

氣候變遷對全球總體經濟的長期影響

楊睿中*

一、氣候影響經濟表現的舊實證證據值得商榷

在過去半個世紀裡，全球氣溫顯著升高，並可能引發多種衝擊，包括寒流與熱浪、乾旱與洪水、颶風、海平面上升，以及極端天氣的反覆變化 (IPCC, 2021)。這些天氣型態分布的改變，也就是所謂的氣候變遷，不僅影響低收入國家與新興市場，同樣波及已開發經濟體。氣溫的持續升高、降水型態的轉變，或更為劇烈的天氣事件，都可能帶來深遠的總體經濟後果，例如降低勞動生產力、抑制投資，並危害人類健康。

有關天氣或氣候對經濟表現的影響的量化研究，近年來快速增加——可參見 Stern (2007)、IPCC (2014)、Hsiang (2016)、Cashin et al. (2017)、Letta and Tol (2019)、Henseler and Schumacher (2019)、Kahn et al. (2021)、Mohaddes et al. (2023)、Desbordes and Eberhardt (2024)、Kotz et al. (2024)，以及 Tol (2009)、Dell et al. (2014)、Tol (2018) 的綜述性研究。

然而，關於氣候影響經濟表現的實證證據，仍存在不少值得商榷之處。首先，依賴橫斷面資料的研究 (例如：Sachs and Warner, 1997；Gallup et al., 1999；Nordhaus, 2006；以及 Kalkuhl and Wenz, 2020) 以不同國家在同一時點的氣候差異來推論單一國家在不同時間面對不同氣候所造成的影響，本身就存在方法論上的爭議；並且可能遺漏對經濟表現具有重要影響的變數，如制度因素等。較新的研究多改採追蹤資料 (panel data) 模型，來估計天氣衝擊對經濟的影響，例如 Burke et al. (2015)、Dell et al. (2009, 2012, 2014)、Hsiang (2016)。

其次，天氣與總體經濟關係的計量模型，往往以人均 GDP 成長率與氣溫水準 T_{it} 為核心變數，有時也會加入平方項 T_{it}^2 (參見 Dell et al., 2012; Burke et al., 2015; Kalkuhl and Wenz, 2020)。然而，由於 T_{it} 在幾乎所有國家中都呈現長期上升趨勢，若直接將其納入迴歸式，會在模型中為人均產出成長引入一個並未獲

* 國立臺灣大學經濟學系副教授

得實證資料支持的虛假線性趨勢。這個問題在既有文獻的模型規格中相當普遍。因此，Mendelsohn (2016) 與 Tol (2021) 主張，研究者應將 T_{it} 與其長期平均值的偏離作為關注焦點，藉此在追蹤資料的研究中獲得不偏估計。這樣的轉換同時也隱含了一種「適應」(adaptation) 的模型化方式。

第三，追蹤資料研究中常用的固定效果 (fixed effects, FE) 估計式，往往假設氣候變數是嚴格外生的。然而，在 Nordhaus (1992) 的動態整合氣候經濟模型 (the Dynamic Integrated Climate-Economy model, DICE model) 中，核心思想正是必須考慮經濟成長與氣候變遷之間的雙向回饋效應。DICE model 指出，更快速的經濟活動會增加溫室氣體 (greenhouse gases, GHGs) 的累積排放，進而推升平均氣溫 (可能伴隨長期滯後)；同時，氣溫上升又會抑制經濟活動。因此，在估計氣溫對經濟成長的影響時， T_{it} 不應被視為嚴格外生，而更合理的假設是其僅為弱外生 (weakly exogenous) 或預定決定 (pre-determined) 於所得成長——換言之，過去的經濟成長可能對未來的氣溫產生回饋效應。

