

碳排放及其不均等研究：一个文献综述

万广华 成睿阳 张勋*

摘要：碳排放导致的气候变化是全人类面临的最大挑战。尽管碳排放本身已得到广泛研究，但聚焦不同国家、地区或家庭个体之间的碳不均等的成果相对较少。本文在系统梳理碳排放的测算和分解、驱动因素、后果及减排政策的基础上，重点关注碳不均等问题，对比不均等指标及分解方法的优劣，讨论其构成及驱动因素，最后探讨减排政策应注重的不均等问题。

关键词：碳排放；碳不均等；气候变化

DOI：10.13821/j.cnki.ceq.2026.01.01

一、引言

由碳排放引起的气候变化是人类共同面临的最为重大和最为迫切的挑战。1990 年至今全球累积碳排放超过一万亿吨，接近人类历史排放总和的一半，仅 2024 年就排放了 416 亿吨 (Friedlingstein et al., 2024)。按目前的排放速度推算，1.5 °C 的升温预算将在 6 年内耗尽，2 °C 的预算将在 18 年内耗尽 (Chancel et al., 2022)。如不能采取强力减排措施，到 2100 年全球温度预期将上升 4 °C (Nordhaus, 2019)，导致更频繁更严重的灾难与后果 (IPCC, 2023)。因此，减排已成为国际共识。

制定实施减排策略的重大挑战之一是碳排放不均等 (以下简称碳不均等)。2022 年北美的人均碳排放约为 20.8 吨，而撒哈拉以南国家仅有 1.6 吨 (Chancel et al., 2022)。此外，发达国家的历史累积排放早已远超基于人口分配的公平份额，而目前的主要排放者如中国与印度仍属于碳债权国 (Matthews, 2016)。恰恰是碳不均等引起了关于减排义务的巨大争议，最终确立了“共同但有区别的责任 (common but differentiated responsibilities)”的原则 (以下简称 CBDR)^①。不难推断，CBDR 不只适用于国家之间的谈判，也适用于地区家庭或个体层面减排义务的确定，因为不同群体之间同样存在碳不均等：世界上最穷 50% 人口的碳排放占比不到 12%，而顶层 10% 的占比接近 50%；在中国，底层 50%

* 万广华，南开大学跨国公司研究中心；成睿阳，复旦大学经济学院；张勋，北京师范大学统计学院。通信作者及地址：张勋，北京市海淀区新街口外大街 19 号，100875；电话：15201468521；E-mail：zhangxun@bnu.edu.cn。本研究得到国家自然科学基金专项项目 (72442019)、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (23JJD790001)、国家社会科学基金重点项目 (23AZD028) 和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。感谢匿名审稿人的宝贵建议。

① CBDR 原则最早在 1992 年《里约环境与发展宣言》原则 7 中提出，并于同年作为基本原则写入《联合国气候变化框架公约》，强调发达国家应率先采取减排行动，并向发展中国家提供资金、技术等支持；1997 年《京都议定书》通过“附件国—非附件国”的制度安排进一步强化了差异化义务；2015 年《巴黎协定》在强调各方普遍参与的同时，要求在实施中结合不同国家的国情，以体现更为动态的差异化安排。

群体的人均年排放为3吨,而顶层10%则高达36.4吨(Chancel et al., 2022)。富人更有义务也更有能力进行减排。

然而,现有文献大多关注碳排放水平(类似于收入水平),关于碳不均等(类似于收入分配)的研究才刚刚起步,且基本上局限于碳不均等的度量和定性讨论,缺乏对驱动因素和经济社会后果的实证分析。特别地,前人大多沿用收入分配指标及其分解框架。但是,收入代表福利,而碳排放代表环境负担,两者的不均等在性质上和政策涵义上存在显著差异。前人不但忽略了这一差异,而且在分解碳不均等时出现了一定的理论与方法偏误。

基于上述背景,本文力图作出两方面的贡献。第一,在简要总结与碳排放水平相关的文献的基础上,聚焦碳不均等的测算、分解及主要驱动因素。同时,明确指出“碳不均等后果”这一文献空白,并在最后提出研究建议。第二,对比碳不均等指标和分解方法的优劣,并突出其潜在的问题。

二、碳排放水平研究

碳排放研究的起点是碳排放的测算,然后才可能探讨其影响因素及后果,以及减排策略及其效果评估。

(一) 碳排放水平的测算与分解

1. 碳排放水平测算

尽管可以基于辐射光谱从地面监测站(Zhao and Tans, 2006)或卫星(Eldering et al., 2017)直接测算碳排放,但误差较大,主要是因为大气中二氧化碳浓度过低且容易受到各种环境因素的干扰。

间接测算碳排放可采用基于生产端的核算或基于消费端的核算。前者更为流行,但忽略了贸易导致的碳泄漏问题。Peters et al.(2011)发现,发达国家通过国际贸易向发展中国家转移的净碳排放从1990年的4亿吨增加到了2008年的16亿吨。间接测算碳排放存在两种方法:排放因子法和投入产出法。

(1) 排放因子法。该方法可以简单地表示为:

$$C = AD \cdot EF, \quad (1)$$

其中, C 代表碳排放水平, AD 代表活动数据, EF 代表排放因子。比如,燃料消费量为活动数据,而每单位燃料所排放的二氧化碳为排放因子,后者由联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提供并定期更新。使用该方法可以估算国家(Liu et al., 2015)、地区(Shan et al., 2016)、部门(Xu et al., 2024)或家庭(Liu et al., 2013)的碳排放,该方法的优点在于计算简便,但往往忽略了不同群体排放因子的差异性。

(2) 投入产出法。基于Muller(1979)提出的多区域环境投入产出框架(详见Burq and Chancel(2021)),该方法的优点是可在同一框架下比较基于生产端和消费端核算的

碳排放,也可以分离不同部门如家庭和政府消费所导致的碳排放,但所需要的投入产出数据更新较慢。使用这一方法的研究发现,2004年国际贸易隐含的碳排放达到了62亿吨或全球总排放的23%(Davis and Caldeira, 2010),发达国家消费的排放比基于生产端核算的高出10%—30%,而包括中国在内的发展中国家则正相反(Fan et al., 2016)。类似的排放转移不仅存在于国际贸易,在国内的区域贸易中也同样显著。在中国相对发达的沿海省份所消费的商品中,高达80%的排放是从欠发达的中西部进口的(Feng et al., 2013)。

2. 碳排放水平分解

对碳排放水平进行分解可以使用IPAT类方法、指数分解法或结构分解法。

(1) IPAT类方法。该方法由Ehrlich and Holdren(1971)提出,主要用于分析人口增长对环境的影响,其计算公式为:

$$I = P \times A \times T, \quad (2)$$

其中, I 代表环境影响(impact), P 代表总人口(population), A 代表富裕程度(affluence), T 代表技术水平(technology)。Kaya因子法可视为其一种特殊形式:

$$CO_2 = P \times \left(\frac{GDP}{P}\right) \times \left(\frac{E}{GDP}\right) \times \left(\frac{CO_2}{E}\right), \quad (3)$$

等式右侧各项分别代表总人口、人均GDP、单位GDP能耗(即能源强度)和单位能耗二氧化碳排放(即排放因子)。IPAT方法的优点在于直观,但由于采取相乘的形式,各驱动因素对排放的影响并非相互独立。特别重要的是,作为等式,它们不能用于识别因果关系,也无法进行假设检验。为此,Dietz and Rosa(1994)引入随机性,拓展出了STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology)方法:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i, \quad (4)$$

其中, a, b, c, d 为待估参数, e_i 为误差项,下标 i 代表不同的观测对象。实证研究中一般对式(4)求对数,然后进行模型估算和假设检验。STIRPAT的优点在于可以添加控制变量,如城市化率等(York et al., 2003),待估系数代表相关驱动因素的环境影响弹性。

(2) 指数分解法(Index Decomposition Analysis, IDA)。该方法包括加法和乘法两种形式,可以将碳排放的变化分解为整体活动效应、活动结构效应和排放强度效应。这些效应的估算可以采用如对数平均迪式指数法(LMDI, log mean Divisia index method)(Ang and Choi, 1997)、Shapley值分解法(Sun, 1998)、修正费舍理想指数法(Ang et al., 2002)等,其中LMDI最为流行,详见Ang(2015)。

(3) 结构分解法(Structural Decomposition Analysis, SDA)。这是一种基于投入产出分析的方法,可以将碳排放的变化分解为排放强度效应、列昂惕夫效应和最终需求效应,详见Miller and Blair(2009)。进一步地,由中间需求变化引起的列昂惕夫效应可以分解为进口技术份额效应和总技术水平效应,进而得到不同部门技术变化的影响(Su and Ang, 2012)。最终需求效应可以分解到最终需求水平、最终需求结构(如家庭、政府消费和出口占比)以及特定产品组合(如计算机服务在家庭消费中的占比)的影响(Miller and Blair, 2009)。

IDA 和 SDA 的区别主要有两点:①样本使用。IDA 可以基于时间序列进行链式分解,所需数据易得,而 SDA 所要求的投入产出数据每 5—10 年才更新一次。②效应识别。两种方法都可识别排放强度效应,SDA 可识别列昂惕夫效应和最终需求效应,而 IDA 可以识别整体活动效应和结构变化效应。

(二) 碳排放水平的影响因素

影响碳排放的主要因素包括:

第一,收入是影响碳排放的重要因素(Fan et al., 2006; Wang and Liu, 2017)。但排放与收入的关系可能是非线性的,比如污染与经济发展之间的关系为倒 U 形(Grossman and Krueger, 1991);非经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)国家人均 GDP 的碳排放弹性为 1,而 OECD 国家则小于 1(Liddle, 2015)。此外,与收入高度相关的工业化程度和经济结构同样影响碳排放。工业化的排放效应在中低收入国家随收入的上升而逐渐增强,但在高收入国家则逐渐减弱(Dong et al., 2019)。中国产业结构的调整使 2013—2016 年的碳排放下降了 10%(Guan et al., 2018)。

