

气候变化、贸易成本与经济增长^{*}

——基于国际航运数据的定量估算

王欢欢 郭 策 倪 童

摘要:在全球气候变化的大背景下,本文借助全球船舶航行高频数据识别海运航程,并估计海运遭遇的极端天气冲击对贸易成本的影响。实证结果显示,相较于世界其他国家,中国海运航程遭遇极端天气的概率更高,航程平均延误时间更长,贸易成本增加更多,约为0.86%。本文进一步将极端天气冲击和投入产出关联纳入多地区多部门的一般均衡框架,定量评估了海运极端天气对中国经济的影响,并对气候变化的长期影响进行了预测。研究发现,海运极端天气冲击对中国国内生产总值的负面影响约为-0.07%,是世界其他国家受到极端天气影响的1.32倍;而投入产出关联会放大极端天气冲击对国内生产总值的负面影响。通过对气候变化的长期影响进行预测和估算,本文发现,伴随着气候变化的加剧,海洋高强度气旋时间占比将持续提升,极端天气引致的中国和世界贸易成本的差异将持续扩大,到2100年,对我国经济的负面影响将上升至当前的1.68倍,约为-0.12%。

关键词:气候变化 极端天气 国际航运 贸易成本 投入产出关联

一、引言

气候变化问题是人类社会当前面临的最大挑战之一^①,无疑,也已成为建设美丽中国和推进中国式现代化进程中的重要风险^②。相较于气候变化引发的其他极端天气(如热浪、洪水、干旱、山火等),海运遭遇的热带气旋等极端天气对于我们理解气候变化对社会经济活动,尤其是国际贸易成本的影响具有高度代表性。首先,热带气旋不仅是最具破坏力的极端天气事件,也是唯一同时依赖海洋热力条件与大气动力过程的灾害,热带气旋的能量来源(暖海水)、破坏媒介(风暴潮)、次生灾害(暴雨洪水)均与气候变化核心参数(温度、海平面、水汽)呈强非线性关系。这使得热带气旋成为气候变化的高保真信号载体。意即,其强度对气候变化引起的海水升温、大气和海洋环流变化的敏感性远超其他灾害(克努森等,2020)。其次,由于热带气旋等海上极端天气常表现为狂风、巨浪、暴雨、风暴潮等多种灾害的复合形式,且路径与强度突变频繁,可预测性差,因而,常对海洋运输造成严重影响,考虑到海运承担全球贸易量的80%以上^③,这意味着,海运极端天气能直接触发跨国贸易震荡,具有其他气候灾害难以企及的全球性经济贸易连锁效应。

热带气旋等极端天气事件对海运的影响主要表现为两类。一类是运输途中的时间延误。更长的运输时间不仅会增加库存和折旧成本,例如产品的贮存费用、生鲜农产品的腐败、电子产品的过时等;可能引发客户索赔、履约纠纷,增加合同违约风险,还可能会导致客户选择从其他国家购买,影响企业的信誉和议价能力,造成市场份额损失(赫梅尔,2007;赫梅尔、肖尔,2013)。另一类则为运输过程中产生的货物损耗。作为破坏力极强的自然现象,热带气旋常常对海上货物运输造成严重影响,货损乃至沉船事故时有发生。然而,此类货物损失具有一定的偶然性,其发生概率和损失程度很难用实际数据捕捉并刻画。相对货物损耗而言,运输时间延误具有更高的发生频率、更广的影响范围以及更系统性的经济后果,其在实际贸易成本中更具有代表性与普遍性。特别是在全球价值链高度依赖准时交付的背景下,哪怕是数小时的航程延误,也可能扰乱企业的库

收稿时间:2025-2-27;反馈外审意见时间:2025-5-16;拟录用时间:2025-8-7。

^{*}作者感谢教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD790014)、国家自然科学基金重点项目(72433002)、国家自然科学基金应急项目(72341011)、国家自然科学基金面上项目(72373030)、国家自然科学基金创新群体项目(72121002)的资助,文责自负。郭策为本文通讯作者。

存管理、生产节奏与客户关系。正如《2024年海运述评》指出的,气候变化持续威胁和干扰着全球贸易的准时交付,航程延长、航线调整、极端天气频发等问题导致航运成本上升,迫切需要加强对海上咽喉要塞、基础设施与运营系统的韧性建设^④。