此外，固定效果估計量在動態追蹤資料中已知存在小樣本時間維度偏誤 (small-T bias, 見 Nickell, 1981)，特別是在橫斷面樣本數 N 大於時間序列長度 T 的情況下。Chudik et al. (2018) 進一步指出，只要模型中的一個或多個解釋變數不是嚴格外生，不論是否納入被解釋變數的落後項，偏誤都會發生。在這種情況下，若依賴傳統的 FE 估計式，統計推論將失去效力，並可能造成嚴重的檢定扭曲，除非在 $N, T \rightarrow \infty$ 的極限下同時滿足 $N/T \rightarrow 0$ 。

二、Kahn et al. (2021, *Energy Economics*) 的貢獻

我們的研究——包括我與 Matthew E. Kahn、Kamiar Mohaddes、Ryan N. C. Ng、M. Hashem Pesaran、以及 Mehdi Raissi 於 2021 年發表在 *Energy Economics* 的研究 (Kahn et al., 2021)，以及其他後續的研究，嘗試回應這些問題。在 Kahn et al. (2021) 這篇文章中，我們研究氣候變遷所引起的天氣型態變化，對 1960 至 2014 年間 174 個國家的長期總體經濟影響。天氣可能會影響各地的產出水準，例如透過改變農業產量；而氣候變遷則透過改變天氣的長期平均值與波動性，可能進一步削弱經濟的長期成長能力，例如降低投資和勞動生產力。¹ 我們

¹ 天氣是指短期內的大氣狀況，例如氣溫和降水量。氣候則描述天氣的長期平均水平及其變異性。氣候變遷則指「氣候狀態發生改變，這種改變可以透過平均值或其他氣候特徵的變異性進行統計檢測識別，且通常會持續較長時間，通常為數十年甚至更久」。(IPCC, 2014)

同時關注這兩種影響，並構建了一個理論成長模型，將氣溫與降水量（天氣）相對於其長期移動平均歷史標準（氣候）的偏離，與人均實質產出成長之間建立聯繫。

在我們的實證分析中，我們同時考慮了氣候變數與總體經濟變數之間的動態關聯與回饋效應，並區分水準效應與成長效應（包括長期影響）、考量天氣效應的非對稱性，還檢驗了天氣衝擊在不同氣候條件下的差異性影響。此外，我們使用氣溫與降水量相對於其歷史常態的偏離值作為變數，同時允許非線性關係並隱含考量適應行為，這樣可以避免在產出成長方程中直接使用呈現趨勢的變數（如氣溫）所帶來的計量問題。我們指出，氣溫在全球幾乎所有國家都呈現明顯上升趨勢，如果直接將其作為迴歸解釋變數，可能會導致虛假的結果。

我們在以下幾個方面對相關文獻作出貢獻。首先，我們明確地對天氣衝擊的水準效應或成長效應建立模型，並估計氣溫持續上升對長期宏觀經濟的影響。

其次，我們採用 Chudik et al. (2018) 提出的 half-panel jackknife 固定效果估計式 (HPJ-FE)，以解決常用固定效果估計量在 T_{it} 弱外生時可能出現的偏誤與檢定扭曲問題。當追蹤資料的時間維度相對於橫斷面樣本數 N 屬於中等時，HPJ-FE 估計量能有效校正 Nickell 偏誤 (Nickell, 1981)，並對經濟總體活動對氣候變數的潛在回饋效應具有穩健性。

第三，我們利用跨國資料檢驗理論成長模型的預測，資料涵蓋過去 55 年 (1960-2014) 的國家人均 GDP 成長率，以及氣溫與降水量相對於其移動平均歷史常態的偏離值。我們對「偏離值」的關注，是與現有文獻的一大不同：不僅明確建立模型考量天氣型態分布的變化（不僅是氣溫與降水的平均值，還包括其變異性），同時引入隱含的適應模型，並避免在成長迴歸中直接使用呈現趨勢的變數（即 T_{it} ）所帶來的計量陷阱。此外，我們也檢驗非對稱效應。