第二,能源结构。早期人们普遍使用化石燃料,造成了大量的碳排放(约占 1850 年至今人为总排放的 69%)。即便是今天,化石燃料仍占能源需求的 80%(Alšauskas, 2024)。Le Quéré et al.(2019)分析了 OECD 国家在 2005—2015 年间的脱碳过程,结果表明可再生能源对化石燃料的替代是减排的最主要驱动因素(约占 36%—73%)。值得提及的是,2024 年清洁能源投资增长的 85%来自发达经济体和中国,而占据全球人口三分之二的其他新兴市场和发展中经济体却仅占 15%(Alšauskas, 2024)。考虑到未来发展中经济体持续增加的能源需求,这种错配会显著延缓全球脱碳速度。

第三,技术创新。它是实现减排和可持续发展的关键(Jaffe et al., 2000),尤其是对富裕国家或群体而言(Álvarez-Herránz et al., 2017)。特别地,绿色创新能够促进清洁能源发展,大幅降低碳排放(Paramati et al., 2021)。Shuai et al.(2017)发现,越是富裕的国家,收入对排放的影响越小而技术的影响越大,在最富裕的国家技术的影响甚至超过了收入。

第四,人口因素,主要聚焦于总人口数(城市规模效应)与人口密度(密度规模效应)。在城市规模效应假说中,总排放是总人口数的幂律函数($C \sim P^\beta$) (Bettencourt et al., 2007),而在密度规模效应假说中,人均碳排放是人口密度的幂律函数($\frac{C}{P} \sim \left(\frac{P}{A}\right)^\alpha$, A 为城市面积)(Gudipudi et al., 2016),实证研究得出了不一致的结论。以美国为例, Oliveira et al.(2014)的估计($\beta = 1.46$)表明总人口数对排放的影响为规模报酬递增,但 Muller and Jha(2017)的结果显示规模报酬递减($\beta \approx 0.75$)。Gudipudi et al.(2016)展示密度规模效应的不确定性($\alpha \in [-1.13, -0.78]$),而 Ribeiro et al.(2019)关注总人口数与密度(城市面积)之间的相关性及其交互作用。后者使用柯布-道格拉斯函数 $C \sim P^{\beta_P} A^{\beta_A}$, 得到 $\beta_P = 0.31$ 、 $\beta_A = 0.45$:在人口密度不变的情况下,人口规模每增加 1%,总排放增加 0.76%;而在人口总数不变的情况下,人口密度每增加 1%,总排放下降 0.45%。

第五,贸易。国际贸易使生产与消费脱钩,可通过两个渠道影响碳排放。一是国际

分工降低了生产成本,使得总产出上升,从而增加碳排放。比如 Tian et al.(2022)发现,《区域全面经济伙伴关系协定》(Regional Comprehensive Economic Partnership, RCEP)取消关税将大大降低区域内贸易和生产成本,促进增长,使全球碳排放增加约 3.1%。二是所谓的污染避风港效应:跨国公司可将排放密集型产业转移到环境法律和监管较为宽松的国家或地区,后者的技术水平较低,排放强度较高。比如美国 2004 年进口排放强度为 0.77 kg CO₂/ \$^①,出口仅为 0.49 kg CO₂/ \$。中国正相反,进出口排放强度分别为 0.49 kg CO₂/ \$ 和 2.18 kg CO₂/ \$ (Davis and Caldeira, 2010)。但随着发展中国家与发达国家之间排放强度差距的缩小,南北贸易的碳泄漏问题有所缓解(Meng et al., 2023)。

第六,政府治理能力。Garmann(2014)针对 OECD 国家的研究表明,联合政府的排放强度增长率高于单一政党政府,右翼政府的排放强度增长率高于中左翼政府。Benlemlih et al.(2022)发现,政治稳定性和腐败控制每提高 1% 将使碳排放下降 0.05% 和 0.29%。根据 Povitkina(2018)的分析,只有在腐败程度较低的情况下,民主政体的减排表现才优于专制政体。在中国,当经济政策不确定性增加时,为规避政策风险,企业倾向于使用廉价的化石燃料以更快地收回投资,从而导致排放增加(Yu et al., 2021)。

(三) 碳排放的后果或成本

碳排放最直接的后果是气候变化。在 18 世纪中叶之前的一百万年间,大气二氧化碳浓度从未超过 300 ppm,而 2025 年 5 月这一数值已经达到 431 ppm。2023 年全球年均温度已经比工业化前(1850—1900 年)高出了 1.45 °C,成为有记录以来最热的一年。^② 如果想把升温限制在 1.5 °C 之内,需要最低 8% 的年均减排速度(Liu et al., 2022)。但是,自《巴黎协定》签订以来,全球碳排放仍以年均 0.8% 的速度在增长(Chancel et al., 2023),导致 1.5 °C 的升温预算将在 6 年内耗尽,2 °C 的预算将在 18 年内耗尽(Chancel et al., 2022),到 2100 年全球温度预期将上升 4 °C(Nordhaus, 2019)。全球变暖将导致海平面上升(DeConto et al., 2021)、极端天气增加(Wang et al., 2017)和降水变化(Konapala et al., 2020)等一系列问题。即使能够实现碳中和,这些后果在未来至少一千年内都无法逆转(Solomon et al., 2009)。

1. 健康、水资源与粮食安全

温室效应将严重威胁人类健康和安全。Vicedo-Cabrera et al.(2021)发现,1991—2018 年间全球 37% 的热相关死亡可归因于人为气候变化。在全球变暖 1.5 °C、2 °C 和 3 °C 的情况下,热相关的死亡率将分别增加 0.5%、1.0% 和 2.5%(Chen et al., 2024)。与 1990—2000 年相比,2023 年 65 岁以上老年人因高温死亡的人数增加了 85%,大大高于气温不变的情况(38%)(Romanello et al., 2023)。在极端情况下,21 世纪末超过 6 亿人将受到洪水威胁,包括越南和孟加拉等在内的岛屿发展中国家甚至有可能被永久淹没(Kulp and Strauss, 2019)。

^① 此处“\$”指美元(USD)计价的贸易额。

^② 《2023 年中国气候公报》, <https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202402/W020240223586744867426.pdf>, 访问时间:2025 年 12 月 26 日。

水和粮食安全同样面临严重威胁。全球受极端干旱影响的土地面积已经从1951—1960年的18%增加到2013—2022年的47%。与1981—2010年相比,2021年高频率的热浪和干旱导致暴露在中度或重度粮食安全问题下的人口增加了1.27亿(Romanello et al., 2023)。到2050年,气候变化将使全球最大的482个城市中超过2.33亿或27%的人口面临缺水(Flörke et al., 2018)。同时,全球作物产量将减少10%以上,发展中国家营养不良率上升20%,饥饿人口增加1.6亿(Fujimori et al., 2019; Tai et al., 2014)。

2. 经济产出与社会稳定

气候变化会通过影响劳动供给等机制(Graff Zivin and Neidell, 2014),进而降低产出(Costinot et al., 2016)。比如,气候变化到2050年将导致全球收入减少19%(Kotz et al., 2024),到2100年将使中国户外工作者的劳动效率下降10%以上,极端情况下使农业附加值下降近10%,全国GDP损失2.51%(Liu et al., 2021)。

气候变化还会降低暴力事件的机会成本和政府治安能力,从而增加犯罪和暴力冲突(Heilmann et al., 2021; McGuirk and Nunn, 2024)。Hsiang et al.(2013)汇总了公元前一万年至今的人类冲突(包括个人层面的暴力事件及国家层面的政治不稳定和战争)数据,发现气温或极端降雨每增加1个标准差,个人间和群体间冲突的频率将分别上升4%和14%。

3. 碳社会成本

碳社会成本(social cost of carbon, SCC)是指额外排放一吨二氧化碳或其等价物所造成的总体经济损失,其估算主要依赖于以DICE(Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy)为代表的综合评估模型(Integrated Assessment Models, IAMs)。最新DICE-2023估计的SCC约为每吨66美元(Barrage and Nordhaus, 2024)。除DICE模型外,也可以使用RICE(Regional Integrated Model of Climate and the Economy)、PAGE(Policy Analysis of the Greenhouse Effect)、FUND(Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution)等。

需要注意的是,目前的IAMs的理论或实证基础薄弱,参数选择大多缺乏依据(Pindyck, 2013; Weitzman, 2014),故相关成果可靠性不足。Tol(2013)汇总了75项研究中的588个基于不同IAMs模型、政策假设和参数选择的估计结果,得到SCC平均值为每吨196美元,标准差高达322美元。鉴于此,Pindyck(2019)提出基于专家调查的方法,研究发现SCC至少在每吨80美元以上,大概率高于每吨200美元,而美国当时基于IAMs估算所使用的碳价为每吨40美元。

4. 碳排放所造成的后果的异质性

碳排放的后果具有全球性,但其影响在国家、地区和群体间的差异显著。在国家之间,气候变化对相对贫穷的国家造成了更为严重的影响。Carleton et al.(2022)的研究表明,气候变化将使全球死亡率提升84.8/10万,等价货币成本约为全球GDP的3.2%。其中,美国死亡率仅提升10.1/10万,该国GDP损失1%,欧洲死亡率甚至可能下降;在巴基斯坦和孟加拉等落后国家,死亡率将分别上升376/10万和245/10万,两国GDP损失达27.5%和18.5%。根据Dell et al.(2012)的估算,气温每升高1℃将导致穷国(人均GDP低于全球中位数)的农业产出降低2.66%,工业产出降低2.04%,经济增长率降低

1.39%，发生政治动荡的概率增加 2.7%，但对富国无显著影响。Differbaugh and Burke (2019) 构造反事实分析了无温度变化下的经济轨迹，发现过去半个世纪的全球变暖导致最富裕和最贫困十分位数国家之间的人均 GDP 之比升高了 25%。

在一国之内，穷人也将会遭受更大损失。在中低收入国家，底层 40% 人口因气候灾害造成的收入损失要比平均水平高出 70% (Hallegatte and Rozenberg, 2017)。以非洲为例，2013—2022 年间高温导致的损失相当于该地区 GDP 的 4.1%，其中的 81% 由收入最低、最脆弱和受保护最少的农业工人承担 (Romanello et al., 2023)。富裕国家同样不能幸免：在德国，低收入家庭比高收入家庭对高温更为敏感 (Osberghaus and Abeling, 2022)，家庭收入每增加 1 000 欧元，高温适应能力提高 1.2% (Kussel, 2018)；在美国，最低四分位数收入群体的心理健康受高温影响的程度是最高四分位数的 1.6 倍 (Obradovich et al., 2018)。Chancel et al. (2023) 总结了以往的成果，发现全球底层 50% 人口仅拥有 2% 的财富，贡献排放的 12%，却承受气候变化造成的收入损失的 75%，而顶层 10% 的人口拥有 76% 的财富，贡献排放的 48%，却仅承受收入损失的 3%。

