 第三部分介绍了气候经济学实证研究中常用的计量经济学方法并列举其具体应用; 第四部分对气候变化计量经济学研究现状进行了简要的评述并展望了未来研究的方向。

## 二、气候变化效应的经验识别

天气(Weather)是指近地表(主要发生在对流层)大气在较短时间内的具体状态, 它是“气候”分布的一个具体实现或称之为随机抽取(Dell et al., 2014)。

<sup>①</sup> 气候计量经济学(Climate Econometrics)由Hsiang(2016)提出, 针对的是气候变化经济学领域常用和新发展出来的计量经济方法。本文采用气候变化计量经济学(The Econometrics of Climate Change)这一更本土化的术语。

大气中的各种气象要素如气温、湿度、风力、降水量等在时空上的综合表现形成了各式各样的天气现象和天气过程。相比于气候，天气呈现多变的特征，天气系统总是处在不断新生、发展和消亡的过程中，不同的发展阶段会对应不同的天气现象。

气候（Climate）表征的是大气物理特征的长期一般状态，它是一个地区多年时段（通常是30年或以上）各种天气过程的综合表现，其实质是一个描述包括气温、降水量、气压、湿度、风力和大气粒子等气象要素的分布。地球不同纬度地区接收到的太阳辐射存在差异，以及不同的下垫面（如海洋、山川、森林和沙漠等）在太阳辐射下产生的物理过程不同，使得不同地区的气候呈现截然不同的特征。与天气系统不同，气候具有（相对）稳定性。

### （一）天气效应与气候效应

根据上面给出的定义，天气表征的是大气物理特征短时间的具体状态，而气候则表征大气物理特征的长期平均状态。因此，天气效应与气候效应二者之间可能存在一定的差异。

气候变化的影响可能小于天气变化产生的影响，因为在长期中人类能够利用或发明各种适应措施来应对气候变化造成的不利影响。比如，在一个气候寒冷（或温和）的地区，超过30℃的高温天气可能会对当地居民的健康造成显著的负面影响，而在一个气候炎热的地区，这种高温天气产生的影响可能非常小，因为热带地区的居民早已适应了炎热的气候，他们懂得如何抵御极端高温天气的侵袭，甚至更早地引入了风扇、冰箱和家庭空调等现代设备（Barreca et al., 2015）。再举一个例子，在某一年中作物生长季节降雨量偏少可能导致当年作物大幅减产，然而在长期条件下农户可能会对种植结构或作物品种进行调整，比如引入耐旱的作物品种，因此降雨量偏少所造成的负面影响在长期中可能大大弱化。气候变化的效应也可能大于天气波动的效应，因为长期中气候变化可能存在强化效应。举例说明，如果农场建有蓄水池的话，短暂的干旱天气可能对农业生产的影响不大。然而，如果气候发生了变化，出现了持续性的干旱，那么农业生产可能遭受严重的损失，因为蓄水池的水最终会消耗殆尽。

### （二）利用天气变化识别气候变化的效应

在过去的10年里，实证计量经济学家开始广泛使用高分辨率的气象数据，运用面板数据计量经济模型来估计天气冲击（Weather Shocks）对社会、经济和人类健康的影响。针对气候变化的经济影响进行实证研究面临的一个重要挑战在于：如何用面板数据模型估计的天气冲击影响（短期效应）去评估过去气候变化的影响以及推断未来气候变化的影响（长期效应）。本节先提供一个基本的理论框架，证明“天气效应能够精确识别气候效应”。然后，作者将详细介绍近期应用计量经济学家在该领域实证方法发展方面所做出的努力。

由于气候变化经济学学科交叉的特殊属性，如何为日益增加的实证研究需求建立

一个科学的理论基础一直是摆在实证研究者面前的难题之一，气候变化经济学领域的领军学者 Hsiang (2016) 做出了一个开创性的尝试。他指出传统的研究中仅仅按照时间尺度来区分天气和气候的方式不够严谨，究竟多长时间大气物理特征的平均状态才能被定义为气候<sup>①</sup>，目前并没有非常统一的标准。因此，他采用了一种灵活的、一般化的方式正式定义了气候和天气。<sup>②</sup> 假设存在一个随机向量  $\nu_{im}$ ，它描述了地区  $i$  在时刻  $m$  的大气状态：

$$\nu_{im} = \{ \text{气温, 降水, 风速, 相对湿度, } \dots \} \quad (1)$$

在任意一个时期  $t = (m_1, m_2)$ ，存在一个联合分布函数  $\varphi(\tilde{C}_i)$ ， $\nu_{im}$  可以表示成这个联合分布函数的一个随机抽取：

$$\nu_{im} \sim \varphi(\tilde{C}_i) \quad \forall m \in t \quad (2)$$

定义  $K$  维向量  $\tilde{C}_i$  为地区  $i$  在时期  $t$  的气候，因为它刻画了  $\nu_{im}$  所有可能的分布。同一时期，必定存在一个联合分布  $\varphi(C_i)$ ，它最优地刻画了  $\nu_{im}$  的现实分布状态， $C_i$  被定义为地区  $i$  在时期  $t$  的天气。气候  $\tilde{C}_i$  和天气  $C_i$  的区别在于： $\tilde{C}_i$  描述的是随机向量  $\nu_{im}$  的预期分布，而  $C_i$  描述了随机变量  $\nu_{im}$  的现实分布。<sup>③</sup> 为简化符号，定义  $C(\tilde{C})$  为给定气候  $\tilde{C}$  的条件下实际出现的天气  $C$ 。气候能够通过两种渠道影响结果变量  $y$ 。第一种称之为直接渠道，即气候能够作用于天气  $C$ ，从而对结果变量  $y$  产生直接影响。比如，多雨的气候会产生降雨天气，身处雨中的人会被淋湿身体。第二种称之为间接渠道，即人类对气候的信念 (Beliefs) 会影响人类的行为，无论实际发生的天气如何。比如，如果认定自己生活在一个多雨的气候环境下，人们会购买雨衣或雨伞并随身携带。用向量  $B$  表示人类基于对气候的信念采取的所有可能的行为，假设它的维度为  $N$ 。那么气候与结果变量  $y$  的关系可以表示成：