我們的研究發現，一連串正向或負向的天氣衝擊，會對人均 GDP 成長帶來持續性的負面影響。由於我們在迴歸模型中所測量的是天氣邊際效應的整體影響，因此可以審慎地將其與氣候變遷相連結。具體而言，我們的結果顯示，若氣溫長期內每年較其歷史常態上升（或下降） 0.01°C ，則年均所得成長率將減少約 0.0543 個百分點。我們並未發現持續性的氣溫正向與負向偏離，會在長期成長效應上產生顯著的不對稱性。

同時，我們的實證結果顯示，無論國家是貧窮或富裕，處於炎熱或寒冷氣候，經濟成長都會受到影響，差異僅在程度大小。影響來源不僅包括氣溫持續上升及升溫的速度，也包含氣候變異程度。寒冷國家之所以同樣受害於氣候變遷，其中一個原因是這些地區的升溫速度往往快於炎熱國家。若假設炎熱與寒

冷地區的升溫速度相同，我們的異質性追蹤資料分析仍顯示，寒冷國家雖然承受的邊際天氣效應較小，但依舊為負面影響。

既有文獻大多認為，氣溫上升的總體經濟影響並不均勻，主要對炎熱氣候或低所得國家造成不利後果 (Sachs and Warner, 1997; Jones and Olken, 2010; Dell et al., 2012; IMF, 2017; Mejia et al., 2018)。然而，我們的估計結果進一步指出，低所得國家受到天氣衝擊的邊際效應更大，原因在於它們的調適能力與應對氣候變遷後果的資源有限。但這並不代表富裕國家能完全免於氣候變遷的影響。

為了深化對氣候變遷政策的討論，我們進行了一系列反事實分析，評估 2015 至 2100 年間氣溫逐年上升對各國累積所得的影響，並與一個基準情境相比較 (該基準假設各國氣溫僅依據 1960-2014 年的歷史趨勢上升)。

研究結果顯示，若全球平均氣溫以每年 0.04°C 的速度上升——這對應於代表性濃度路徑 RCP 8.5 (representative concentration pathways 8.5) 的情境，亦即在缺乏減緩 (mitigation) 政策下溫室氣體持續增加——到 2100 年時，全球人均實質 GDP 將下降 7.22%。若各國的氣候變異性同時隨氣溫升高而擴大，則在 RCP 8.5 情境下的經濟損失幾乎會加倍，到 2100 年全球人均實質 GDP 將縮減 13.11%。

相比之下，若能將年均氣溫升幅控制在 0.01°C ——亦即 2015 年 12 月《巴黎協定》所設定的目標——全球的產出損失將大幅減輕，僅約 1.07%。

三、Kahn et al. (2021, *Energy Economics*) 的實證模型

在實證分析中，我們使用了以人口加權的年度氣候資料以及人均實質 GDP。在氣候變數方面，我們考量了氣溫 T_{it} (攝氏度， $^{\circ}\text{C}$) 與降水量 P_{it} (公尺)。具體而言，我們結合 Matsuura and Willmott (2015) 所提供的陸地氣溫與降水觀測數據 (0.5 經緯度網格的逐月時間序列)，以及 CIESIN (2016) 發布的全球人口網格資料 (以 2010 年人口密度為基準)，構建了涵蓋 1900 至 2014 年的各國人口加權氣候資料。

人均實質 GDP 資料則取自世界銀行《世界發展指標》(World Development Indicators, WDI) 資料庫，涵蓋 1960 至 2014 年的觀測值。將人均 GDP 與氣候資料結合後，我們得到了一個不平衡面板數據集，其時間維度 (T) 最長可達 55 年，平均約 39 年；橫斷面維度 (N) 則包含 174 個國家。

考量到全球氣溫呈現明顯上升趨勢，並依循我們包含天氣與氣候變數的理論成長模型，我們的實證分析以以下的追蹤 ARDL 模型為基礎：

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \sum_{\ell=1}^p \varphi_{\ell} \Delta y_{i,t-\ell} + \sum_{\ell=0}^p \boldsymbol{\beta}'_{\ell} \Delta \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,t-\ell}(m) + \varepsilon_{it}$$