中国是世界上受到热带气旋影响最大的地区之一(伊曼纽尔,2005;刘、詹,2022)。作为全球最大的海运贸易国和全球集装箱吞吐量最高的国家,中国的对外贸易高度依赖远洋航运,海运作为中国对外贸易的纽带,承担了中国约95%的国际贸易货物量^⑤。未来,气旋对中国的影响将进一步加剧,联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告预测,全球气温攀升会进一步促使气旋从低纬度向高纬度移动,中国沿海的气旋暴露度将进一步提升^⑥。具体而言,一方面,中国海运航程遭遇热带气旋的频率显著高于全球平均水平。根据船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据,世界其他国家海运航程受到热带气旋影响的概率为35.46%,而中国海运航程受到气旋影响的概率为61.57%,约为世界其他国家的1.74倍。另一方面,中国航程受到气旋影响的时间占比高于世界其他国家,周围海域航线分布更密集,即便面对相同强度的气旋,造成的时间延误与经济成本也更大。从中国的贸易网络来看,中国的主要贸易伙伴也大多集中在热带气旋高发区域。在中国前十大贸易伙伴中,有6个国家(日本、韩国、澳大利亚、越南、马来西亚和印度)处于或邻近西太平洋气旋多发区^⑦。这六国与中国的双边贸易额达13.18万亿元人民币,占前十大贸易伙伴总额的52.53%。其中,日本、韩国、越南和马来西亚直接处于气旋核心活动区域;而澳大利亚和印度虽不在中心,但其主要航线路径穿越高风险海域。综上,中国海运航程遭遇气旋的概率更高、受影响时间更长,具有航线分布与气旋活跃区域高度重合的贸易网络,从而,对热带气旋暴露程度更高,受到影响更大。因此,气候变化引发的极端天气冲击不仅会显著增加中国对外贸易的时间成本,导致库存和折旧成本的增加与市场机会的错失,还会进一步阻碍区域一体化整合和全球价值链深化,制约经济的长期增长潜力。因而,在我国绿色发展、低碳化结构转型的目标下(王欢欢等,2023),研究气候变化如何通过影响国际海运,进而对贸易成本和我国的经济增长产生影响,具有尤为重要的现实意义。

然而,囿于数据的可得性,已有文献对本问题的关注较少^⑧。为此,本文首先借助全球船舶航行高频数据识别海运航程,实证估计出中国不同省(直辖市)港口的航程时间受到海运极端天气影响的大小,并基于转化模型将时间延误转化为贸易成本,然后利用不同港口进出口结构的差异计算出行业层面的贸易成本变化。其次,本文将气旋导致的贸易成本变化纳入包含投入产出关联的多地区多部门的一般均衡贸易模型。基于上述理论框架,本文采用世界投入产出表以及双边进口关税数据,量化评估了极端天气冲击对中国实际国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)的影响。系列量化分析结果表明:第一,海运极端天气冲击对中国GDP的负面影响约为-0.07%,是世界其他国家受到极端天气影响的1.32倍;第二,投入产出关联会放大极端天气冲击对GDP的负面影响。最后,本文对气候变化的长期影响进行了预测和估算。长期来看,伴随着气候变化的加剧,海洋高强度气旋时间占比将持续提升,极端天气引致的中国和世界贸易成本的差异将持续扩大。到2100年,极端天气冲击对我国经济的负面影响将上升至当前的1.68倍,约为-0.12%。本文首次使用实时的船舶轨迹数据,借助“盆地法”“时空匹配法”等多种科学方法识别了热带气旋对航程的影响,并采用一般均衡贸易模型,较为准确地量化了海运贸易成本上升对我国经济的影响。已有研究结果揭示了海运极端天气在全球贸易体系中的区域不平衡性分布,对我国的贸易成本和经济带来了不对称的冲击。本文研究发现不仅为宏观层面将气候风险纳入政策框架与产业规划提供了决策依据,也有助于微观层面的贸易与海运企业更精准地提升风险管理和物流配置能力,并指出了未来加强海运基础设施韧性的重要性。