$$y(C) = y[C(\tilde{C}), B(\tilde{C})] \quad (3)$$

根据微分链式法则，气候  $\tilde{C}$  的边际效应可以表示为：

$$\begin{aligned} \frac{dy(C)}{dC} &= \nabla_C y(C) \cdot \frac{dC}{d\tilde{C}} + \nabla_B y(C) \cdot \frac{dB}{d\tilde{C}} \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^K \frac{\partial y}{\partial c_k} \frac{dc_k}{d\tilde{C}}}_{\text{“直接效应”}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N \frac{\partial y}{\partial b_n} \frac{db_n}{d\tilde{C}}}_{\text{“信念效应”}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\nabla_C y(C) = \left[ \frac{\partial y}{\partial c_1}, \dots, \frac{\partial y}{\partial c_K} \right]$ ， $\nabla_B y(C) = \left[ \frac{\partial y}{\partial b_1}, \dots, \frac{\partial y}{\partial b_N} \right]$ ，雅可比

① 通常使用 30 年时间尺度来定义气候，但实际上气候可以在一个短得多的时间尺度上得到定义，对于天气，其时间尺度通常被定义为两周内，但绝大部分实证研究把气象要素的月度和年度平均值视为天气，把它们对长期平均值的偏离形象地定义为天气冲击。

② 本部分内容主要参考了 Hsiang (2016) 的研究，但对其证明过程进行了适当的简化处理。

③ 气候  $\tilde{C}_i$  是不可观测的 (所以使用了符号  $\sim$ )，实际观测到的是天气  $C_i$ 。

矩阵为：

$$\frac{dC}{d\tilde{C}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial \tilde{c}_1} & \dots & \frac{\partial c_1}{\partial \tilde{c}_K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial c_K}{\partial \tilde{c}_1} & \dots & \frac{\partial c_K}{\partial \tilde{c}_K} \end{bmatrix}, \quad \frac{dB}{d\tilde{C}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial b_1}{\partial \tilde{c}_1} & \dots & \frac{\partial b_1}{\partial \tilde{c}_K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial b_N}{\partial \tilde{c}_1} & \dots & \frac{\partial b_N}{\partial \tilde{c}_K} \end{bmatrix} \quad (5)$$

气候变化可以通过作用于天气，使天气发生相应的变化，进而影响结果变量  $y$ ，这一渠道被称为“直接效应”。气候变化也可以通过改变人类预期，使人类做出相应的调整措施，进而影响结果变量  $y$ ，这一渠道被称为“信念效应”。

假设对于任意给定的气候条件  $\tilde{C}$ ，经济个体都能够采取相应的最优行动  $B^*$ ，最大化一个给定的值函数  $z(C, B)$ <sup>①</sup>：

$$y(\tilde{C}) = y[C(\tilde{C}), B^*(\tilde{C})] = \max_{B \in R^N} z[C(\tilde{C}), B(\tilde{C})] \quad (6)$$

对于一个给定的基准气候（Benchmark Climate） $\tilde{C}^1$ ，根据微分链式法则，第  $\kappa$  维气候因子（例如气温）的边际变化产生的总效应为：

$$\frac{dy(\tilde{C}^1)}{d\tilde{c}_\kappa} = \sum_{k=1}^K \frac{\partial z[C(\tilde{C}^1), B^*(\tilde{C}^1)]}{\partial c_k} \frac{dc_k}{d\tilde{c}_\kappa} + \sum_{k=1}^K \frac{\partial z[C(\tilde{C}^1), B^*(\tilde{C}^1)]}{\partial b_n} \frac{db_n}{d\tilde{c}_\kappa} \quad (7)$$

根据定义， $y$  是值函数  $z(\cdot)$  最优化的结果，并且  $z(\cdot)$  为可微的凹函数，因此存在  $\frac{\partial z[C(\tilde{C}^1), B^*(\tilde{C}^1)]}{\partial b_n} = 0$ 。上述表达式可简化为：

$$\frac{dy(\tilde{C}^1)}{d\tilde{c}_\kappa} = \sum_{k=1}^K \frac{\partial z[C(\tilde{C}^1), B^*(\tilde{C}^1)]}{\partial c_k} \frac{dc_k}{d\tilde{c}_\kappa} = \sum_{k=1}^K \frac{\partial y(\tilde{C}^1)}{\partial c_k} \frac{dc_k}{d\tilde{c}_\kappa} \quad (8)$$

由于天气因子和气候因子存在一一对应的关系，天气因子的任何边际变化都是由相同气候因子的边际变化所引起的。因此，当  $\kappa = k$  时， $\frac{dc_k}{d\tilde{c}_\kappa} = 1$ ；当  $\kappa \neq k$  时， $\frac{dc_k}{d\tilde{c}_\kappa} = 0$ 。从而存在以下关系：

$$\frac{dy(\tilde{C}^1)}{d\tilde{c}_\kappa} = \frac{\partial y(\tilde{C}^1)}{\partial c_k} \quad (9)$$

① 假设值函数  $z(\cdot)$  为可微的凹函数，即存在唯一的内点解  $B^*$  使得  $z(\cdot)$  最大化。

结果变量  $y$  对气候因子  $\widetilde{C}_k$  的全微分等于其对天气因子  $c_k$  的偏微分, 该表达式意味着气候因子边际变化产生的总效应等于对应的天气因子的边际效应。如果基准气候从  $\widetilde{C}^1$  变动到了  $\widetilde{C}^2$ , 根据线性积分基本定理 (Fundamental Theory of Line Integrals) 可知:

$$y(\widetilde{C}^2) = \int_{c^1}^{c^2} \frac{dy(C)}{dC} \cdot dC + \delta = \int_{c^1}^{c^2} \frac{\partial y(C)}{\partial C} \cdot dC + \delta = \int_{c^1}^{c^2} \nabla_c y(C) \cdot dC + \delta \quad (10)$$