其中， y_{it} 表示國家 i 在年分 t 的人均實質 GDP 的自然對數值， α_i 代表國家 i 特定的固定效果。 $\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,t-1}(m)$ 表示國家 i 在年分 t 的人口加權平均氣溫溫度 T_{it} 與降水量 P_{it} 相對於其歷史常態的偏離程度。

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,t-1}(m) &= [\tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m)^+, \tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m)^-, \tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m)^+, \tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m)^-], \\ \tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m) &= \frac{2}{m+1} [T_{it} - T_{i,t-1}^*(m)], \\ \tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m) &= \frac{2}{m+1} [P_{it} - P_{i,t-1}^*(m)], \end{aligned}$$

其中， $T_{i,t-1}^*(m)$ 與 $P_{i,t-1}^*(m)$ 分別表示每個年分 t 向前 m 年的氣溫與降水歷史常態。

$$\begin{aligned} T_{i,t-1}^*(m) &= \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m T_{i,t-l}, \\ P_{i,t-1}^*(m) &= \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m P_{i,t-l}, \end{aligned}$$

將 $\tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m)$ 與 $\tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m)$ 區分為正值與負值，有助於捕捉氣候變化對經濟成長可能存在的非對稱性影響。

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m)^+ &= \max[\tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m), 0], \quad \tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m)^- = \max[-\tilde{\boldsymbol{T}}_{i,t-1}(m), 0], \\ \tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m)^+ &= \max[\tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m), 0], \quad \tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m)^- = \max[-\tilde{\boldsymbol{P}}_{i,t-1}(m), 0]. \end{aligned}$$

氣候常態一般以 $m=30$ 年移動平均計算 (Arguez et al., 2012; Vose et al., 2014)，但為了檢驗結果的穩健性，我們同時計算 $m=20$ 與 $m=40$ 的移動平均。長期平均效應 $\boldsymbol{\theta}$ 則由短期係數 OLS 估計值計算而得：

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{1}{\varphi} \sum_{\ell=0}^p \boldsymbol{\beta}_{\ell}, \quad \text{其中 } \varphi = 1 - \sum_{\ell=1}^p \varphi_{\ell}.$$

在成長迴歸中，我們選擇使用 ARDL 偏離形式（即氣溫與降水量相對於其長期移動平均的歷史常態），而非直接使用氣候變數的水準值或平方項。原因在於，若納入 T_{it} 與 T_{it}^2 ，會在 Δy_{it} 中引入趨勢，而這樣的趨勢實際上並不存在。

此外，採用 ARDL 迴歸還基於若干計量經濟學上的重要考量。Pesaran and Smith (1995)、Pesaran (1997)、Pesaran and Shin (1999) 指出，傳統 ARDL 方法適用於長期分析，無論變數為 $I(0)$ 或 $I(1)$ 都有效，並且對遺漏變數偏誤以及經濟成長與其決定因素之間的雙向回饋效應皆具穩健性。這些特性使 ARDL 在本研究的實證分析中特別合適。

然而，要確保此方法的有效性，模型需納入足夠的落後期數，使解釋變數成為弱外生。Chudik et al. (2016) 證明，只有在落後期數充分長時，追縱資料 ARDL 才能保證一致性。由於我們關注的是氣候變遷對經濟成長的長期影響，因此落後期數必須設得足夠長。在本研究中，所有變數與國家的落後期數一律設為 $p=4$ 。對所有樣本採用相同的落後期數，有助於避免因各別設定而可能引發的資料探勘偏誤。需要強調的是，我們的主要重點在於估計長期效果，而非針對特定國家的短期動態。