本研究主要与3支文献相关。第一支文献主要关注运输时间对于贸易成本的影响。已有关贸易成本的文献主要聚焦于国际关税壁垒(段玉婉等,2023;樊海潮等,2021,2024;纪珽等,2025),而赫梅尔(2007)最早提出了时间在国际贸易中的重要性,强调了“时间成本”作为一种非价格成本,其影响在现代全球贸易中日益显著。德兰科夫等(2010)发现运输时间增加会显著降低出口额,时间敏感型产品(如易腐农产品和高价值制造品)受影响尤为显著。赫梅尔和肖尔(2013)进一步将时间成本和运输方式选择纳入理论模型,对运输时间进行了贸易成本的量化,发现每增加一天运输时间相当于额外征收0.6%~2.1%的从价税。伯德等(2020)将该框架

拓展至交通运输设施改善所导致的时间成本下降,并利用转化模型实现了从时间维度到贸易成本的测算。近年来,一些最新研究在一般均衡框架下探讨了“一带一路”建设(伯德等,2020;塞尔斯等,2020)、新冠疫情冲击(亚历山德里亚等,2023)、北极航道开通(贝克尔斯等,2018)导致的运输时间变化对不同国家贸易量、GDP和福利的影响。然而,随着气候变化加剧,极端天气事件日益频繁,其对海上运输时间的影响不断扩大,这一重要因素在现有贸易成本文献中尚未得到充分的研究。本文将极端天气对于航运时间的影响纳入贸易成本维度,基于高频船舶轨迹数据和全球气旋数据库,研究了极端天气对航运时间的影响,并进一步测算出极端天气对我国以及世界其他国家贸易成本的影响幅度。基于此,揭示出中国面临更高的气候风险暴露与运输不确定性。

与本研究有关的第二支文献主要考察极端天气对中国经济的影响。然而,现有研究重点关注极端天气如何影响生产,而忽略了极端天气如何影响贸易。已有研究发现,高温和过量降水会降低农业和工业的产出(陈等,2016;张等,2018)和抑制农业和工业的全要素生产率(陈、龚,2021;张等,2018)。而海运极端天气事件受到的关注较少,少量研究热带气旋对中国经济影响的文献仅关注了其对陆地上经济行为的影响,缺乏对于其海上影响的分析^⑨。中国作为全球最大的货物贸易国,进出口活动高度依赖跨国海运,现有研究对于极端天气如何通过扰动海上运输这一国际贸易中的关键环节来影响中国经济,关注仍较为有限。本文聚焦于极端天气导致的航运时间延误所产生的贸易成本增加,基于一般均衡模型,量化了气候变化对中国国际贸易和GDP的影响,为中国在气候适应性基础设施建设和国际贸易战略制定等方面提供了理论依据。

与本研究有关的第三支文献是预测未来海运极端天气变化趋势的科学文献。已有研究表明,未来海上热带气旋的变化呈现三方面的突出趋势。第一,热带气旋强度将显著增加,生命周期平均风速提升,高强度气旋占比增加(布卢门达尔等,2022;索贝尔等,2016);第二,热带气旋的风暴淹没水平和降水率将显著增加(克努森等,2020;宇津美、金,2022);第三,气旋最高强度范围向极地扩展,影响范围进一步扩大(科辛等,2014;斯塔德霍姆等,2022)。然而,这些研究多聚焦于气候变量本身,缺乏对于极端天气造成经济影响的系统性估算。本文基于包含投入产出关联和要素流动的一般均衡框架,量化评估了极端天气通过增加贸易成本影响贸易活动,进而对各国GDP产生的实际影响。同时,本文还基于科学文献对未来极端天气强度变化的预测,估算了未来海运极端天气引致的贸易成本变化,并对未来极端天气加剧背景下的长期经济后果进行了前瞻性预测,为现有科学文献补充了经济学分析的视角。

本文余下部分安排如下:第二部分重点介绍了研究数据、典型事实和实证结果;第三部分阐释了量化分析的理论模型,并汇报了量化分析的结果;第四部分进行了未来情景模拟;最后为结论和启示。