其中,  $\delta = y(\widetilde{C}^1)$  表示积分常量。因此, 当基准气候从  $\widetilde{C}^1$  变动到了  $\widetilde{C}^2$  时, 结果变量  $y$  的变化可以通过对天气变化的边际效应进行积分运算获得:

$$y(\widetilde{C}^2) - y(\widetilde{C}^1) = \int_{c^1}^{c^2} \nabla_c y(C) \cdot dC \quad (11)$$

其中,  $\nabla_c y(C) = \left[ \frac{\partial y}{\partial c_1}, \dots, \frac{\partial y}{\partial c_k} \right]$  表示一个由各天气因子的边际效应所构成的向量, 向量中的元素是相关计量模型中各天气因子的回归系数。因此, 在气候—经济实证研究中, 研究者可以利用天气变化来精确识别气候效应。事实上, 本文第三部分介绍的气候—经济实证研究文献中的绝大部分是直接利用天气变化来识别和预测气候变化的效应。

### 三、计量实证研究方法及其应用

#### (一) 截面数据分析方法

为了估计气候变化的经济效应, 通常建立如下函数关系:

$$y = f(C, X) \quad (12)$$

其中,  $y$  表示结果变量 (如收入、农业产出等);  $C$  表示气候变量 (向量), 包括气温、降雨和极端天气事件 (如风暴、飓风和热带气旋等);  $X$  表示其他控制变量, 它由一系列与  $C$  相关并影响最终结果  $y$  的变量组成。

早期的研究大多采用以下形式的截面回归模型来估计气候与产出之间的关系:

$$y_i = \alpha + \beta_c C_i + \gamma X_i + \varepsilon_i \quad (13)$$

其中, 下标  $i$  表示不同的层面地理区域, 如国家、省 (州)、市或县 (郡) 等。 $y_i$  包括农业产出、国民收入等。 $C_i$  是由气候因子组成的一组向量, 可能包含气温、降水和风速等一系列气候因子<sup>①</sup>。 $X_i$  表示一组其他能够影响因变量  $y_i$  且与  $C_i$  相关

① 截面模型中通常使用某一地区 (数年、数十年甚至数百年的) 平均气温和平均降水等统计指标来描述该地区的气候。

的外生变量。实践中研究者通常会报告该回归模型的稳健标准误，即通过（同级或更高级地理区域）对随机干扰项 $\varepsilon_i$ 进行聚类处理，以允许样本之间存在空间相关，或参照 Conley（1999）的处理方法，设定样本之间的空间相关性随距离增大而逐渐衰减。

截面数据分析方法大致可分为两类。一类被称为生产函数法（一些研究模拟了作物生长过程），通过建立气候与作物产量之间的函数关系，并利用估计的生产函数模拟气候变化对农业生产的影响（Adams, 1989; Hansen, 1991; Kaiser et al., 1993; Rosenzweig and Parky, 1994; Adams et al., 1995; Lobell et al., 2007）。生产函数法常使用实验数据来进行校准分析，该方法的一个重要缺陷在于它难以刻画农户适应气候变化的能力：在生产函数法的基本设定下，农户既不能引入新的作物品种，也无法改变农地用途。截面数据模型另一个经典的例子来自 Mendelsohn 和 Shaw（1994）采用的特征价格模型（Hedonic Model）。他们以农场价格为因变量，以作物生长季节气温和农场的其他特征为自变量进行回归分析，并利用估计的参数预测未来气候变化对美国农业的影响。由于农场主了解当地的气候及其历史变化，也能够对未来气候变化的趋势做出一定的预测。因此，他们会通过及时调整种植结构或改变土地用途来实现自身利润最大化，所有的这些适应措施的成效都将最终反映到农地市场价格上。因此，相比于以农作物产量为被解释变量的回归模型（生产函数法），以农地价格作为被解释变量的特征价格模型能够更为准确地识别出气候变化对农业生产的真实影响。

截面数据回归方法面临的一个潜在问题是它很可能存在遗漏变量偏误（遗漏了一些能够影响因变量 $y_i$ 并且与 $C_i$ 或 $X_i$ 相关的因素）。例如，Schlenker 等（2005）的研究指出 Mendelsohn 和 Shaw（1994）采用的特征价格模型对灌溉这一因素特别敏感，将“灌溉可得性”这一指标加入模型后，Mendelsohn 和 Shaw（1994）得出的“气候变化对农业没有显著影响”的结论在旱作农业区并不成立。实际上，气候变化（变暖）能显著降低旱作农业区的土地价格。实际研究中规避模型遗漏变量风险的一个常见做法是，在截面回归模型中控制足量的解释变量，如 Nordhaus（2006）在他所构建的全球层面地理-经济截面模型中控制了平均气温、平均降雨、平均海拔高度、崎岖程度、土壤类别和到港口距离等众多影响因素。解决模型遗漏变量偏误的另一种可选做法是，限制观察值的次级样本（Sub-samples of Observations）。比如 Dell 等（2009）考察气温对人均收入的影响时，使用了 12 个国家的（地级）市级层面数据，控制了国家固定效应、州（省）固定效应进行回归分析，这一做法有效地缓解了跨国截面回归中存在的遗漏变量偏误。Albouy 等（2010）分析气温对美国房价的影响时，只进行了区内比较（Within-locality Comparison）而没有进行跨区比较（Cross-locality Comparison），一些不可观测的片区固定特征可能与气候因子相关，从而导致模型参数估计存在偏误。

需要特别指出的是，通过往截面回归模型中加入足够多的控制变量这一方式，并

不一定就能够减少模型的估计偏误,如果加入的控制变量是内生的或其本身就由气候决定[即 $X = X(C)$ ],那么模型中引入这些控制变量将产生所谓的“坏控制”(Bad Controls)和“过度控制问题”(Over-controlling Problem)。此外,一些不随时间变化的因素(如地理、文化、习俗和制度等)也可能影响因变量 $y_i$ (它们中的一些可能与气候变量 $C_i$ 和控制变量 $X_i$ 高度相关),由于相关数据可能难以获取或者根本无法准确观测,截面回归模型往往无法将它们加入。