四、Kahn et al. (2021, *Energy Economics*) 的實證結果

Kahn et al. (2021) 的表一呈現了方程式中兩種追縱資料 ARDL 迴歸模型的估計結果，以及不同調整速度 ($m=20$ 、 30 和 40) 的情況。我們在欄 (a) 報告了固定效果估計下，氣溫與降水變化對人均 GDP 成長的長期影響 ($\hat{\theta}$)，以及誤差修正項的估計係數 ($\hat{\phi}$)。

表一中的模型設定 1 ($m=30$) 呈現了基準結果。降水變數的 FE 與 HPJ-FE 估計係數 $\hat{\theta}_{\Delta \bar{P}_{i,t-1}(m)^+}$ 與 $\hat{\theta}_{\Delta \bar{P}_{i,t-1}(m)^-}$ 在統計上並不顯著。然而， $\hat{\theta}_{\Delta \bar{T}_{i,t-1}(m)^+}$ 與 $\hat{\theta}_{\Delta \bar{T}_{i,t-1}(m)^-}$ 均在統計上顯著，顯示當氣溫持續偏離其時間變動的歷史常態時，長期經濟成長會受到負面影響。

HPJ-FE 的估計結果顯示，氣溫每年相對歷史常態上升 0.01°C ，將使人均實質 GDP 成長率每年下降 0.0577 個百分點（計算方式為 $-0.894 \times 2/(30 + 1)$ ）；而氣溫每年相對歷史常態下降 0.01°C ，將使人均實質 GDP 成長率每年下降 0.0505 個百分點（計算方式為 $-0.783 \times 2/(30 + 1)$ ）。

如預期，FE 估計值（文獻中常用的方法）在絕對值上比 HPJ-FE 小。因此，偏誤修正十分重要。

表一：Kahn et al. (2021: 6) 實證資料

Table 1
Long-run effects of climate change on per capita real GDP growth, 1960–2014.

	Specification 1						Specification 2					
	m = 20		m = 30		m = 40		m = 20		m = 30		m = 40	
	(a) FE	(b) HPJ-FE	(a) FE	(b) HPJ-FE	(a) FE	(b) HPJ-FE	(a) FE	(b) HPJ-FE	(a) FE	(b) HPJ-FE	(a) FE	(b) HPJ-FE
$\hat{\theta}_{\Delta T_t(m)^+}$	-0.373*** (0.141)	-0.566*** (0.209)	-0.583*** (0.195)	-0.894*** (0.291)	-0.701*** (0.248)	-1.072*** (0.373)	-0.378*** (0.141)	-0.572*** (0.208)	-0.586*** (0.196)	-0.908*** (0.290)	-0.709*** (0.249)	-1.105*** (0.372)
$\hat{\theta}_{\Delta T_t(m)^-}$	-0.441** (0.217)	-0.500** (0.249)	-0.699** (0.346)	-0.783** (0.380)	-0.834* (0.445)	-0.909* (0.485)	-0.451** (0.217)	-0.508** (0.249)	-0.712** (0.346)	-0.806** (0.380)	-0.851* (0.446)	-0.954** (0.485)
$\hat{\theta}_{\Delta P_t(m)^+}$	-0.044 (0.289)	-0.031 (0.357)	0.104 (0.485)	0.122 (0.556)	-0.058 (0.684)	-0.005 (0.766)	-	-	-	-	-	-
$\hat{\theta}_{\Delta P_t(m)^-}$	-0.072 (0.323)	-0.175 (0.431)	-0.132 (0.576)	-0.320 (0.660)	-0.382 (0.754)	-0.595 (0.857)	-	-	-	-	-	-
$\hat{\phi}$	0.671*** (0.049)	0.603*** (0.045)	0.671*** (0.049)	0.603*** (0.045)	0.671*** (0.049)	0.602*** (0.045)	0.672*** (0.049)	0.604*** (0.045)	0.671*** (0.049)	0.604*** (0.045)	0.671*** (0.049)	0.604*** (0.045)
N	174	174	174	174	174	174	174	174	174	174	174	174
max T	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
avg T	38.59	38.36	38.59	38.36	38.59	38.36	38.59	38.36	38.59	38.36	38.59	38.36
min T	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
N × T	6714	6674	6714	6674	6714	6674	6714	6674	6714	6674	6714	6674