二、数据介绍、典型事实与实证设计

(一)数据介绍与航程识别

本文的数据主要来源于4个方面。第一,船舶航行高频数据来自AIS。在国际海事组织的强制要求下,船舶自动识别系统已经广泛应用于大型船舶,用于保障船舶航行安全和优化船舶管理。船舶自动识别系统由船载设备终端、岸基接收站和卫星接收站三部分组成,船舶航行期间船载设备以2~180秒为间隔发射信号,传输至基站或卫星进行云端存储,主要信息涵盖船只编码、发射时间、经纬度坐标、对地航速、航向及航行状态等多项参数。本文使用的2017年AIS数据,完整收录了全球18416艘船舶的全年秒级的航行速度、地理位置和运行工况等信息。

第二,热带气旋的数据来自气候管理国际最佳跟踪档案(International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS)。IBTrACS由世界气象组织所有区域专业气象中心以及世界各地的其他组织和个人合作开发,合并了来自多个机构的近期和历史热带气旋数据,提供了全球最完整的热带气旋记录。该数据库提供了气旋每隔3小时的位置和风速信息,本文使用了IBTrACS数据库2017年的气旋数据,该年记录在库的气旋总数为108个。

第三,全球港口的数据来自世界港口指数(World Port Index, WPI)数据库。该数据库由美国国家地理空间情报局开发,提供了全球海港的详细信息。WPI涵盖全球数千个港口的地理位置,并详细列出了超过100项关

键特征和服务内容,包括港口的经纬度、设施、服务等信息。

第四,各省港口进出口的数据来自2015年中国海关数据库。中国海关数据中提供了HS8位码产品的进出口额、运输方式、海关口岸等信息。

考虑到船舶航行高频数据的体量和清洗难度,本文使用Python对AIS数据进行预处理和航程识别。在预处理过程中,首先将秒级数据汇总到小时层面,获得每条船全年8760(24×365)个观测点;其次通过半正矢公式计算船舶相邻时间点之间的距离,剔除定位异常的“非点”^⑩。预处理完成后,我们基于WPI数据库提供的港口坐标,以及AIS数据中的船舶行驶速度,进行航程识别。具体地,参照王等(2021)的做法,本文将船舶数据中速度小于1节且距离港口30海里以内的点定义为“到港”^⑪。从理论上讲,到港过程航速应始终小于1节,但现实中到港过程受港口当前装卸情况影响,船只可能于港口不同泊位间进行位置调整,导致短暂出现航速大于1节的情况。为避免将船只在泊区内的调整行为误判为“航行过程”,本文进一步识别每个“非到港点”前后最近的港口,分别记为“前港口”和“后港口”。若二者相同,则判定该段航程为在港过程,若不同,则判定为航行过程。本文的后续分析主要围绕航行过程(以下简称“航程”)展开。表1中,我们以国际海事组织船舶识别码为9291389的船舶为例,展示了单艘船舶全年航程的划分情况。该船2017年1月14日从斯里兰卡的科伦坡港出发,向东途经孟加拉国、印度尼西亚到达澳大利亚,而后向西折返途经日本、印度尼西亚、南非、科特迪瓦,最终于2017年8月2日到达几内亚的科纳克里港,并在该港停留至2017年12月31日。

接下来,本文对位于同一航线上的航程进行提取和汇总。表2展示了随机选取的4条中国航线的描述性统计信息。本文所指的“航线”为出发港口和到达港口组成的港口对。具体地,若某航程从港口A出发,到港口B结束,则该航程所属的航线为“港口A—港口B”。我们将18416条船同一航线的航程提取到一个文件下,并对航线中所有航程进行统一编号。为方便展示两个港口间的全部航程,表2中将“港口A—港口B”和“港口B—港口A”视为同一航线。但考虑到去程和回程洋流方向不同可能导致航程用时存在系统性差异,严谨起见,在实证回归部分,本文将“港口A—港口B”和“港口B—港口A”视为不同航线。描述性统计的结果显示,各航线的航程时间在均值附近相对集中,但也存在一定程度的波动。造成航程时间波动的因素可能包括天气状况、船舶性能、港口通行效率、船员操作技术等。