## (二) 面板数据分析方法

由于截面数据分析方法往往存在遗漏变量偏误并且无法描述人类适应气候变化能力的变化。近10年来应用计量经济学家开始利用面板数据分析方法来考察天气冲击的影响,并以面板数据模型估计的参数来推断或预测气候变化的潜在影响。<sup>①</sup> 面板数据模型的回归方程一般采用以下形式:

$$y_{it} = \beta_{pn} C_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_{it} + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

其中,下标 $t$ 表示时间(年、月、日、季度), $\mu_i$ 表示地区固定效应,它包含了(所有可观测的和不可观测的)不随时间变化的地区异质性特征。 $\rho_{it}$ 表示时间趋势,它可能是线性时间趋势也可能是二次或多项式形式的时间趋势,一些研究中还允许因变量存在区域特定时间趋势。相比于截面数据模型,面板数据模型在识别方面存在显著优势,通过控制截面固定效应和时间趋势项,模型存在遗漏变量偏误的风险大大降低。<sup>②</sup> 此外,由于天气变量本身是随机的且严格外生的,因此面板数据模型在因果识别方面不会存在争议。近些年来,利用面板数据模型研究气候效应的文献迅速增长,因变量 $y$ 的范围也逐渐扩大,现已包含经济增长、农业和工业产出、人类健康(死亡率)、劳动生产率、能源消费、政治冲突、犯罪率、人口迁移和国际贸易等。一些代表性作品包括 Deschênes 和 Greenstone (2007) 关于天气冲击与农业的研究, Dell 等 (2012) 关于天气冲击与经济增长的研究, Burke 等 (2009) 关于气温冲击和政治冲突的研究, Deschênes 和 Greenstone (2011) 关于极端天气与人口死亡率的研究, Jones 和 Olken (2010) 关于天气冲击与国际贸易(出口)的研究以及 Hsiang (2010) 关于飓风冲击对国民经济和部门经济影响的研究等。

实践中气候经济学家还分别采用了一系列具体的面板数据计量经济模型来考察天气-经济之间的非线性效应、天气冲击的时滞和位移、天气效应的异质性以及调节因

<sup>①</sup> Deschenes 和 Greenstone (2007) 发表于《美国经济评论》的题为“The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather”的论文被视为面板数据模型应用于气候变化经济分析的开山之作。

<sup>②</sup> 面板数据模型仍可能存在遗漏变量问题(一些随时间变化的解释变量),往模型中加足够多的控制变量同样可能产生“过度控制问题”。比如,在国民收入和气候的回归模型中加入投资就可能产生问题,如果投资本身也是由气候决定的话。实践中较为稳妥的做法是,模型中仅仅控制一些严格外生的解释变量,比如其他天气因素或外生冲击。



子的实际效果。

### 1. 非线性效应

天气—经济之间的关系很可能是非线性的。比如，对于人类来说，存在一个舒适的气温区间，气温过高或是过低都会带来不舒适感，极端气温会造成人体健康受损甚至死亡。对于农作物来说，情况也非常相似，它们在适宜的气候条件下生长良好，一旦某些气候因子（如气温）超出了某一阈值，农作物产量将出现严重下滑。一般通过下述回归方程来描述这种非线性效应：

$$y_{it} = \beta f(C_{it}) + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_{it} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

其中，函数  $f(\cdot)$  描述了气候因子与因变量之间的非线性关系。实证研究中常常使用多项式方程来估计变量之间的非线性关系，一个  $Q$  阶多项式回归方程可表达如下：

$$y_{it} = \sum_{q=1}^Q \beta_q (C_{it})^q + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_{it} + \varepsilon_{it} \quad (16)$$

当  $Q=2$  时，它是一个二项式，若存在  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ，那么气候因子与因变量之间呈现倒 U 型关系。Burke 等（2015a）利用了二项式回归方程估计了全球 166 个国家天气冲击与经济增长的关系。他们发现平均气温和经济增长率之间存在倒 U 型关系，生产率的峰值出现在年平均气温为  $13^\circ\text{C}$  时，更高的平均气温将导致经济增长率急剧下降。Schlenker 和 Roberts（2009）采用了 8 阶多项式回归方程（ $Q=8$ ）估计了气温与玉米、大豆和棉花产量之间的非线性关系。他们发现，每一种作物都存在一个适合其自身条件的气温阈值，低于该阈值时，气温的上升会提高产量，一旦气温高于其阈值（玉米的阈值为  $29^\circ\text{C}$ ，大豆的阈值为  $30^\circ\text{C}$ ，棉花的阈值为  $32^\circ\text{C}$ ），气温的继续上升将导致作物产量大幅下降。

由于经济产出变量通常是低频的（比如，年人均收入或年作物产出），而天气因子往往是高频的（比如，日平均气温、日总降水量），通过对天气变量进行某种非参数化处理，比如构造区间函数，同样可以精确估计出天气因子与产出变量之间的非线性关系。举一个具体例子，对于日平均气温，可以将其分隔成多个气温区间，（比如， $\dots$ ， $0 \sim 3^\circ\text{C}$ ， $3 \sim 6^\circ\text{C}$ ， $6 \sim 9^\circ\text{C}$ ， $\dots$ ），并计算一年之中日平均气温落在每一个气温区间的天数。对于降水和其他天气因子也可以进行相似的构造。然后，对产出变量和这些新构造的变量进行回归分析：

$$y_{it} = \sum_{m=1}^M \beta_m T_{it}^m + \sum_{n=1}^N \beta_n P_{it}^n + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_{it} + \varepsilon_{it} \quad (17)$$

其中， $M$  和  $N$  分别表示气温区间和降水区间的个数，二者可以相同也可以不同。 $T_{it}^m$  表示一年中日平均气温落在第  $m$  个气温区间内的天数， $P_{it}^n$  表示一年中降水量落在第  $n$  个降水区间内的天数。注意到回归模型的这一个构造允许不同区间的天