(四) 减排策略及其效果评估

1. 国家政策

碳排放是一种典型的负公共品，其影响具有非排他性和非竞争性。排放者仅需承担较小的直接影响，却将显著的负外部性转嫁他人。目前的主要应对举措是征收碳税和建立碳交易市场，让市场来决定哪里能够以最低的成本减排。碳税是首先设定碳价格，由市场决定减排量，而碳交易是预先确定减排量，让市场决定碳价格。截至 2023 年 4 月，包括新加坡、南非、阿根廷等在内的 34 个国家已经或正在考虑征收碳税，而包括中国、韩国、阿尔巴尼亚等在内的 31 个国家已经或正在考虑进行碳交易。加拿大、墨西哥及多数欧盟国家则同时实施了这两种举措。遗憾的是，作为历史上总排放最高的经济体，美国至今仍未在国家层面出台碳定价政策。

目前各国的碳定价标准与减排目标之间存在很大差距。根据 World Bank (2023)，若想将升温控制在 2℃ 以下，碳价格在 2030 年需达到每吨 50—100 美元。然而，截至 2023 年 4 月，全球只有不到 5% 的排放符合这一标准。即使各国完成最新的国家自主贡献目标，预计到 21 世纪末全球仍将升温 2.4℃—2.6℃。Romanello et al. (2023) 甚至发现，由于化石燃料补贴的存在，87 个样本国家中的 68 个在 2020 年的净碳价为负。此外，单边碳定价政策还会导致国际贸易当中的碳泄漏问题，即无定价政策的国家会增加排放，抵消甚至超过单边碳定价政策带来的减排 (Baylis et al., 2013)。根据 Elliott et al. (2010) 的估计，如果《京都议定书》附件 B 中的国家对生产者征收每吨 29 美元的碳税，至少 20% 的减排将会被发展中国家增加的排放所抵消。

就碳定价政策的减排效果而言，早期研究大多认为碳税对排放的影响很小甚至不存在 (Bruvoll and Larsen, 2004; Lin and Li, 2011)，直到 Andersson (2019) “首次发现了碳税对排放的显著因果效应”：碳税使得瑞典 1990—2005 年间的排放下降了约 6.3%。根据 Metcalf and Stock (2023) 利用欧洲 31 个国家的数据的估算，每吨 40 美元碳税的累

积减排效果约为4%—6%。类似地,碳市场的效果同样尚无定论。比如欧盟碳排放交易体系(European Union Emissions Trading System, EU ETS)使法国制造业的排放减少了14%—16%(Colmer et al., 2024),但对控温目标所需的减排影响甚微(Jaraitè and Maria, 2016; Rafaty et al., 2020)。

Nordhaus(2019)指出,气候变化这一全球性问题与国家内部的环境问题存在本质区别。在国家内部,解决公共品外部性问题的核心在于使国家政治体制对分散的公共利益而非集中的私人利益做出反应;而对于全球公共品,由于不存在能够统一各国利益的“全球政府”,即使是最民主的国家也会出于自身利益而采取最少的行动。这表明单边政策是低效的,亟待形成全球范围内的国际协议。

2. 国际协议

从1997年的《京都议定书》到2021年的《格拉斯哥气候公约》,国际社会一直致力于推出具有法律效应、可监督可执行的国际条约。然而,现有条约均停留在自愿减排承诺层面,缺乏强制性和惩罚机制,导致减排行动迟缓,效果欠佳。比如,《京都议定书》本应覆盖全球排放的三分之二,但由于美国的退出和中国等发展中国家排放的增加,2012年的实际覆盖范围仅为全球排放的五分之一(Nordhaus, 2019)。2015年《巴黎协定》提出将升温限制在2℃以内,并要求所有成员国自主制定减排计划。但即便各国全面履行其承诺,也无法实现既定控温目标。

Nordhaus(2015)首次提出了“气候俱乐部”的概念,其核心在于设置一个“国际目标碳价格”,参与国可以自行通过国内政策实现这一目标。与之前的国际协议不同,它包含制裁措施,即对非参与者进入俱乐部的商品征收统一关税。根据Nordhaus(2015)的估计,当碳价低于每吨25美元时,只需要2%左右的关税就能实现全面参与;对于每吨50美元的碳价,5%的关税就能把参与率提高到90%以上;但过高的目标(每吨100美元)会使得大多数国家宁愿选择接受贸易惩罚也不愿意加入,从而导致俱乐部的低参与率和对非参与者的低实际惩罚。在考虑贸易损失的情况下,每吨50美元的碳价加5%的关税所带来的减排成果约等于每年3000亿美元的经济收益。Farrokhi and Lashkaripour(2021)比较了气候俱乐部和碳边境税,发现前者可以实现帕累托最优(前提是美国和欧盟作为核心成员加入),使全球排放减少61%,而碳边境税最多只能产生气候俱乐部1%的减排效果。

目前看来,气候俱乐部是最有可能付诸实施的方案^①。2023年12月,在迪拜举行的联合国气候变化大会上,由德国总理朔尔茨倡议的国际气候俱乐部正式启动,截至2025年年底已有48个成员(含欧盟)加入,合计占全球经济的一半以上。

三、碳不均等研究

与贫富差距相似,碳排放在不同国家、地区和人群之间也存在着严重的不均等。但是,由努力带来的收入差距是合情合理的,是激励机制的核心,必须得到保护。而作为人

^① 主要由富裕国家组成的气候俱乐部对低收入国家征收普遍关税可能被认为是不公平的(Clausing and Wolfram, 2023),现有制度也没有明确如何保障公平责任分担(Falkner et al., 2022),故对发展中国家缺乏吸引力。

权的一部分,每个个体应该享有同等的排放权。可以说,碳不均等就是不公平,高排放者必须赔偿低排放者,以缓解甚至消除碳不均等。本部分将首先介绍碳不均等的度量与分解,然后综述其影响因素,最后讨论减排策略中应考虑碳不均等问题。

(一) 碳不均等的度量与分解

1. 不均等度量

(1) 分组比较。对不同地区或人群进行分组比较是度量碳不均等最直接的方式。根据《世界不平等报告(2022)》(Chancel et al., 2022),2019 年世界人均碳排放约为 6.6 吨,最低的撒哈拉以南地区仅有 1.6 吨,东亚和欧洲在 9 吨左右,而最高的北美高达 20.8 吨。虽然中国是总排放最大的国家,2019 年约占全球排放的 24%,但自 1850 年以来的累积排放仅占全球的 11%,远低于欧洲的 22%和美国的 26%。以收入分组来看,2015 年全球最富裕 10%阶层的人均碳排放约为 23.5 吨,排放占比为 49%,而最穷 50%人群的人均碳排放仅为 0.69 吨,占比 7%(Kartha et al., 2020),顶层 1%人群的人均排放达到底层 50%的近百倍,占比高达 16.8%(Chancel et al., 2022)。Oswald et al.(2018)的研究也表明,世界底层 50%人群的能源足迹仅为顶层 10%的二十分之一。

国家内部的碳不均等问题同样显著。以中国为例,底层 50%人群的人均排放为 3 吨(与 2050 年 2℃升温预算相符),中层 40%人群为 7.2 吨(与《巴黎协定》中 2030 年的国家减排承诺相符),而顶层 10%人群竟高达 36.4 吨,是底层 50%人群的 10 倍以上(Chancel et al., 2022)。显然,在国家内部同样应当实行 CBDR 原则,富人应当承担更多的减排责任。

(2) 不均等指数。基尼系数是分析收入或财富不均等的最常用工具,也常被用于度量碳不均等,其计算公式如下:

$$G = \frac{1}{2\bar{c}} \sum_i \sum_j p_i p_j |c_i - c_j|, \quad (5)$$

其中, p_i 和 p_j 为人口权重, c_i 和 c_j 为碳排放水平, \bar{c} 为样本均值。另一个常用不均等指标为广义熵指数:

$$GE(\theta) = \frac{1}{\theta(\theta-1)} \sum_i p_i \left[\left(\frac{c_i}{\bar{c}} \right)^\theta - 1 \right], \quad (6)$$

其中, θ 表示对不均等的敏感性, $\theta=0,1,2$ 分别对应泰尔 L 指数、泰尔 T 指数和变异系数。令 $\epsilon = 1 - \theta$ 可以转化得到阿特金森指数:

$$A(\epsilon) = \begin{cases} 1 - [\epsilon(\epsilon-1)GE(\theta=1-\epsilon) + 1]^{(\frac{1}{1-\epsilon})} = 1 - \left[\sum_i p_i \left(\frac{c_i}{\bar{c}} \right)^{1-\epsilon} \right]^{\frac{1}{1-\epsilon}}, & \epsilon \neq 1 \\ 1 - \exp(-GE(\theta=0)) = 1 - \prod_i \left(\frac{c_i}{\bar{c}} \right)^{p_i}, & \epsilon = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