(二)气旋匹配与典型事实

1. 气旋匹配

运输时间是极端天气影响贸易成本的主要渠道之一。船舶在运输过程中一旦遭遇热带气旋,需重新评估其航行速度和方向,决定是否采取绕行或等待策略^⑫;在极端情况下,甚至可能存在船舶失控的风险。因此,船舶在海上遭遇热带气旋,会造成运输时间延长,导致贸易成本增加。

若要系统评估热带气旋对贸易成本的影响,必须首先在微观层面实现船舶航程数据与热带气旋数据的匹配,识别出每一条航程是否受到热带气旋的干扰。然而,精准识别航程是否受到气旋影响面临两个方面的困难。第一,热带气旋发生随机性高、移动能力强、影响范围广,其位置和

表1 单条船航程识别示例

出发港口	出发时间	到达港口	到达时间	划分结果
斯里兰卡科伦坡港	2017/1/14 0:00	孟加拉国吉大港	2017/1/19 17:00	航行过程
孟加拉国吉大港	2017/1/29 23:00	孟加拉国蒙格拉港	2017/1/30 21:00	航行过程
孟加拉国蒙格拉港	2017/2/8 4:00	印度尼西亚普苏桑布港	2017/2/14 7:00	航行过程
印度尼西亚普苏桑布港	2017/2/14 9:00	新加坡吉宝港	2017/2/14 9:00	航行过程
新加坡吉宝港	2017/2/14 19:00	澳大利亚米尔纳湾港	2017/2/22 10:00	航行过程
澳大利亚米尔纳湾港	2017/3/12 11:00	澳大利亚海角港	2017/3/21 21:00	航行过程
澳大利亚海角港	2017/3/27 0:00	南太平洋新喀里多尼亚岛	2017/4/2 4:00	航行过程
南太平洋新喀里多尼亚岛	2017/4/9 0:00	日本佐伯港	2017/5/2 0:00	航行过程
日本佐伯港	2017/5/3 10:00	日本细岛港	2017/5/5 2:00	航行过程
日本细岛港	2017/5/5 8:00	日本佐伯港	2017/5/6 11:00	航行过程
日本宇部港	2017/5/6 20:00	新加坡吉宝港	2017/5/17 16:00	航行过程
新加坡吉宝港	2017/5/18 9:00	南非德班港	2017/6/6 7:00	航行过程
南非德班港	2017/6/7 14:00	科特迪瓦圣佩德罗港	2017/6/21 6:00	航行过程
科特迪瓦圣佩德罗港	2017/6/23 15:00	科特迪瓦阿比让港	2017/6/26 14:00	航行过程
科特迪瓦阿比让港	2017/7/29 16:00	几内亚科纳克里港	2017/8/2 6:00	航行过程

注:个别航行过程的到达港口与下一个航程的出发港口存在不一致现象(如2017年5月6日11:00到达日本佐伯港,而同日20:00从日本宇部港出发)。实际过程中,船舶确已发生了位移(从佐伯港缓慢驶至宇部港),但因航速较低、移动时间较短而未被识别为独立航程,造成到达港与出发港不一致的情形。此类短途低速移动较常见于港口密集地区,属算法识别规则下的合理现象,不影响长距离航程分析结果的连续性与准确性。

表2 航程提取汇总

航线名称	航程数量 (个)	航程时间(小时)			
		均值	标准差	最小值	最大值
中国福州港—澳大利亚沃尔科特港	12	257.75	41.56	191	321
中国连云港—澳大利亚纽卡斯尔港	14	430.07	81.53	341	611
中国蛇口港—马来西亚丹戎帕拉帕斯港	293	99.97	20.50	67	184
中国舟山港—俄罗斯东方港	31	111.03	44.01	66	287

强度存在较大的时空不确定性,难以确定其准确的影响半径。第二,海洋工程学的研究发现,船只在遭遇气旋时会提前绕道规避,导致大部分航程和气旋的轨迹都不存在时空上的交集(张等,2024)。除此之外,船只的绕行范围和预测气旋位置、海上天气情况及航线繁忙情况有关,缺乏统一标准,进一步增加了精准识别气旋影响范围的难度。鉴于上述两方面的因素,如果严格直接依据航程和气旋是否存在时空上的交集来判定航程是否受到气旋影响,可能会导致识别出的“不受气旋影响”的航程中混杂有大量实际受到影响的航程,造成估计不准确。