气因子拥有截然不同的边际效应，但假定同一区间内不同气温的边际效应相等，即炎热的天气（如 27 ~ 30℃）的边际效应不同于温和天气（12 ~ 15℃）的边际效应，但 27℃的边际效应与 29℃的边际效应相等，因为它们位于同一个气温区间内。当然，根据实际研究的需要，区间可以放大或缩小（如间隔为 10℃、5℃、2℃甚至 1℃）。目前已有不少研究采用近似的方法考察了天气因子与因变量的非线性关系。比如考察气温与人口死亡率之间的非线性关系（Deschênes and Moretti, 2009；Deschênes and Greenstone, 2011；Barreca, 2012；Barreca et al., 2015, 2016）、气温、降水与人均收入的非线性关系（Deryugina and Hsiang, 2014）以及气温和企业全要素生产率（总产出）之间的非线性关系（Zhang et al., 2016）。总体来说，目前基于面板数据的研究大多采用区间回归方法，像 MIDAS（Mixed-data Sampling）这类基于时间序列的混频数据模型（Andreou et al., 2010, 2013）、Copula 模型等非参数模型等（Madadgar and Moradkhani, 2011；Yin et al., 2018）的应用研究比较少见。

## 2. 位移和时滞效应

天气冲击的影响可能存在位移和时滞现象。比如发生  $t_1$  期的极端天气事件不仅会影响因变量在当期的表现，还可能影响因变量在  $t_1 + 1$  期甚至在  $t_1 + L$  期的表现。分布滞后模型常被用于检验天气冲击（极端天气事件）的长期影响：

$$y_{it} = \sum_{l=0}^L \beta_l C_{it-l} + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_{it} + \varepsilon_{it} \quad (18)$$

其中， $L$  表示最大滞后阶数， $\beta_{l=0}$  表示天气冲击的即期效应， $\beta_{l>0}$  表示天气冲击的滞后效应。一个天气事件的累积效应（净效应）可通过计算下述表达式获得：

$$\Omega_{\eta} = \sum_{l=0}^{\eta} \beta_l \quad (19)$$

其中， $\Omega_{\eta}$  表示一个天气事件从第 0 期到第  $\eta$  期的累积效应（ $\eta \leq L$ ）。天气冲击的位移效应描述的是  $\beta_{l=0}$  与  $\beta_{l>0}$  符号相反并且最终的累积效应  $\Omega_{\eta=L} = 0$  的情形。Deschênes 和 Moretti（2009）在研究极端高温和人口死亡率关系时就发现了极端高温（ $> 100^{\circ}\text{F}$ ）的影响存在时间位移现象或称之为“收获”（Harvesting）现象，其具体表现为：极端高温天气使得当月人口死亡率出现大幅上升，而随之而来的几个月人口死亡率却持续下降，即人口死亡率在时间上发生了位移，极端高温天气使得一些原本就即将离世的人群大规模地提前死亡。Dell 等（2012）采用了上述分布滞后模型考察了气温冲击对经济增长的影响，他们发现气温冲击对穷国经济增长率的累积效应与其即期效应相近，从而得出了气温冲击制约穷国经济增长的结论。Hsiang 和 Jina（2014）利用自回归分布滞后模型（包含  $y$  的 1 ~ 4 阶滞后）考察了飓风对经济增长的影响，他们发现飓风对经济增长存在负面效应，并且这种效应随时间不断累积，飓

风侵袭使得 1970—2008 年全球经济增长率降低了 1.3 个百分点左右。<sup>①</sup> 天气冲击的时滞效应描述的是即期效应  $\beta_{l=0}$  等于 0 或接近 0 而滞后效应  $\beta_{l>0}$  非常大的情形。比如, Deryugina (2011) 以及 Anttila-Hughes 和 Hsiang (2013) 在研究飓风对收入和就业的影响时就发现了明显的时滞效应。

### 3. 交互项 (Intersection)

交互项方法在气候经济学实证研究应用得非常广泛。在面板数据回归模型中加入天气与地区特征 (个体) 构造的交互项, 可以考察天气冲击效应在不同国家 (地区、个体) 间的差异, 评估如暖气、空调等调节因子 (Modifiers), 在减轻天气冲击的负面效应方面的作用。

通过在面板数据回归模型中引入交互项:

$$y_{it} = \beta_{pn} C_{it} + \gamma X_{it} + \delta C_{it} \times K_i + \mu_i + \rho_n + \varepsilon_{it} \quad (20)$$

其中,  $K_i$  表示地区 (或个体)  $i$  的一组不变特征, 系数  $\delta$  反映了具备这些特征地区在气候敏感度上与其他地区的差异。  $K$  可以是一个地区的基准气候 (Baseline Climate) 特征 (如长期平均气温、降水和风速等), 因为基准气候不同, 对天气冲击的反应也可能不同。比如寒带地区的居民在暴风雪天气发生时遭受的不利冲击可能远小于温带和热带地区的居民, 因为寒带地区的居民长期生活在冰天雪地的环境中, 他们更懂得如何去适应和应对暴风雪的侵袭。 Dell 等 (2012) 在回归中使用了年平均气温和历史平均气温构造的交互项,<sup>②</sup> 然而, 他们发现气候炎热的国家对平均气温变动的反应与其他国家并不存在明显差异。 Hsiang 和 Narita (2012) 在考察飓风对经济的影响时发现了适应的证据, 他们发现常常经历飓风 (飓风的平均强度更高) 的国家在强飓风发生时遭受的经济损失更小, 人员伤亡也更少。此外,  $K$  也可以是一个地区的其他特征, 如空调渗透率 (Air-conditioning Penetration)、户均用电量、人均医生数等。 Barreca 等 (2016) 在考察极端高温对人口死亡率的影响时引入极端高温 ( $>90^\circ\text{F}$ ) 和这些调节因子的交互项, 他们发现 20 世纪 60 年代开始家用空调在美国的普及显著降低了极端高温天气对该国人口死亡率的影响。