Notes: Specification 1 (the baseline) is given by $\Delta y_{it} = a_i + \sum_{\ell=1}^p \varphi_{\ell} \Delta y_{i,t-\ell} + \sum_{\ell=0}^p \beta'_{\ell} \Delta \tilde{x}_{i,t-\ell} + \varepsilon_{it}$, where y_{it} is the log of real GDP per capita of country i in year t , $\tilde{x}_{it}(m) = [\tilde{T}_{it}(m)^+, \tilde{T}_{it}(m)^-, \tilde{P}_{it}(m)^+, \tilde{P}_{it}(m)^-]'$, and $\tilde{P}_{it}(m) = (\frac{2}{m+1}) [P_{it} - P_{i,t-1}^*]$ are measures of temperature and precipitation relative to their historical norms per annum, T_{it} and P_{it} are the population-weighted average temperature and of precipitation country i in year t , and $T_{i,t-1}^*(m) = \frac{1}{m} \sum_{\ell=1}^m T_{i,t-\ell}$ and $P_{i,t-1}^*(m) = \frac{1}{m} \sum_{\ell=1}^m P_{i,t-\ell}$ are time-varying historical norms of temperature and precipitation over the preceding m years. $z^+ = zI(z \geq 0)$, and $z^- = -zI(z < 0)$. The long-run effects, θ_i , are calculated from the OLS estimates of the short-run coefficients in Eq. (1): $\theta = \phi^{-1} \sum_{\ell=0}^p \beta_{\ell}$, where $\phi = 1 - \sum_{\ell=1}^p \varphi_{\ell}$. Specification 2 drops the precipitation variables from the baseline model: $\tilde{x}_{it}(m) = [\tilde{T}_{it}(m)^+, \tilde{T}_{it}(m)^-]'$. Columns labelled (a) report the FE estimates and columns labelled (b) report the half-panel Jackknife FE (HPJ-FE) estimates, which corrects the bias in columns (a). The standard errors are estimated by the estimator proposed in Proposition 4 of Chudik et al. (2018). Asterisks indicate statistical significance at the 1% (***) , 5% (**), and 10% (*) levels.

由於基準估計結果顯示，降水變數相對歷史常態的偏離（無論高於或低於）在 $m=30$ 的情況下均不具統計顯著性，因此我們重新估計方程式，去掉降水變數，在模型設定 2 中設定 $\tilde{x}_{i,t-1}(m) = [\tilde{T}_{i,t-1}(m)^+, \tilde{T}_{i,t-1}(m)^-]$ 。結果顯示，氣溫持續偏離其歷史常態，對長期經濟成長具有負面影響。

具體而言，HPJ-FE 的估計結果顯示，若氣溫持續每年高於其歷史常態 0.01°C ，將使人均實質 GDP 成長率在長期下降 0.0586 個百分點（計算方式為 $-0.908 \times 2/(30 + 1)$ ）；若氣溫每年低於其歷史常態 0.01°C ，將使人均實質 GDP 成長率每年下降 0.0520 個百分點（計算方式為 $-0.806 \times 2/(30 + 1)$ ）。