为解决上述问题,考虑到热带气旋一旦发生只会在所处海域内部活动,本文基于气旋活跃海域内气旋的存续时间和同海域航程的运行时间是否存在交集,来判定航程是否受到气旋影响,这种方法简称“盆地法”。IBTrACS数据库将气旋活跃海域划分为7个盆地,包括西太平洋(WP)、东太平洋(EP)、南太平洋(SP)、北印度洋(NI)、南印度洋(SI)、北大西洋(NA)和南大西洋(SA)。基于IBTrACS给出的划分依据,本文将港口按照所处盆地进行了归类,并依据航程出发港口所在盆地和到达港口所在盆地的气旋发生时间是否与航程时间存在交集,判定航程是否受到气旋影响^⑥。具体而言,对某一航程来说,若该航程出发盆地或到达盆地中发生气旋的时间与航程时间存在重叠,则认为该航程受到气旋影响,反之认为不受气旋影响。

基于上述匹配方法,本文对每条航程是否受到热带气旋影响进行了识别。识别结果显示,在同一航线上,受到气旋影响的航程在航行时间和航行距离上均显著高于未受影响的航程,这表明,气旋确实对航运过程产生了实质性干扰。为更直观地展示这一影响,本文以2017年气旋“塔利姆”与“中国上海港—日本东京港”航线为例进行详细说明。气旋“塔利姆”于2017年9月8日12时诞生,9月22日18时消失,存续期间自低纬向高纬移动。从船舶航行轨迹上看,受气旋影响的航程明显向北和向南偏离正常路径,表明船只在面临气旋影响时,有明显的规避和绕行行为。从船舶航行数据上看,受到影响航程的平均用时为106.3小时,没有受到影响航程的平均用时为66.5小时,增幅约为60%;受到影响航程的平均航行距离为1252.08海里,没有受到影响航程的平均航行距离为1031.66海里,增幅约为21%。

2. 典型事实

近年来,气候变化不断加剧,极端天气事件日益频繁,海洋极端天气事件造成的航运延误问题正在对国际贸易安全与全球供应链稳定构成不可忽视的挑战。最新的研究报告显示,2024年全球海运航班准点率仅在50%~55%之间^⑦。在各类极端天气事件中,热带气旋因其高发生频率、路径不确定性及强破坏力,被广泛认为是对海运影响最大的极端天气事件。

典型事实1:我国海运的极端天气暴露比例显著高于他国。基于以上气旋匹配方法,我们初步计算了各国海运的总体暴露比例。如表3所示,中国航程遭遇热带气旋的比例为61.57%,而其他国家为35.46%,中国约为世界其他国家的1.74倍。这一显著差异表明,我国在国际航运体系中面临更高的气旋暴露风险。

典型事实2:气旋强度与地理分布的变化将增高我国贸易面临的风险。一方面,高强度气旋的时间占比呈现上升趋势。如图1所示,全球高强度气旋时间占比从1960年的2.5%逐年攀升至2020年的12.5%。另一方面,联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告预测,热带气旋的路径中心呈由低纬度向高纬度移动的趋势^⑧。这意味着,中国东部沿海地区等中纬度沿海地区未来气旋的暴露风险将持续上升。

基于以上特征事实,定量评估热带气旋对运输时间的影响,特别是识别其对我国与其他国家之间贸易成本的差异化冲击,对于我们理解极端天气的经济后果及优化相关政策设计,具有重要的理论与实践意义。

(三)实证设计与实证结果

1. 实证设计

基于上述分析可知,船舶在遭遇热带气旋时可能会采取等待、绕行等措施,导致航行时间延长。但要评估热带气旋对船舶航行时长的影响及其程

表3 2017年中国和世界其他国家
受到气旋影响的航程占比

中国	航程数(个)	百分比(%)
未受到气旋影响	22453	38.43
受到气旋影响	35969	61.57
总计	58422	100.00
其他国家	航程数(个)	百分比(%)
未受到气旋影响	252205	64.54
受到气旋影响	138586	35.46
总计	390791	100.00