面板数据模型面临的主要挑战在于, 如何利用模型估计的 (短期) 天气冲击的效应来推断或预测 (长期) 气候变化的效应。正如本文第一小节所指出的那样, 天气骤变的影响和气候变化的影响往往并不一致。一方面, 人类适应气候变化的行为 (如引入耐旱作物、安装家用空调等), 有助于降低不利天气的影响。因此, 气候变

① Hsiang 和 Jina (2014) 还检验了飓风的经济影响是否存在空间位移 (Spatial Displacement) 和远程效应 (Remote Effects), 即估计了以下模型:  $y_{it} = \sum_{\pi=0}^{\Pi} \beta_{\pi} \bar{C}_{j|D(i,j)=\pi,t} + \gamma X_{it} + \mu_i + \rho_n + \varepsilon_{it}$ 。其中,  $\bar{C}_{j|D(i,j)=\pi,t}$  表示所有与地区  $i$  的距离为  $\pi$  的地区  $j$  的气候平均状况。他们没有发现热带飓风存在空间位移和远程效应。

② 他们按国家历史平均气温构造了一个“热国”虚拟变量, 将样本中平均气温高于中位数国家定义为“热国” (Hot Country), 构造了一个交互项: 平均气温  $\times$  “热国”。同时他们还控制了“平均气温  $\times$  ‘穷国’”交互项。

化的效应可能小于天气冲击的效应 ( $|\beta| < |\beta_{pm}|$ ,  $\beta$  表示因变量  $y$  和气候  $C$  的真实关系)。而另一方面, 强化效应 (Intensification) 的存在 (如长期持续的干旱导致荒漠化) 可能导致气候变化的效应远远大于天气冲击的效应, 因为天气冲击对应的是一个量变过程, 而气候变化可能对应一个不可逆的质变过程。因此, 气候变化经济学需要一种方法, 它既能够刻画天气冲击造成的短期效应, 又能够测度气候变化带来的长期效应 (涵盖适应的效果)。

### (三) 混合分析方法 (长期差分法)

针对截面数据模型和面板数据模型在分析气候变化的效应方面可能存在的缺陷, 近期研究者们发展出了一套混合分析方法 (Hybrid Approach), 它被称为长期差分法 (Long Difference Approach), 该方法有助于研究者们量化适应或强化效应的大小。它有两种含义相近但具体形式不同的表达式, 一种可以称之为长期平均模型设定 (Long Average Specification), 它与面板数据模型具有相同计量表达式, 但此时模型中的因变量和自变量都已取其长期平均值:

$$y_{id} = \beta_{id} C_{id} + \gamma X_{id} + \mu_i + \rho_{id} + \varepsilon_{id} \quad (21)$$

注意该模型的时间下标为 ( $d$ ) 而不是 ( $t$ ), 它表示变量的长期平均值, 可以是十年、几十年甚至上百年的平均值。虽然它的计量表达式与上文的面板数据模型非常相似, 但模型估计参数的解释上却存在显著差别。相比于面板数据模型中的  $C_{it}$ ,  $C_{id}$  所描述的变化更接近于气候变化而非天气变化, 因此参数  $\beta_{id}$  描述的是气候因子的中长期效应而非短期效应。

长期差分法的另一种表达式更接近截面数据模型, 可以称之为长期差分模型设定 (Long Difference Specification)。它是通过先对因变量和自变量在 (相隔很远的) 前后两个时间段取平均值, 然后对二者进行差分处理构造而成。假设存在  $\tau_1$  和  $\tau_2$  两个时间段, 每个时间段的跨度为  $n$  年, 长期差分方程可表达如下:

$$y_{i\tau_2} - y_{i\tau_1} = \alpha + \beta_{id} (C_{i\tau_2} - C_{i\tau_1}) + \gamma (X_{i\tau_2} - X_{i\tau_1}) + \varepsilon_i \quad (22)$$

其中,  $\alpha$  表示因变量  $y$  的长期变化。该模型设定主要优点在于, 它检验了“是否气候因子  $C$  的逐渐变化导致了  $y$  的逐渐变化”这一命题。因此, 参数  $\beta_{id}$  测度的是气候变化效应而非天气变化效应。长期差分方程虽然在形式上与截面回归方程相似, 但相比于截面回归模型它明显降低了潜在的遗漏变量风险, 注意到所有不随时间变化的地区异质性特征  $\mu_i$  因差分处理过程而从模型中消失。

由于  $\beta_{id}$  是真实参数  $\beta$  的一个近似值, 实践中研究者只需对比  $\beta_{pm}$  和  $\beta_{id}$  的大小, 便可以推断人类社会是否在长期中适应了气候变化。若存在  $\beta_{id}$  (绝对值) 显著小于  $\beta_{pm}$ , 则表明人类成功地适应了气候变化 (长期效应小于短期效应或气候效应小于天气效应)。目前, 已有一些研究使用了长期差分方法检验了气候变化对经济增长的影响 (Dell et al., 2012)、对农业产量的影响 (Burke and Emerick, 2016)、对冲突的影响

(Burke et al., 2015b)。然而，这些研究并没有发现人类成功适应气候变化的证据。<sup>①</sup>

#### (四) 小结

在本小节前面三部分，本文分别介绍了截面数据分析方法、面板数据分析方法和混合分析方法等三大类气候变化经济学实证研究中常见的计量分析方法。其中，截面数据分析方法以生产函数法和特征价格法为代表；面板数据分析方法包括固定效应模型、分布滞后模型、非线性模型和交互项方法等；混合分析方法则包括长期平均法和长期差分法。各种计量分析方法都有各自的优缺点，比如，截面数据模型对研究数据频率要求低，但遗漏变量问题难以避免；面板数据模型在因果识别方面优势明显，但其估计系数无法直接用于长期预测（天气变化效应不等同于气候变化效应）；混合分析方法结合了截面数据和面板数据分析方法的优点，但对数据结构要求特别高；等等。表1对这些气候变化计量经济学方法进行了简要的总结。