其中, $\epsilon > 0$, 取值越大代表对不均等的厌恶程度越高。此外,还有部分研究使用对数方差衡量不均等:

$$LV = \sum_i p_i \left[\ln \left(\frac{c_i}{c^*} \right) \right]^2, \quad (8)$$

其中, c^* 为样本几何均值。

不均等指数可以看作距离函数,衡量整体分布相对于完全均等状态的偏离程度。它们对分布的不同位置赋予不同权重,导致对不同位置的敏感性差异。举例而言,假设两个人的碳排放为 c_i 和 c_j ($c_i > c_j$),将很小的 Δc 从 c_i 转移给 c_j 显然会减少不均等。用 ΔI 代表不均等的下降程度,如果 ΔI 随着 c_i 和 c_j 的增大而增加(减少),则表明相关不均等指数对分布顶端(底端)的变化更敏感。基尼系数对分布中心赋予较大权重,故对均值附近的变化最敏感。对于广义熵指数而言, $\theta=2$ 时为中性指数,当 $\theta < (>)2$ 时,则赋予底(顶)端的权重更高。在比较不同年份或地区的不均等时,如果洛伦兹曲线相交,不同的不均等指数可能导致不同甚至截然相反的结论。比如,基于 1971—2006 年间跨国碳排放数据, Duro (2012) 计算了基尼系数、泰尔 T 指数、泰尔 L 指数、阿特金森指数 ($A(0.5)$ 代表低不均等厌恶和 $A(2)$ 代表高不均等厌恶)及变异系数,结果显示 $A(2)$ 的变化最稳定,仅下降了 6.4%,而变化最大的泰尔 T 指数下降了约 40%。在 2001—2006 年间,洛伦兹曲线三次相交,导致 $A(2)$ 上升了 0.4%,而其他指数均下降了 6% 以上。这些结果表明,为保证结论的稳健性,研究中应尽可能同时估算多种不均等指数。

泰尔 L 指数因其对底层分布的敏感性而在收入分配分析中被广泛应用,也常常被用于度量碳不均等,却忽视了二者研究目标的差异:前者往往聚焦于提升贫困人群收入,而后者侧重激发高排放群体减排,因为低排放群体不但缺乏减排潜力,能力偏弱,而且其承担的减排义务也相对较小。Wang and Zhou (2018) 使用泰尔 L 分解了 1995—2009 年间的碳不均等,发现国家间不均等的降低主要源于低排放新兴经济体(以中国和印度为代表)的人均排放向全球平均水平的靠拢。这一变化的福利效应值得商榷。鉴于此,碳不均等的测算应当采用中性(比如基尼系数和变异系数)或对分布顶端更为敏感的指数(比如 $\theta > 2$ 的广义熵指数)。在具体应用上,广义熵指数的易分解性使其特别适用于国际谈判中的责任分摊和国内碳配额的分配,而基尼系数的易解释性和流行性则适合于公众传播与国内政策(如碳税或转移支付机制)评估。

现有文献主要使用基尼系数和泰尔 T 指数,也有研究使用泰尔 L 指数和对数方差 (Duro et al., 2017)。Chancel (2022) 测算了 1990—2019 年间全球碳不均等的基尼系数和泰尔 T 指数,两者均呈先升后降的倒 U 形趋势,在 2000 年达到峰值(0.648 和 0.93)后逐步下降到 2019 年的 0.609 和 0.909。Mi et al. (2020) 发现,中国的省际碳基尼系数从 2007 年的 0.44 下降到了 2012 年的 0.37(同期收入基尼系数为 0.48)。大部分省份内部的基尼系数均有所下降,而东部沿海家庭间的碳基尼系数远低于西部落后省份。Wiedenhofer et al. (2017) 的研究表明,中国家庭的碳基尼系数与家庭支出基尼系数接近(约为 0.4)。

综上所述,分组比较法只关注特定分位点,忽略了整体分布,不够全面。相比之下,指数法的优点在于考虑了整体分布状况,且可以用于对不均等构成成分进行分解(参见表 1)。

表 1 不均等指数对比

指标名称	敏感区域	易分解性	易解释性	适用情境	局限性
基尼系数	均值	弱	强	国内政策传播、舆论沟通	数学性质较弱, 难用于政策模拟
变异系数	中性	强	强	初步描述, 数据比较	对低平均值变量不稳定
泰尔 T/L 指数	底端	强	弱	国家间比较、分解分析	对顶端分布敏感性较弱
广义熵指数 ($\theta > 2$)	顶端	强	弱	国际责任分摊、区域配额设计	依赖参数 θ , 对极端值较敏感
阿特金森指数	底端	弱	弱	强调公平偏好政策设定	依赖参数 ϵ , 主观性较强

2. 不均等的分解

当碳排放可以表示为不同来源相加的形式时, 可以使用基尼系数将不均等分解为不同来源的贡献。

Wu and Chen(2023)使用这一方法, 发现在 2005—2020 年间工业部门的排放是中国碳不均等的主要来源, 占比超过 85%, 其边际效应也最为显著。以 2020 年为例, 工业排放每增加 1%, 基尼系数(0.385)将增加 0.159%。

当碳排放可以表示为不同子群体(如发达国家和发展中国家)的贡献时, 可以使用广义熵指数将整体不均等表示为子群体内部不均等和子群体之间不均等的和(Cowell, 2011)。现有文献大多使用泰尔 T 分解和泰尔 L 分解, 尽管前文建议采用中性或对分布顶端更敏感的指数。

此外, 也有学者将碳排放水平的分解方法扩展到了碳不均等的研究当中, 以分析不同影响因素的贡献。比如, 参考式(3)中的 Kaya 因子法:

$$\begin{aligned} c &= \left(\frac{GDP}{P}\right) \times \left(\frac{E}{GDP}\right) \times \left(\frac{CO_2}{E}\right) \\ &= A \times C \times T^* . \end{aligned} \quad (9)$$

Duro and Padilla(2006)将人均碳排放 c 的泰尔 L 指数分解为:

$$\begin{aligned} T^0 &= \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{c}}{c_i}\right) \\ &= \sum_i p_i \ln\left(\frac{\overline{ACT^*}}{A_i C_i T_i^*}\right) = \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{A} \bar{C} \bar{T}^*}{A_i C_i T_i^*}\right) + \ln\left(\frac{\overline{ACT^*}}{\bar{A} \bar{C} \bar{T}^*}\right) \\ &= \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{A}}{A_i}\right) + \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{C}}{C_i}\right) + \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{T}^*}{T_i^*}\right) + \ln\left(\frac{\overline{ACT^*}}{\bar{A} \bar{C} \bar{T}^*}\right) \\ &= T_A^0 + T_C^0 + T_{T^*}^0 + \ln\left(\frac{\overline{ACT^*}}{\bar{A} \bar{C} \bar{T}^*}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, A 代表人均 GDP, C 代表单位 GDP 能耗, T^* 代表单位能耗碳排放。式(10)将人均碳排放的泰尔 L 指数分解为收入、能源强度和排放因子的泰尔 L 指数之和, 但存在残差项 $\ln\left(\frac{\overline{ACT^*}}{\bar{A} \bar{C} \bar{T}^*}\right)$ 。

Teixidó-Figueras et al.(2016)使用 STIRPAT 模型分解了人均碳排放的对数方差。基于回归方程:

$$\ln c_i = \beta_0 + \sum_k^K \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i, \quad (11)$$

其中, X_k 为式(4) STIRPAT 模型中的 K 个驱动因素, ε_i 为误差项。令 $X_k^* = \beta_k X_k$, 对式(11)两侧求方差, 有:

$$\text{var}(\ln c) = \sum_k^K \text{cov}(X_k^*, \ln c) + \sigma_\varepsilon^2. \quad (12)$$

Teixidó-Figuera et al.(2016)将因素 k 对不均等的贡献写为:

$$s_k(\ln c) = \frac{\text{cov}(X_k^*, \ln c)}{\text{var}(\ln c)}, \quad (13)$$

但这假设了不同因素在交互效应中的贡献相同。具体而言, 式(10)等价于

$$\text{var}(\ln c) = \sum_k^K \text{var}(X_k^*) + \sum_k^K \sum_{j \neq k} \text{cov}(X_k^*, X_j^*) + \sigma_\varepsilon^2, \quad (14)$$

其中, 交互效应 $\text{cov}(X_k^*, X_j^*)$ 受 X_k^* 和 X_j^* 的共同影响, 只有将其平均分摊给 X_k^* 和 X_j^* , 因素 k 对不均等的贡献才能表示为式(13)的形式, 但该做法缺乏理论和实证依据。

最后, Wang and Zhou(2018)基于乘法形式的 LMDI 模型分解了人均碳排放的泰尔 L 指数, 将国家 i 的人均碳排放表示为:

$$c_i = \sum_j \frac{A_i}{P_i} \frac{A_{ij}}{A_i} \frac{C_{ij}}{A_{ij}} = \sum_j a_i S_{ij} E_{ij}, \quad (15)$$

其中, a_i 代表人均整体活动水平(比如人均 GDP), S_{ij} 代表部门 j 活动水平占比, E_{ij} 代表部门 j 的排放强度, 可以得到:

$$\frac{\bar{c}}{c_i} = \frac{\sum_j \bar{a} \cdot \bar{S}_{\cdot j} \bar{E}_{\cdot j}}{\sum_j a_i S_{ij} E_{ij}} = D_{act}^i D_{str}^i D_{int}^i. \textcircled{1} \quad (16)$$

计算泰尔 L 指数, 有:

$$\begin{aligned} T^0 &= \sum_i p_i \ln\left(\frac{\bar{c}}{c_i}\right) \\ &= \sum_i p_i \ln D_{act}^i + \sum_i p_i \ln D_{str}^i + \sum_i p_i \ln D_{int}^i. \end{aligned} \quad (17)$$

由此将人均碳排放的泰尔 L 指数分解为整体活动效应、活动结构效应和排放强度效应。Wang and Zhou(2018)认为该分解中不存在残差, 但式(16)中的分子 \bar{c} 为碳排放平均值, 它不能直接表示为各因素平均值的乘积, 而应当为:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{c}}{c_i} &= \frac{\sum_j \overline{a \cdot S_{\cdot j} E_{\cdot j}}}{\sum_j a_i S_{ij} E_{ij}} = \frac{\sum_j \bar{a} \cdot \bar{S}_{\cdot j} \bar{E}_{\cdot j}}{\sum_j a_i S_{ij} \times E_{ij}} \times \frac{\sum_j \overline{a \cdot S_{\cdot j} E_{\cdot j}}}{\sum_j \bar{a} \cdot \bar{S}_{\cdot j} \bar{E}_{\cdot j}} \\ &= D_{act}^i D_{str}^i D_{int}^i \times \frac{\sum_j \overline{a \cdot S_{\cdot j} E_{\cdot j}}}{\sum_j \bar{a} \cdot \bar{S}_{\cdot j} \bar{E}_{\cdot j}}. \end{aligned} \quad (16^*)$$

再带入式(17), 有:

① 下标“ \cdot ”代表在国家维度 i 上取平均。

$$T^0 = \sum_i p_i \ln D_{act}^i + \sum_i p_i \ln D_{str}^i + \sum_i p_i \ln D_{int}^i + \ln \frac{\sum_j \overline{a \cdot S \cdot j E \cdot j}}{\sum_j \overline{a \cdot S \cdot j E \cdot j}}, \quad (17^*)$$

即存在一个与式(10)类似的残差项。

(二) 碳不均等的构成成分和驱动因素^①

1. 构成成分

(1) 不同组别。使用泰尔 L 分解,碳不均等可以分解为组间和组内贡献。在全球层面,早期研究大多发现不均等主要由组间差异即不同国家之间的碳排放差异构成,其贡献占比从 1971 年的 2/3 增加到了 1999 年的 4/5(Padilla and Serrano, 2006)。Cantore and Padilla(2010)使用 RICE 模型模拟了 1995—2105 年全球排放增长路径,结果表明组间贡献上升的趋势将至少持续到 2055 年。但根据 Chancel(2022)泰尔 T 分解的结果,组内贡献在 1990 年为 0.328(占比 38%),于 2007 年左右超过了国家间的贡献,在 2019 年上升到 0.579(占比 64%),同时组间贡献从 0.539 下降到了 0.33。而在国家内部,多数研究表明组内差异的贡献更大(Chen et al., 2016; Wiedenhofer et al., 2017)。以中国为例,Clarke-Sather et al.(2011)使用泰尔 T 分解发现,1997—2007 年间东中西地区之间的不均等的贡献一直远小于 50%。

(2) 不同部门。Grunewald et al.(2014)使用基尼系数分解法,发现 1971—2007 年间全球碳不均等的下降几乎完全来源于制造和建筑业排放占比及其不均等的下降,这在 OECD 国家中更为明显。在家庭层面,服务(0.5)和出行(0.6)的基尼系数更高,而食物和住房(0.3)则是 2007—2012 年间中国农村碳不均等上升的主要来源(Wiedenhofer et al., 2017)。Xu et al.(2016)使用基尼系数分解了各类消费对中国城市家庭碳不均等的贡献,结果表明住房(62%)、食物(13%)和教育文娱(16%)的贡献最大,其余 9%来自服装、生活用品、交通通讯和医疗服务的消费。

2. 驱动因素

(1) 收入。多数研究表明,收入是碳不均等的最重要的驱动因素。根据 Wiedmann et al.(2020)的测算,全球收入最高的 10%人群应对 25%—43%的碳排放负责,而收入最低的 10%人群的责任占比仅为 3%—5%。

在国家层面,Duro and Padilla(2006)将 Kaya 因子法拓展到了对不均等的分解,将国际碳排放泰尔 L 指数分解为收入、能源强度和排放因子的影响。结果表明,在 1971—1999 年间,收入不均等是影响碳不均等的最重要因素(占比超过 65%),收入不均等的降低也是碳不均等下降的主要驱动因素。Wang and Zhou(2018)也发现,2000—2009 年全球碳不均等的缩小主要源于消费不均等的缩小。

在家庭层面,2012 年占中国人口 5%的城市最富裕阶层的人均碳排放为 6.4 吨,占总

^① 需要指出的是,本小节聚焦前文所述的分解方法的文献。虽然有部分成果(如 Wei et al.(2024))直接将不均等指数作为因变量进行回归,但这一方法忽略了自变量在不同观察值之间的分布,从而导致有偏的估计结果(Wan et al., 2024),因此未被本文考虑。

排放的19%，而占人口58%的农村居民和城市贫困居民的人均碳排放仅为0.5—1.6吨，占总排放的30%(Wiedenhofer et al., 2017)。Golley and Meng(2012)发现家庭的边际排放倾向随收入递增，意味着富人向穷人的转移支付(收入分配改善)可以降低碳排放。但是，这一发现违背边际消费倾向递减的经济学原理，也与Wiedenhofer et al.(2017)的成果相悖，后者发现城市富裕人群的支出排放弹性为0.98(源于能源结构的优化)，小于农村贫困人群的1.11(由首次购买家用电器或更多的煤炭使用所导致)，这意味着转移支付会增加碳排放。事实上，Golley and Meng(2012)依赖于在回归模型中加入收入的三次项(一、三次项系数为正，二次项系数为负)，但只有不足0.1%的样本家庭的收入越过了第二个拐点。

(2) 技术。技术通过影响碳排放水平而影响碳不均等。1971—2008年，全球人均碳排放基尼系数从约0.6下降到略高于0.4，这主要源于石油、煤和泥炭等传统能源占比的下降(Grunewald et al., 2014)。基于1990—2017年间全球83个国家的数据，Wang and Feng(2022)使用LMDI分解法研究了收入和8个技术指标对碳不均等的影响，发现能源强度和生产技术是除收入外的最主要影响因素。根据Hou et al.(2024)使用Kaya因子法对泰尔L指数的分解，2003—2019年间能源强度已经逐渐取代收入成为中国碳不均等的主要影响因素，2019年其对东中西部地区和整体不均等的贡献均超过40%。同样使用Kaya因子法，Pouliasis et al.(2023)分解了美国州际人均碳排放的泰尔L指数，发现能源强度是最重要的驱动因素，平均贡献率接近99%。

(3) 人口因素。Teixidó-Figueras et al.(2016)基于STIRPAT回归模型分解了国家间碳排放的对数方差，结果表明在基于消费端的核算下，城镇化率(占比29.9%)和劳动人口比例(占比26.7%)是导致国际碳不均等的最重要因素，略大于收入的影响(占比26.3%)，剩余部分为气候(8.1%)和残差(9.4%)的贡献。Duro et al.(2017)使用同样的方法发现1993—2007年间人口始终是影响国际碳不均等的最主要因素(尽管其占比在样本期间持续下降)。以2007年为例，人口因素占比33.88%(其中城镇化率占比3.24%，劳动人口比例占比30.64%)，其余为经济结构(24.36%)、收入(21.44%)、气候(5.06%)和残差(15.26%)。

(三) 碳不均等与减排政策

作为个体消费或国家发展过程中所不可避免的副产物，碳排放本质上是一种追求效用的权利。与此同时，减少排放又是一项义务，关乎全球可持续发展和后代福祉。因为富裕国家和人群不但减排潜力大，减排能力强，而且他们享受了自身更高排放所带来的效用，对低收入(低排放)者造成了不成比例的伤害。因此，无论是国家间还是国家内部都应当贯彻CBDR原则，让高收入(高排放)者承担更多的减排责任。

全球减排协议应当要求富裕国家向贫穷国家提供绿色技术和转移支付(Keohane, 2019; Tavoni et al., 2011)。根据Landis and Bernauer(2012)的估计，在实行每吨35美元的全球统一碳价格时，发达国家应当向发展中经济体支付约150亿—480亿美元的资金。遗憾的是，在2010年《坎昆协议》中，发达国家承诺每年向发展中国家提供1000亿

美元的气候资金,但并未按时足额兑现。2024年《联合国气候变化框架公约》第二十九次缔约方大会(COP29)商定在2035年前将这一目标提升至3 000亿美金,但这仍被多数发展中国家认为远低于其资金需求与预期。

在国家内部,考虑到碳排放水平和气候变化后果在不同收入人群中的差异,减排政策应当是累进的。但现实中的碳税政策却实施统一税率,碳税所带来的经济负担有时甚至是累退的。比如在美国,最富裕家庭的人均碳排放是最贫困家庭的5.5倍,但碳税给最贫困家庭造成的负担(即占其收入的百分比)却比最富裕家庭高出约50%(Fremstad and Paul, 2019);在英国,碳税政策的实施给低收入家庭的收入和支出带来了持续的负面冲击,对中高收入家庭却无显著影响(Känzig, 2023)。这主要是因为碳定价等政策导致了能源价格上升,而贫困家庭对能源密集型生活用品的支出占比更大。减排政策的累退性带来了许多社会问题,比如法国于2018年上调碳税,却没有补偿中低收入家庭,引发了著名的“黄马甲”抗议浪潮,最终只能放弃征收碳税。

将碳定价政策产生的收入用于转移支付可以消除累退性的影响(Feindt et al., 2021; Fremstad and Paul, 2019)。根据World Bank(2023)的估算,这项收入在2022年已经达到近千亿美元。Carl and Fedor(2016)汇总40个国家层面和16个州或省层面的碳定价政策,估计得出2014年碳税为各国带来了合计217亿美元的收入,其中72%通过转移支付和基金返还给了公众;碳交易市场带来了65.7亿美元的收入,其中70%被用于可再生能源的研发等绿色支出。Mathur and Morris(2014)的研究表明,美国只需要向20%的贫困家庭转移碳税收入的11%,就可以避免其福利损失。事实上,加拿大不列颠哥伦比亚省自2011年起已经将碳税收入的6%—7%转移给符合条件的农村家庭(Beck et al., 2016)。澳大利亚、阿尔巴尼亚、瑞士等国家也都出台了类似的碳税收入循环政策(Klenert et al., 2018)。

此外,鉴于富人受碳价格上涨的影响相对较小,Chancel and Piketty(2015)建议实施累进碳税或将碳收入税转变为碳资产税。根据他们的测算,对全球千万富翁拥有的碳资产征收10%的税率,一年将产生至少1 000亿美元的收入,超过了发展中国家适应全球变暖的年度成本(2020年约为700亿美元)。

四、政策及未来研究建议

当前全球每秒钟排放的二氧化碳高达1 337吨(Romanello et al., 2023),气候变化正在影响全球所有国家和地区的家庭和个人。为避免灾难性后果,减排已经成为国际社会和众多国家的共识,但碳不均等严重阻碍减排政策的制定和实施,它构成当前和未来气候治理的核心难题和挑战。深入研究碳不均等对构建公平有效的全球气候战略至关重要。

学界对碳排放的测算、影响因素及后果等进行了大量探索,但对碳不均等的研究相对不足,所用方法存在局限性。本文在总结与碳排放相关文献的基础上,聚焦碳不均等,既梳理了碳不均等的测算及分解方法,也比较了各自的优缺点,还分析了不均等的构成