注:中国航程的定义为出发港口或到达港口在中国的航程,世界其他国家航程的定义为出发港口和到达港口均不在中国的航程。

数据来源:根据AIS数据计算。

度,还需要严谨的实证分析。本文采取了如下回归模型,估计热带气旋对航程时间的平均影响:

$$y_{it} = \beta \text{cyclone affected}_{it} + \rho X_{it} + \varphi_k + \varphi_{mn} + \varphi_{mt} + \varphi_{nt} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, i 代表航程, t 代表航程出发的季度^⑧。 y_{it} 衡量在季度 t 出发的船只,行驶航程 i 所用时长。控制变量 X_{it} 包括在季度 t 出发的行驶航程 i 的船舶载重及其所属公司规模^⑨。 k 、 m 、 n 分别表示在季度 t 出发的,行驶航程 i 的船舶类型^⑩,及其对应的出发港口和到达港口。 φ_k 、 φ_{mn} 、 φ_{mt} 、 φ_{nt} 分别代表船舶类型固定效应、出发—到达港口对固定效应、出发港口季度固定效应、到达港口季度固定效应。 $\text{cyclone affected}_{it}$ 代表船舶行驶过程中是否受到气旋影响的虚拟变量。考虑到气旋影响范围广、移动速度快,在海上发生的时间和位置具有较高的不确定性,本文定义当航程时间与出发海域或到达地海域气旋发生时间存在重叠时 $\text{cyclone affected}_{it}$ 取1,不存在重叠时取0。通过控制船舶类型,本文能够控制不同类型船舶航行模式的差异;通过控制出发—到达港口对固定效应,本文能够控制不同航线用时长短的差异;通过控制出发港口时间固定效应和到达港口时间固定效应,我们能够控制不同港口海运贸易的季节性变化。 ε_{it} 为随机误差项。 β 代表气旋对于总航程用时的影响,用于衡量航程时间延误是本文关注的系数。

科学文献预测,伴随着气候变化问题的加剧,未来高强度气旋的占比将显著上升(布卢门达尔等,2022;索贝尔等,2016)。因而,有必要考虑高强度气旋与低强度气旋对船舶航行的不同影响。为此,除以上平均影响外,本文进一步采取了如下回归模型,用以估计海运极端天气强度对海运的异质性影响^⑪。

$$y_{it} = \beta_1 \text{cyclone affected intense}_{it} + \beta_2 \text{cyclone affected weak}_{it} + \rho X_{it} + \varphi_k + \varphi_{mn} + \varphi_{mt} + \varphi_{nt} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, $\text{cyclone affected intense}_{it}$ 为是否受到高强度气旋影响的虚拟变量, $\text{cyclone affected weak}_{it}$ 为是否受到低强度气旋影响的虚拟变量。对于受到气旋影响的航程而言,如果受到高强度气旋影响,则 $\text{cyclone affected intense}_{it}$ 取1,如果未受到高强度气旋影响,则 $\text{cyclone affected weak}_{it}$ 取1^⑫。加入的固定效应同前公式(1)。基于本回归模型,系数 β_1 和 β_2 分别估计了高强度气旋和低强度气旋对航程的影响。从理论上讲,高强度气旋导致的时间延误应长于低强度气旋导致的时间延误。表4汇报了实证回归中核心变量的描述性统计。

2. 基准结果

基于上述两个回归模型,本文采用2017年的AIS数据检验了海运极端天气对于中国和世界其他国家航程用时的影响,表5汇报了回归结果。其中,表5第(1)、(2)列对应式(1), (3)、(4)列对应式(2)。考虑到本文研究的是极端天气导致的跨国贸易成本变化,因此,本文仅考虑跨国航程,在回归样本中删除了出发地和目的地在同一国家的样本。中国航程的定义为出发港口或到达港口在中国的航程,世界其他国家航程的定义为出发港口和到达港口均不在中国的航程。所有实证结果均控制了“船舶载重”和“船舶企业规模”的控制变量,以及船舶类型固定效应、出发—到达港口对固定效应、出发港口时间固定效应和到达港口时间固定效应。