表1 常见的气候变化计量经济学方法

计量分析方法	优点	缺点	代表文献
截面数据分析方法： (1) 生产函数法 (2) 特征价格法 (3) 截面固定效应模型	直接估计气候变化效应而非天气效应； 不需要高频天气数据 (数据结构简单)	容易遭受遗漏变量偏误； 不能评估天气波动的短期效应； 不能评估适应能力变化	Mendelsohn 和 Shaw (1994)、 Schlenker 等 (2005)、Nordhaus (2006)、Dell 等 (2009)
面板数据分析方法： (1) 面板固定效应模型 (2) 非线性效应 (3) 面板分布滞后模型 (4) 交互项方法	缓解截面模型中存在的 遗漏变量偏误； 直接有效地实现因果 识别	系数估计天气波动效应而非 气候变化效应； 难以刻画长期中的适应 行为	Deschênes 和 Greenstone (2007)、 Schlenker 和 Roberts (2009)、 Deschenes 和 Moretti (2009)、 Barreca 等 (2016)
混合分析方法： (1) 长期平均法 (2) 长期差分法	综合了截面数据和面 板数据分析方法各自 的优点； 探索气候响应的变化	对数据要求高(长时间跨 度的面板数据)； 截面数据和面板数据模型 的缺陷不能完全避免	Dell 等(2012)、Burke 和 Emerick (2016)、Burke 等(2015a)

资料来源：作者整理得到。

## 四、评述与展望

过去十多年来，针对气候变化的经济学研究在方法学上取得了长足的进步，该领域的研究成果颇丰。总的来说，气候变化经济学在研究方法方面表现以下三大趋势。

<sup>①</sup> Dell 等 (2012) 发现，对于穷国而言， $\beta_{id} > \beta_{pm}$ ，即穷国中存在强化 (Intensification) 现象而非适应 (Adaptation) 现象，因此，气候变化对穷国经济增长的影响不容忽视。

(1) 实证计量方法不断进步。早期的研究大多采用截面回归方法(包含生产函数法、特征价值模型等),随后大部分研究则采用(动态)面板数据模型和分布滞后模型方法来克服遗漏变量偏误和模型误设问题。(2) 考察气候冲击的非线性效应。最近的研究通过在模型中引入二项式、多项式,设置温度和降雨区间,构造极端气候强度指数(比如热指数)等方式考察气候冲击的非线性效应。(3) 对人类适应气候变化的能力进行研究。最近的研究通过对比不同气候带(区域)气候反应函数的差异,对比气候冲击的短期效应和长期效应,采用长期差分、长期平均方法,或通过模型中引入交互项(如气温与空调占有率、降雨量与蓄水池数量交互项)等方式测度人类适应气候变化能力的大小。

虽然气候变化经济学仅仅是环境经济学领域的一个很小的分支并且起步较晚,但其研究深度和广度都不亚于环境经济学的其他任何领域,自然科学和社会科学学科交叉在这一领域也取得了非常好的成效。早期关于气候(变化)经济效应的研究主要集中在农业领域,最近十年以来其研究对象开始延伸到包括经济增长、人类健康、劳动生产率、政治冲突、能源消费、工业生产和国际贸易等在内的更广泛领域。随着研究对象的不断扩展,研究数据来源多样,如新近的一些研究开始使用网络大数据进行研究(Kirilenko et al., 2015; Baylis, 2015),必然要求研究方法不断进步,我们期待气候变化经济学研究方法取得新进展,推动整个环境经济学学科乃至整个经济学科不断发展。

## 参考文献

秦大河(2015):《中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》,北京:经济科学出版社。

沈永平、王国亚(2013):《IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点》,《冰川冻土》第5期,第1068~1076页。

Adams, R. M. (1989), "Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective", *American Journal of Agricultural Economics*, 71 (5), pp. 1272 - 1279.

Adams, R. M., R. A. Fleming and C. C. Chang, et al. (1995), "A Reassessment of the Economic Effects of Global Climate Change on US Agriculture", *Climatic Change*, 30 (2), pp. 147 - 167.

Albouy, D., W. Graf and R. Kellogg, et al. (2010), "Aversion to Extreme Temperatures, Climate Change, and Quality of Life", *Working Paper*.

Andreou, E., E. Ghysels and A. Kourtellos (2010), "Regression Models with Mixed Sampling Frequencies", *Journal of Econometrics*, 158, pp. 246 - 261.

Andreou, E., E. Ghysels and A. Kourtellos (2013), "Should Macroeconomic Forecasters Use Daily Financial Data and How?", *Journal of Business and Economic Statistics*, 31, pp. 240 - 251.

Anttila-Hughes, J. and S. M. Hsiang (2013), "Destruction, Disinvestment, and Death: Economic and Human Losses Following Environmental Disaster", <https://gspp.berkeley.edu/assets/uploads/research/pdf/SSRN-id2220501.pdf> [2019-01-20].

Barreca, A. I. (2012), “Climate Change, Humidity, and Mortality in the United States”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 63 (1), pp. 19 – 34.

Barreca, A. , K. Clay and O. Deschenes, et al. (2015), “Convergence in Adaptation to Climate Change: Evidence from High Temperatures and Mortality, 1900 – 2004”, *The American Economic Review*, 105 (5), pp. 247 – 251.

Barreca, A. , K. Clay and O. Deschenes, et al. (2016), “Adapting to Climate Change: The Remarkable Decline in the US Temperature-Mortality Relationship over the Twentieth Century”, *Journal of Political Economy*, 124 (1), pp. 105 – 159.

Baylis, P. (2015), “Temperature and Temperament: Evidence from a Billion Tweets”, *Energy Institute at HAAS Working Paper*.

Burke, M. , E. Miguel and S. Satyanath, et al. (2009), “Warming Increases the Risk of Civil War in Africa”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (49), pp. 20670 – 20674.