參考文獻

- Burke, M., Hsiang, S.M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527, 235-239.
- Cashin, P., Mohaddes, K., & Raissi, M. (2017). Fair weather or foul? The macroeconomic effects of El Niño. *Journal of International Economics*, 106, 37-54.
- CIESIN. (2016). Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density. Columbia University, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, NY.
- Chudik, A., Mohaddes, K., Pesaran, M.H., & Raissi, M. (2016). Long-run effects in large heterogeneous panel data models with cross-sectionally correlated errors. In: Hill, R.C., Gonzalez-Rivera, G., Lee, T.-H. (Eds.), *Advances in Econometrics (Volume 36): Essays in Honor of Aman Ullah*. Emerald Publishing, pp. 85-135 (Chapter 4).
- Chudik, A., Pesaran, M.H., & Yang, J.-C. (2018). Half-panel jackknife fixed effects estimation of panels with weakly exogenous regressors. *Journal of Applied Econometrics*, 33(6), 816-836.
- Dell, M., Jones, B.F., & Olken, B.A. (2009). Temperature and income: Reconciling new cross-sectional and panel estimates. *The American Economic Review*, 99(2), 198-204.
- Dell, M., Jones, B.F., & Olken, B.A. (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66-95.
- Dell, M., Jones, B.F., & Olken, B.A. (2014). What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798.
- Desbordes, R., & Eberhardt, M. (2024). Climate change and economic prosperity: Evidence from a flexible damage function. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102974.
- Gallup, J.L., Sachs, J.D., & Mellinger, A.D. (1999). Geography and economic development. *International Regional Science Review*, 22(2), 179-232.
- Henseler, M., & Schumacher, I. (2019). The impact of weather on economic growth and its production factors. *Climatic Change*, 154(3), 417-433.
- Hsiang, S.M. (2016). Climate econometrics. *Annual Review of Resource Economics*, 8(1), 43-75.
- IMF. (2017). The effects of weather shocks on economic activity: How can low-income countries cope? In *World Economic Outlook*, pp. 117-183(Chapter 3).
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Volume 1. Cambridge University Press, Cambridge.

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, B.F., & Olken, B.A. (2010). Climate shocks and exports. *American Economic Review*, 100(2), 454-459.
- Kahn, M. E., Mohaddes, K., Ng, R.N.C., Pesaran, M.H., Raissi, M., & Yang, J.-C. (2021). Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics*, 104, 105624.
- Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020). The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 103, 102360.
- Kotz, M., Levermann, A., & Wenz, L. (2024). The economic commitment of climate change. *Nature*, 628, 551-557
- Letta, M., & Tol, R.S.J. (2019). Weather, climate and total factor productivity. *Environmental and Resource Economics*, 73, 283-305.
- Matsuura, K., & Willmott, C.J. (2015). Terrestrial air temperature and precipitation: Monthly and annual time series(1900-2014), v 4.01.
- Mejia, S.A., Mrkaic, M., Novta, N., Pugacheva, E., & Topalova, P. (2018). The Effects of Weather Shocks on Economic Activity: What are the Channels of Impact? International Monetary Fund, IMF Working Paper WP/18/144.
- Mendelsohn, R. (2016). Measuring weather impacts using panel data.
- Mohaddes, K., Ng, R.N.C., Pesaran, M.H., Raissi, M., & Yang, J.-C. (2023). Climate Change and Economic Activity: Evidence from U.S. States. *Oxford Open Economics*, 2, 1-11.
- Nickell, S. (1981). Biases in dynamic models with fixed effects. *Econometrica*, 49(6), 1417-1426.
- Nordhaus, W.D. (1992). The “DICE” Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. Technical Report 1009, Cowles Foundation Discussion Paper No. 1009.
- Nordhaus, W.D. (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 103(10), 3510-3517.
- Pesaran, M.H. (1997). The role of economic theory in modelling the long run. *The Economic Journal*, 107, 178-191.
- Pesaran, M.H., & Shin, Y. (1999). An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis. In: Strom, S. (Ed.), *Econometrics and Economic Theory in 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 371-413(Chapter 11).
- Pesaran, M.H., & Smith, R. (1995). Estimating long-run relationships from dynamic heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 68(1), 79-113.
- Sachs, J.D., & Warner, A.M. (1997). Sources of slow growth in African economies. *Journal of African Economies*, 6(3), 335-376.
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tol, R.S.J. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 29-51.
- Tol, R.S.J. (2018). The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4-25.
- Tol, R.S.J. (2021). The Economic Impact of Weather and Climate, CESifo Working Paper No. 8946.