成分与驱动因素,最后讨论了减排政策对不均等问题的忽视,强调了坚持 CBDR 原则的重要性。^①

基于文献综述,本文在国际和国内两个层面提出政策建议。国际社会必须同心协力尽快达成具有约束力和惩罚条款的减排协议,包括遏制国际贸易中的碳泄漏问题。发达国家应停止向发展中国家转移高排放产业,并尽快落实其承诺,帮助发展中国家克服由资源限制和技术落后等客观因素导致的减排困难。必须强调的是,气候变化是全人类面临的共同挑战,并非发达与发展中国家之间或富人与穷人之间的零和博弈。除非尽快做出有效应对,每个人都将是输家。

就国内政策而言,在第七十五届联合国大会上,我国提出了在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标。考虑到国内不同维度的贫富差距,低碳转型过程中涉及的碳公平问题尤其值得学术界和政府的高度重视。一方面要在国内贯彻 CBDR 原则,另一方面要着手开展基于消费端的碳核算,逐步完成从“谁生产谁负责”到“谁消费谁负责”的政策转型。

未来研究应当注重以下几个问题:第一,完善在家庭个体层面测算碳排放的方法。由于数据可得性的原因,现有研究大多局限于地区及以上层面的核算,部分基于家庭消费数据的成果缺乏可靠性。特别地,要关注碳不均等的微观因果机制,量化不同因素对碳不均等的贡献,为缓解碳不均等的政策设计提供科学依据。

第二,后续研究应当探索碳不均等本身带来的影响。比如,国家之间的不均等是否以及如何影响全球减排协议的达成与执行?国家内部的碳不均等是否会像贫富差距一样动摇社会稳定,是否会改变家庭或个体的消费行为与生活方式?

第三,减贫和减排皆是重要的可持续发展目标,而碳排放与收入、碳不均等与收入分配紧密相关。如何兼顾不同的发展目标,如何在减贫的同时控制碳排放的上升,从而突破发展与低碳转型之“鱼和熊掌”难题,是学界义不容辞的责任。

第四,前人多关注减排政策对排放水平的影响,鲜有研究聚焦其碳不均等效应,也缺乏对于碳信用分配机制的探索,这些方面的缺失亟须得到弥补。

参 考 文 献

- [1] Alšauskas, O., “World Energy Outlook 2024”, 2024.
- [2] Álvarez-Herránz, A., D. Balsalobre, J. M. Cantos, and M. Shahbaz, “Energy Innovations-GHG Emissions Nexus: Fresh Empirical Evidence from OECD Countries”, *Energy Policy*, 2017, 101, 90-100.
- [3] Andersson, J. J., “Carbon Taxes and CO₂ Emissions: Sweden as a Case Study”, *American Economic Journal: Economic Policy*, 2019, 11(4), 1-30.
- [4] Ang, B. W., “LMDI Decomposition Approach: A Guide for Implementation”, *Energy Policy*, 2015, 86, 233-238.

^① 本文附录提供了一份不完全的研究资源汇总。当然,不同来源的数据往往不具有 consistency。比如,Liu et al. (2015)分析了中国 4 243 个国有煤矿和 100 个最大煤矿区的样本,发现中国煤炭的排放因子比 IPCC 提供的数值低 40%,这一差距导致中国 2000—2013 年间累计的二氧化碳排放被高估了约 13%。限于篇幅,附录未在正文列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

- [5] Ang, B. W., and K.-H. Choi, "Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method", *The Energy Journal*, 1997, 18(3), 59-73.
- [6] Ang, B. W., F. L. Liu, and H. S. Chung, "Index Numbers and the Fisher Ideal Index Approach in Energy Decomposition Analysis", *National University of Singapore: Department of Industrial and Systems Engineering*, 2002, 32(9), 1131-1139.
- [7] Barrage, L., and W. Nordhaus, "Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(13), e2312030121.
- [8] Baylis, K., D. Fullerton, and D. H. Karney, "Leakage, Welfare, and Cost-Effectiveness of Carbon Policy", *American Economic Review*, 2013, 103(3), 332-337.
- [9] Beck, M., N. Rivers, and H. Yonezawa, "A Rural Myth? Sources and Implications of the Perceived Unfairness of Carbon Taxes in Rural Communities", *Ecological Economics*, 2016, 124, 124-134.
- [10] Benlemlih, M., C. Assaf, and I. E. Ouadghiri, "Do Political and Social Factors Affect Carbon Emissions? Evidence from International Data", *Applied Economics*, 2022.
- [11] Bettencourt, L., J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, and G. B. West, "Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(17), 7301-7306.
- [12] Bruvoll, A., and B. M. Larsen, "Greenhouse Gas Emissions in Norway: Do Carbon Taxes Work?", *Energy Policy*, 2004, 32(4), 493-505.
- [13] Burq, F., and L. Chancel, "Aggregate Carbon Footprints on WID.World", *WID. World Technical Note*, 2021, 3.
- [14] Cantore, N., and E. Padilla, "Equality and CO2 Emissions Distribution in Climate Change Integrated Assessment Modelling", *Energy*, 2010, 35(1), 298-313.
- [15] Carl, J., and D. Fedor, "Tracking Global Carbon Revenues: A Survey of Carbon Taxes versus Cap-and-Trade in the Real World", *Energy Policy*, 2016, 96, 50-77.
- [16] Carleton, T., A. Jina, M. Delgado, M. Greenstone, T. Houser, S. Hsiang, A. Hultgren, R. E. Kopp, K. E. McCusker, I. Nath, J. Rising, A. Rode, H. K. Seo, A. Viaene, J. Yuan, and A. T. Zhang, "Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits", *The Quarterly Journal of Economics*, 2022, 137(4), 2037-2105.
- [17] Chancel, L., "Global Carbon Inequality over 1990-2019", *Nature Sustainability*, 2022, 5(11), 931-938.
- [18] Chancel, L., P. Bothe, and T. Voituriez, *Climate Inequality Report 2023: Fair Taxes for a Sustainable Future in the Global South*. World Inequality Lab (WIL), 2023.
- [19] Chancel, L., and T. Piketty, "Carbon and Inequality: From Kyoto to Paris Trends in the Global Inequality of Carbon Emissions (1998-2013) & Prospects for an Equitable Adaptation Fund World Inequality Lab", 2015.
- [20] Chancel, L., T. Piketty, E. Saez, and G. Zucman, *World Inequality Report 2022*. Harvard University Press, 2022.
- [21] Chen, J., S. Cheng, M. Song, and J. Wang, "Interregional Differences of Coal Carbon Dioxide Emissions in China", *Energy Policy*, 2016, 96, 1-13.
- [22] Chen, K., E. de Schrijver, S. Sivaraj, F. Sera, N. Scovronick, A. M. Vicedo-Cabrera, et al., "Impact of Population Aging on Future Temperature-Related Mortality at Different Global Warming Levels", *Nature Communications*, 2024, 15(1), 1796.
- [23] Clarke-Sather, A., J. Qu, Q. Wang, J. Zeng, and Y. Li, "Carbon Inequality at the Sub-National Scale: A Case Study of Provincial-Level Inequality in CO2 Emissions in China 1997-2007", *Energy Policy*, 2011, 39(9), 5420-5428.
- [24] Clausing, K. A., and C. Wolfram, "Carbon Border Adjustments, Climate Clubs, and Subsidy Races When Climate Policies Vary", *Journal of Economic Perspectives*, 2023, 37(3), 137-162.

- [25] Colmer, J., R. Martin, M. Muûls, and U. J. Wagner, "Does Pricing Carbon Mitigate Climate Change? Firm-Level Evidence from the European Union Emissions Trading System", *Review of Economic Studies*, 2024, rdae055.
- [26] Costinot, A., D. Donaldson, and C. Smith, "Evolving Comparative Advantage and the Impact of Climate Change in Agricultural Markets: Evidence from 1.7 Million Fields around the World", *Journal of Political Economy*, 2016, 124(1), 205-248.
- [27] Cowell, F. A., *Measuring Inequality*. Oxford University Press, 2011.
- [28] Davis, S. J., and K. Caldeira, "Consumption-Based Accounting of CO₂ Emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(12), 5687-5692.
- [29] DeConato, R. M., D. Pollard, R. B. Alley, I. Velicogna, E. Gasson, N. Gomez, S. Sadai, A. Condrón, D. M. Gilford, E. L. Ashe, R. E. Kopp, D. Li, and A. Dutton, "The Paris Climate Agreement and Future Sea-Level Rise from Antarctica", *Nature*, 2021, 593(7857), 83-89.
- [30] Dell, M., B. F. Jones, and B. A. Olken, "Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century", *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2012, 4(3), 66-95.
- [31] Dietz, T., and E. A. Rosa, "Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology", *Human Ecology Review*, 1994, 1(2), 277-300.
- [32] Diffenbaugh, N. S., and M. Burke, "Global Warming Has Increased Global Economic Inequality", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(20), 9808-9813.
- [33] Dong, F., Y. Wang, B. Su, Y. Hua, and Y. Zhang, "The Process of Peak CO₂ Emissions in Developed Economies: A Perspective of Industrialization and Urbanization", *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141, 61-75.
- [34] Duro, J. A., "On the Automatic Application of Inequality Indexes in the Analysis of the International Distribution of Environmental Indicators", *Ecological Economics*, 2012, 76, 1-7.
- [35] Duro, J. A., and E. Padilla, "International Inequalities in per Capita CO₂ Emissions: A Decomposition Methodology by Kaya Factors", *Energy Economics*, 2006, 28(2), 170-187.
- [36] Duro, J. A., J. Teixidó-Figueroa, and E. Padilla, "The Causal Factors of International Inequality in CO₂ Emissions Per Capita: A Regression-Based Inequality Decomposition Analysis", *Environmental and Resource Economics*, 2017, 67(4), 683-700.
- [37] Ehrlich, P. R., and J. P. Holdren, "Impact of Population Growth", *Science*, 1971, 171(3977), 1212-1217.
- [38] Eldering, A., P. O. Wennberg, D. Crisp, D. S. Schimel, M. R. Gunson, A. Chatterjee, J. Liu, F. M. Schwandner, Y. Sun, C. W. O'Dell, C. Frankenberg, T. Taylor, B. Fisher, G. B. Osterman, D. Wunch, J. Hakkarainen, J. Tamminen, and B. Weir, "The Orbiting Carbon Observatory-2 Early Science Investigations of Regional Carbon Dioxide Fluxes", *Science*, 2017, 358(6360), eaam5745.
- [39] Elliott, J., I. Foster, S. Kortum, T. Munson, F. P. Cervantes, and D. Weisbach, "Trade and Carbon Taxes", *American Economic Review*, 2010, 100(2), 465-469.
- [40] Falkner, R., N. Nasiritousi, and G. Reischl, "Climate Clubs: Politically Feasible and Desirable?", *Climate Policy*, 2022, 22(4), 480-487.
- [41] Fan, J.-L., Y.-B. Hou, Q. Wang, C. Wang, and Y.-M. Wei, "Exploring the Characteristics of Production-Based and Consumption-Based Carbon Emissions of Major Economies: A Multiple-Dimension Comparison", *Applied Energy*, 2016, 184, 790-799.
- [42] Fan, Y., L.-C. Liu, G. Wu, and Y.-M. Wei, "Analyzing Impact Factors of CO₂ Emissions Using the STIRPAT Model", *Environmental Impact Assessment Review*, 2006, 26(4), 377-395.
- [43] Farrokhi, F., and A. Lashkaripour, "Can Trade Policy Mitigate Climate Change?", *Unpublished Working Paper*, 2021.