Burke, M. and K. Emerick (2016), “Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture”, *American Economic Journal: Economic Policy*, 8 (3), pp. 106 – 140.

Burke, M. , S. M. Hsiang and E. Miguel (2015a), “Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production”, *Nature*, 527 (7577), p. 235.

Burke, M. , S. M. Hsiang and E. Miguel (2015b), “Climate and Conflict”, *Annual Review of Economics*, 7 (1), pp. 577 – 617.

Conley, T. G. (1999), “GMM Estimation with Cross Sectional Dependence”, *Journal of Econometrics*, 92 (1), pp. 1 – 45.

Dell, M. , B. F. Jones and B. A. Olken (2009), “Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates”, *American Economic Review*, 99 (2), pp. 198 – 204.

Dell, M. , B. F. Jones and B. A. Olken (2012), “Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4 (3), pp. 66 – 95.

Dell, M. , B. F. Jones and B. A. Olken (2014), “What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature”, *Journal of Economic Literature*, 52 (3), pp. 740 – 798.

Deryugina, T. (2011), “The Dynamic Effects of Hurricanes in the US: The Role of Non-disaster Transfer Payments”, *Working Paper*.

Deryugina, T. and S. M. Hsiang (2014), “Does the Environment Still Matter? Daily Temperature and Income in the United States”, *NBER Working Papers*.

Deschênes, O. and E. Moretti (2009), “Extreme Weather Events, Mortality, and Migration”, *The Review of Economics and Statistics*, 91 (4), pp. 659 – 681.

Deschênes, O. and M. Greenstone (2007), “The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather”, *The American Economic Review*, 97 (1), pp. 354 – 385.

Deschênes, O. and M. Greenstone (2011), “Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US”, *American Economic Journal: Applied Economics*, 3 (4), pp. 152 – 185.

Hansen, L. R. (1991), “Farmer Response to Changes in Climate: The Case of Corn Production”,

*Journal of Agricultural Economics Research*, 43 (4), pp. 18 – 25.

Hsiang, S. M. (2010), “Temperatures and Cyclones Strongly Associated with Economic Production in the Caribbean and Central America”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (35), pp. 15367 – 15372.

Hsiang, S. M. (2016), “Climate Econometrics”, *Annual Review of Resource Economics*, 8 (1), pp. 815 – 820.

Hsiang, S. M. and A. S. Jina (2014), “The Causal Effect of Environmental Catastrophe on Long-run Economic Growth: Evidence from 6, 700 Cyclones”, *NBER Working Papers*.

Hsiang, S. M. and D. Narita (2012), “Adaptation to Cyclone Risk: Evidence from the Global Cross-section”, *Climate Change Economics*, 3 (2), pp. 1 – 28.

Jones, B. F. and B. A. Olken (2010), “Climate Shocks and Exports”, *The American Economic Review*, 100 (2), pp. 454 – 459.

Kaiser, H. M., S. J. Riha and D. S. Wilks, et al. (1993), “A Farm-level Analysis of Economic and Agronomic Impacts of Gradual Climate Warming”, *American Journal of Agricultural Economics*, 75 (2), pp. 387 – 398.

Kirilenko, A. P., T. Molodtsova and S. O. Stepchenkova (2015), “People as Sensors: Mass Media and Local Temperature Influence Climate Change Discussion on Twitter”, *Global Environmental Change*, 30 (2015), pp. 92 – 100.

Lobell, D. B., K. N. Cahill and C. B. Field (2007), “Historical Effects of Temperature and Precipitation on California Crop Yields”, *Climatic Change*, 81 (2), pp. 187 – 203.

Madadgar, S. and H. Moradkhani (2011), “Drought Analysis under Climate Change Using Copula”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (7), pp. 746 – 759.

Mendelsohn, R. and N. D. Shaw (1994), “The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis”, *The American Economic Review*, 84 (4), pp. 753 – 771.

Nordhaus, W. D. (2006), “Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (10), pp. 3510 – 3517.

Pachauri, R. K., M. Allen and V. Barros, et al. (2014), *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*, Bremerhaven, Ger.: Alfred-Wegener-Inst.

Rosenzweig, C. and M. L. Parry (1994), “Potential Impact of Climate Change on World Food Supply”, *Nature*, 367 (6459), pp. 133 – 138.

Schlenker, W. and M. J. Roberts (2009), “Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US Crop Yields under Climate Change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (37), pp. 15594 – 15598.

Schlenker, W., W. M. Hanemann and A. C. Fische (2005), “Will US Agriculture Really Benefit from Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach”, *The American Economic Review*, 95 (1), pp. 395 – 406.

Stocker, T. F., D. Qin and G. K. Plattner, et al. (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge: Cambridge University Press.



Yin, J., S. Guo and S. He, et al. (2018), “A Copula-based Analysis of Projected Climate Changes to Bivariate Flood Quantiles”, *Journal of Hydrology*, 566, pp. 23 – 42.

Zhang, P., J. J. Zhang and O. Deschenes, et al. (2016), “Temperature Effects on Productivity and Factor Reallocation: Evidence from a Half Million Chinese Manufacturing Plants”, *Working Paper*.

## A Review on the Econometrics of Climate Change

LI Cheng-zheng<sup>1</sup>, LI Xu-hui<sup>2</sup>, GU Hai-ying<sup>2</sup>

(1. Institute of Economic and Social Research, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

2. Antai School of Economics and Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Global climate change is a common concern of the human society. However, there are few studies which introduces methodology of climate change econometrics. Firstly, this paper defines several basic concepts in climate change economics, such as weather, climate, weather effect and climate effect. Second, introduce the econometric methods commonly used in climate economics and their application in empirical research. It includes cross-section data analysis, such as production function and hedonic approach; panel data analysis, such as panel data fixed effect model, distributed lag model, nonlinear model and interactive term and compound analysis, such as long-average approach and long difference approach. And show the advantages and disadvantages of these methods. Finally, this paper comments the current research and points out the direction of further research.

**Key Words:** climate; weather; effects of climate change; identification; empirical methods

责任编辑：张莹