- [44] Feindt, S., U. Kornek, J. M. Labeaga, T. Sterner, and H. Ward, "Understanding Regressivity: Challenges and Opportunities of European Carbon Pricing", *Energy Economics*, 2021, 103, 105550.
- [45] Feng, K., S. J. Davis, L. Sun, X. Li, D. Guan, W. Liu, Z. Liu, and K. Hubacek, "Outsourcing CO2 within China", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(28), 11654-11659.
- [46] Flörke, M., C. Schneider, and R. I. McDonald, "Water Competition between Cities and Agriculture Driven by Climate Change and Urban Growth", *Nature Sustainability*, 2018, 1(1), 51-58.
- [47] Fremstad, A., and M. Paul, "The Impact of a Carbon Tax on Inequality", *Ecological Economics*, 2019, 163, 88-97.
- [48] Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, J. Hauck, J. Zeng, et al., "Global Carbon Budget 2024", *Earth System Science Data Discussions*, 2024, 1-133.
- [49] Fujimori, S., T. Hasegawa, V. Krey, K. Riahi, C. Bertram, B. L. Bodirsky, V. Bosetti, J. Callen, J. Després, J. Doelman, L. Drouet, J. Emmerling, S. Frank, O. Fricko, P. Havlik, F. Humpenöder, J. F. L. Koopman, H. van Meijl, Y. Ochi, A. Popp, A. Schmitz, K. Takahashi, and D. van Vuuren, "A Multi-Model Assessment of Food Security Implications of Climate Change Mitigation", *Nature Sustainability*, 2019, 2(5), 386-396.
- [50] Garmann, S., "Do Government Ideology and Fragmentation Matter for Reducing CO2-Emissions? Empirical Evidence from OECD Countries", *Ecological Economics*, 2014, 105, 1-10.
- [51] Golley, J., and X. Meng, "Income Inequality and Carbon Dioxide Emissions: The Case of Chinese Urban Households", *Energy Economics*, 2012, 34(6), 1864-1872.
- [52] Graff Zivin, J., and M. Neidell, "Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change", *Journal of Labor Economics*, 2014, 32(1), 1-26.
- [53] Grossman, G., and A. Krueger, "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement", National Bureau of Economic Research, 1991.
- [54] Grunewald, N., M. Jakob, and I. Mouratiadou, "Decomposing Inequality in CO2 Emissions: The Role of Primary Energy Carriers and Economic Sectors", *Ecological Economics*, 2014, 100, 183-194.
- [55] Guan, D., J. Meng, D. M. Reiner, N. Zhang, Y. Shan, Z. Mi, S. Shao, Z. Liu, Q. Zhang, and S. J. Davis, "Structural Decline in China's CO2 Emissions through Transitions in Industry and Energy Systems", *Nature Geoscience*, 2018, 11(8), 551-555.
- [56] Gudipudi, R., T. Fluschnik, A. G. C. Ros, C. Walther, and J. P. Kropp, "City Density and CO2 Efficiency", *Energy Policy*, 2016, 91, 352-361.
- [57] Hallegatte, S., and J. Rozenberg, "Climate Change through a Poverty Lens", *Nature Climate Change*, 2017, 7(4), 250-256.
- [58] Heilmann, K., M. E. Kahn, and C. K. Tang, "The Urban Crime and Heat Gradient in High and Low Poverty Areas", *Journal of Public Economics*, 2021, 197, 104408.
- [59] Hou, J., M. Wan, and M. Song, "Carbon Emission Inequality and Fairness from Energy Consumption by Prefecture-Level Cities in China", *Ecological Indicators*, 2024, 158, 111364.
- [60] Hsiang, S. M., M. Burke, and E. Miguel, "Quantifying the Influence of Climate on Human Conflict", *Science*, 2013, 341(6151), 1235367.
- [61] IPCC, *Climate Change 2022-Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023.
- [62] Jaffe, A., R. Newell, and R. Stavins, "Technological Change and the Environment", National Bureau of Economic Research, 2000.
- [63] Jaraitė, J., and C. D. Maria, "Did the EU ETS Make a Difference? An Empirical Assessment Using Lithuanian Firm-Level Data", *The Energy Journal*, 2016, 37(2), 68-92.

- [64] Känzig, D., “The Unequal Economic Consequences of Carbon Pricing”, National Bureau of Economic Research, 2023.
- [65] Kartha, S., E. Kemp-Benedict, E. Ghosh, A. Nazareth, and T. Gore, *The Carbon Inequality Era: An Assessment of the Global Distribution of Consumption Emissions among Individuals from 1990 to 2015 and Beyond*. Oxfam, Stockholm Environment Institute, 2020.
- [66] Keohane, R. O., “Institutions for a World of Climate Injustice”, *Fudan Journal of the Humanities and Social Sciences*, 2019, 12(2), 293-307.
- [67] Klenert, D., L. Mattauch, E. Combet, O. Edenhofer, C. Hepburn, R. Rafaty, and N. Stern, “Making Carbon Pricing Work for Citizens”, *Nature Climate Change*, 2018, 8(8), 669-677.
- [68] Konapala, G., A. K. Mishra, Y. Wada, and M. E. Mann, “Climate Change Will Affect Global Water Availability through Compounding Changes in Seasonal Precipitation and Evaporation”, *Nature Communications*, 2020, 11(1), 3044.
- [69] Kotz, M., A. Levermann, and L. Wenz, “The Economic Commitment of Climate Change”, *Nature*, 2024, 628(8008), 551-557.
- [70] Kulp, S. A., and B. H. Strauss, “New Elevation Data Triple Estimates of Global Vulnerability to Sea-Level Rise and Coastal Flooding”, *Nature Communications*, 2019, 10(1), 4844.
- [71] Kussel, G., “Adaptation to Climate Variability: Evidence for German Households”, *Ecological Economics*, 2018, 143, 1-9.
- [72] Landis, F., and T. Bernauer, “Transfer Payments in Global Climate Policy”, *Nature Climate Change*, 2012, 2(8), 628-633.
- [73] Le Quéré, C., J. I. Korsbakken, C. Wilson, J. Tosun, R. Andrew, R. J. Andres, J. G. Canadell, A. Jordan, G. P. Peters, and D. P. van Vuuren, “Drivers of Declining CO₂ Emissions in 18 Developed Economies”, *Nature Climate Change*, 2019, 9(3), 213-217.
- [74] Liddle, B., “What Are the Carbon Emissions Elasticities for Income and Population? Bridging STIRPAT and EKC via Robust Heterogeneous Panel Estimates”, *Global Environmental Change*, 2015, 31, 62-73.
- [75] Lin, B., and X. Li, “The Effect of Carbon Tax on per Capita CO₂ Emissions”, *Energy Policy*, 2011, 39(9), 5137-5146.
- [76] Liu, W., G. Spaargaren, N. Heerink, A. P. J. Mol, and C. Wang, “Energy Consumption Practices of Rural Households in North China: Basic Characteristics and Potential for Low Carbon Development”, *Energy Policy*, 2013, 55, 128-138.
- [77] Liu, Y., Z. Zhang, X. Chen, C. Huang, F. Han, and N. Li, “Assessment of the Regional and Sectoral Economic Impacts of Heat-Related Changes in Labor Productivity Under Climate Change in China”, *Earth's Future*, 2021, 9(8), e2021EF002028.
- [78] Liu, Z., Z. Deng, S. J. Davis, C. Giron, and P. Ciais, “Monitoring Global Carbon Emissions in 2021”, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4), 217-219.
- [79] Liu, Z., D. Guan, W. Wei, S. J. Davis, P. Ciais, J. Bai, S. Peng, Q. Zhang, K. Hubacek, G. Marland, R. J. Andres, D. Crawford-Brown, J. Lin, H. Zhao, C. Hong, T. A. Boden, K. Feng, G. P. Peters, F. Xi, J. Liu, Y. Li, Y. Zhao, N. Zeng, and K. He, “Reduced Carbon Emission Estimates from Fossil Fuel Combustion and Cement Production in China”, *Nature*, 2015, 524(7565), 335-338.
- [80] Mathur, A., and A. C. Morris, “Distributional Effects of a Carbon Tax in Broader U.S. Fiscal Reform”, *Energy Policy*, 2014, 66, 326-334.
- [81] Matthews, H. D., “Quantifying Historical Carbon and Climate Debts among Nations”, *Nature Climate Change*, 2016, 6(1), 60-64.
- [82] McGuirk, E. F., and N. Nunn, “Transhumant Pastoralism, Climate Change, and Conflict in Africa”, *Review*

- of Economic Studies*, 2024, rdae027.
- [83] Meng, J., J. Huo, Z. Zhang, Y. Liu, Z. Mi, D. Guan, and K. Feng, "The Narrowing Gap in Developed and Developing Country Emission Intensities Reduces Global Trade's Carbon Leakage", *Nature Communications*, 2023, 14(1), 3775.
- [84] Metcalf, G. E., and J. H. Stock, "The Macroeconomic Impact of Europe's Carbon Taxes", *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2023, 15(3), 265-286.
- [85] Mi, Z., J. Zheng, J. Meng, J. Ou, K. Hubacek, Z. Liu, D. Coffman, N. Stern, S. Liang, and Y.-M. Wei, "Economic Development and Converging Household Carbon Footprints in China", *Nature Sustainability*, 2020, 3(7), 529-537.
- [86] Miller, R. E., and P. D. Blair, *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Cambridge University Press, 2009.
- [87] Muller, F., *Energy and Environment in Interregional Input-Output Models*. Springer Science & Business Media, 1979.
- [88] Muller, N. Z., and A. Jha, "Does Environmental Policy Affect Scaling Laws between Population and Pollution? Evidence from American Metropolitan Areas", *PLOS One*, 2017, 12(8), e0181407.
- [89] Nordhaus, W., "Climate Clubs: Overcoming Free-Riding in International Climate Policy", *American Economic Review*, 2015, 105(4), 1339-1370.
- [90] Nordhaus, W., "Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics", *American Economic Review*, 2019, 109(6), 1991-2014.
- [91] Obradovich, N., R. Migliorini, M. P. Paulus, and I. Rahwan, "Empirical Evidence of Mental Health Risks Posed by Climate Change", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(43), 10953-10958.
- [92] Oliveira, E. A., J. S. Andrade, and H. A. Makse, "Large Cities Are Less Green", *Scientific Reports*, 2014, 4(1), 4235.
- [93] Osberghaus, D., and T. Abeling, "Heat Vulnerability and Adaptation of Low-Income Households in Germany", *Global Environmental Change*, 2022, 72, 102446.
- [94] Oswald, Y., A. Owen, and J. K. Steinberger, "Large Inequality in International and Intranational Energy Footprints between Income Groups and across Consumption Categories", *Nature Energy*, 2018, 5(3), 231-239.
- [95] Padilla, E., and A. Serrano, "Inequality in CO₂ Emissions across Countries and Its Relationship with Income Inequality: A Distributive Approach", *Energy Policy*, 2006, 34(14), 1762-1772.
- [96] Paramati, S. R., D. Mo, and R. Huang, "The Role of Financial Deepening and Green Technology on Carbon Emissions: Evidence from Major OECD Economies", *Finance Research Letters*, 2021, 41, 101794.
- [97] Peters, G. P., J. C. Minx, C. L. Weber, and O. Edenhofer, "Growth in Emission Transfers via International Trade from 1990 to 2008", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(21), 8903-8908.
- [98] Pindyck, R. S., "Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?", *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3), 860-872.
- [99] Pindyck, R. S., "The Social Cost of Carbon Revisited", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, 94, 140-160.
- [100] Pouliaxis, P. K., N. C. Papapostolou, M. N. Tamvakis, and I. C. Moutzouris, "Carbon Emissions in the U.S.: Factor Decomposition and Cross-State Inequality Dynamics", *The Energy Journal*, 2023, 44(6), 135-162.
- [101] Povitkina, M., "The Limits of Democracy in Tackling Climate Change", *Environmental Politics*, 2018, 27(3), 411-432.
- [102] Rafaty, R., G. Dolphin, and F. Pretis, *Carbon Pricing and the Elasticity of CO₂ Emissions*. Energy Policy Research Group, University of Cambridge, 2020.
- [103] Ribeiro, H. V., D. Rybski, and J. P. Kropp, "Effects of Changing Population or Density on Urban Carbon

- Dioxide Emissions”, *Nature Communications*, 2019, 10(1), 3204.
- [104] Romanello, M., C. di Napoli, C. Green, H. Kennard, P. Lampard, A. Costello, et al., “The 2023 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: The Imperative for a Health-Centred Response in a World Facing Irreversible Harms”, *The Lancet*, 2023, 402(10419), 2346-2394.
- [105] Shan, Y., J. Liu, Z. Liu, X. Xu, S. Shao, P. Wang, and D. Guan, “New Provincial CO2 Emission Inventories in China Based on Apparent Energy Consumption Data and Updated Emission Factors”, *Applied Energy*, 2016, 184, 742-750.
- [106] Shuai, C., L. Shen, L. Jiao, Y. Wu, and Y. Tan, “Identifying Key Impact Factors on Carbon Emission: Evidences from Panel and Time-Series Data of 125 Countries from 1990 to 2011”, *Applied Energy*, 2017, 187, 310-325.
- [107] Solomon, S., G.-K. Plattner, R. Knutti, and P. Friedlingstein, “Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(6), 1704-1709.
- [108] Su, B., and B. W. Ang, “Structural Decomposition Analysis Applied to Energy and Emissions: Some Methodological Developments”, *Energy Economics*, 2012, 34(1), 177-188.
- [109] Sun, J. W., “Changes in Energy Consumption and Energy Intensity: A Complete Decomposition Model”, *Energy Economics*, 1998, 20(1), 85-100.
- [110] Tai, A. P. K., M. V. Martin, and C. L. Heald, “Threat to Future Global Food Security from Climate Change and Ozone Air Pollution”, *Nature Climate Change*, 2014, 4(9), 817-821.
- [111] Tavoni, A., A. Dannenberg, G. Kallis, and A. Löschel, “Inequality, Communication, and the Avoidance of Disastrous Climate Change in a Public Goods Game”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(29), 11825-11829.
- [112] Teixidó-Figueras, J., J. K. Steinberger, F. Krausmann, H. Haberl, T. Wiedmann, G. P. Peters, J. A. Duro, and T. Kastner, “International Inequality of Environmental Pressures: Decomposition and Comparative Analysis”, *Ecological Indicators*, 2016, 62, 163-173.
- [113] Tian, K., Y. Zhang, Y. Li, X. Ming, S. Jiang, H. Duan, C. Yang, and S. Wang, “Regional Trade Agreement Burdens Global Carbon Emissions Mitigation”, *Nature Communications*, 2022, 13(1), 408.
- [114] Tol, R. S. J., “Targets for Global Climate Policy: An Overview”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2013, 37(5), 911-928.
- [115] Vicedo-Cabrera, A. M., N. Scovronick, F. Sera, D. Royé, R. Schneider, A. Gasparrini, et al., “The Burden of Heat-Related Mortality Attributable to Recent Human-Induced Climate Change”, *Nature Climate Change*, 2021, 11(6), 492-500.
- [116] Wan, G., C. Wang, X. Zhang, and C. Zuo, “Income Inequality Effect of Public Utility Infrastructure: Evidence from Rural China”, *World Development*, 2024, 179, 106594.
- [117] Wang, H., and P. Zhou, “Assessing Global CO2 Emission Inequality From Consumption Perspective: An Index Decomposition Analysis”, *Ecological Economics*, 2018, 154, 257-271.
- [118] Wang, M., and C. Feng, “Tracking the Inequalities of Global per Capita Carbon Emissions from Perspectives of Technological and Economic Gaps”, *Journal of Environmental Management*, 2022, 315, 115144.
- [119] Wang, S., and X. Liu, “China’s City-Level Energy-Related CO2 Emissions: Spatiotemporal Patterns and Driving Forces”, *Applied Energy*, 2017, 200, 204-214.
- [120] Wang, X., D. Jiang, and X. Lang, “Future Extreme Climate Changes Linked to Global Warming Intensity”, *Science Bulletin*, 2017, 62(24), 1673-1680.
- [121] Wei, J., R. Hu, Y. Li, and Y. Shen, “Regional Disparities, Dynamic Evolution, and Spatial Spillover Effects of Urban-Rural Carbon Emission Inequality in China”, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, 12, 1309500.
- [122] Weitzman, M. L., “Fat Tails and the Social Cost of Carbon”, *American Economic Review*, 2014, 104(5),

- 544-546.
- [123] Wiedenhofer, D., D. Guan, Z. Liu, J. Meng, N. Zhang, and Y.-M. Wei, "Unequal Household Carbon Footprints in China", *Nature Climate Change*, 2017, 7(1), 75-80.
- [124] Wiedmann, T., M. Lenzen, L. T. Keyßer, and J. K. Steinberger, "Scientists' Warning on Affluence", *Nature Communications*, 2020, 11(1).
- [125] World Bank, *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. 2023.
- [126] Wu, S., and Z.-M. Chen, "Carbon Inequality in China: Evidence from City-Level Data", *China Economic Review*, 2023, 78, 101940.
- [127] Xu, J., Y. Guan, J. Oldfield, D. Guan, and Y. Shan, "China Carbon Emission Accounts 2020-2021", *Applied Energy*, 2024, 360, 122837.
- [128] Xu, X., L. Han, and X. Lv, "Household Carbon Inequality in Urban China, Its Sources and Determinants", *Ecological Economics*, 2016, 128, 77-86.
- [129] York, R., E. A. Rosa, and T. Dietz, "STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts", *Ecological Economics*, 2003, 46(3), 351-365.
- [130] Yu, J., X. Shi, D. Guo, and L. Yang, "Economic Policy Uncertainty (EPU) and Firm Carbon Emissions: Evidence Using a China Provincial EPU Index", *Energy Economics*, 2021, 94, 105071.
- [131] Zhao, C. L., and P. P. Tans, "Estimating Uncertainty of the WMO Mole Fraction Scale for Carbon Dioxide in Air", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D8).

Carbon Emissions and Inequality: A Literature Review

WAN Guanghua

(Nankai University)

CHENG Ruiyang

(Fudan University)

ZHANG Xun*

(Beijing Normal University)

Abstract: Climate change caused by carbon emissions is the greatest challenge facing humanity. While carbon emissions have been extensively studied, relatively few studies have focused on carbon inequality across countries, regions, or individual households. We systematically review the measurement and decomposition of carbon emissions, their driving factors, consequences, and mitigation policies. Special attention is given to carbon inequality issue, including a comparison of different inequality metrics and decomposition methods, a discussion of its components and driving forces, and finally, an exploration of how considerations of carbon inequality should be integrated into the design and implementation of emission reduction policies.

Keywords: carbon emissions; carbon inequality; climate change

JEL Classification: Q54, D63, Q56

* Corresponding Author; ZHANG Xun, No. 19 Xijiekou Outer Street, Haidian District, Beijing 100875, China; Tel:86-15201468521; E-mail:zhangxun@bnu.edu.cn.