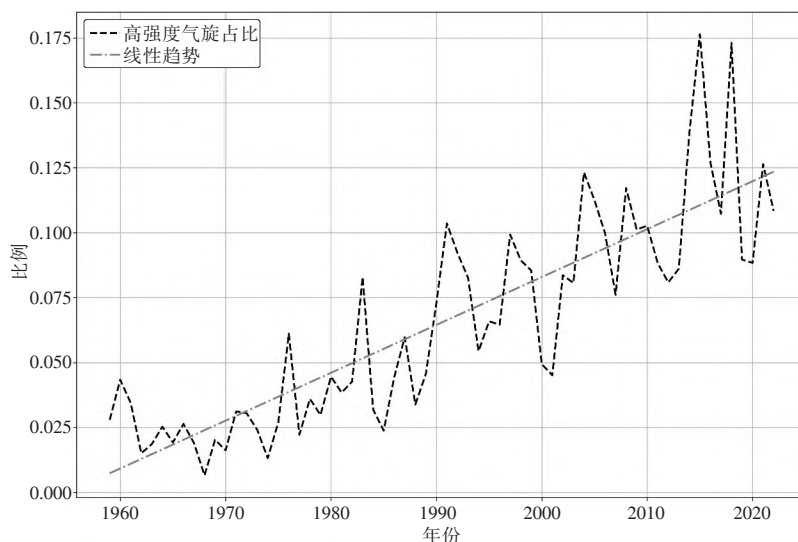


图1 全球高强度气旋时间占比(1959~2022年)

注:根据萨菲尔-辛普森飓风风力等级的定义,三级(1分钟持续风速达到50m/s)及以上的热带气旋属于“强台风”。此处我们以50m/s为界,将气旋划分为“高强度气旋”和“低强度气旋”,图中展示了全球高强度气旋时长占全球气旋总时长的比例变化趋势。

数据来源:IBTrACS数据库及许等(2024)。

表4 核心变量描述性统计

	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
航程时间	449213	137.27	172.25	1	7394
是否受到气旋影响	449213	0.39	0.49	0	1
是否受到高强度气旋影响	449213	0.09	0.29	0	1
是否受到低强度气旋影响	449213	0.30	0.46	0	1

表5第(1)、(2)列的结果表明,遭遇极端天气显著增加了中国和世界其他国家航线的航程用时。平均而言,中国航程时间增加了12.29小时,世界其他国家航程时间增加了7.23小时。表5第(3)、(4)列的结果表明,无论是中国还是世界其他国家,高强度气旋对航程的影响均高于低强度气旋。对中国而言,高强度气旋导致航程时间平均增加34.89小时,低强度气旋导致航程时间平均增加10.97小时;对世界其他国家而言,高强度气旋导致航程时间平均增加16.97小时,低强度气旋导致航程时间平均增加5.40小时。第(1)、(2)列和第(3)、(4)列的回归结果均通过了组间系数差异检验。总体而言,热带气旋对于中国海运航程时间的影响要显著高于世界其他国家,其中,高强度气旋对中国和世界其他国家航程时间影响的差异较大,而低强度气旋对中国和世界其他国家影响的差异相对较小。虽然在回归中本文已经控制了气旋强度的分类变量,但是气旋对中国航程的影响仍然高于世界其他国家的航程。可能的原因在于:一方面,中国周边海域航程密度更高,船舶活动频繁,避让空间受限,同等强度的气旋导致的延误效应也更显著;另一方面,在同为受到气旋影响的航程中,中国航程受到气旋影响的时间占比更长,从而在回归中体现出更大的处理效应^⑧。

3. 进一步讨论

(1) 配对固定效应。为增强识别策略的严谨性,本文在同一航线与同一船舶类型的样本中,为所有受气旋影响的航程匹配与其出发时间最相近的不受气旋影响的航程,形成处理组与对照组的配对样本。在控制出发一到达港口对固定效应、出发港口季度固定效应及到达港口季度固定效应的基础上,本文进一步引入配对固定效应,用以吸收处理组与对照组之间可能存在的残余异质性,例如,同一航线内不同类型船舶在规避路径、速度调整或季节性天气响应等方面的行为差异。通过在局部可比的样本中引入配对固定效应,本文进一步提高了识别的精度,从而更可靠地估计气旋对航程时间的因果影响。表6展示了控制配对固定效应的回归结果,总体而言,热带气旋对中国航程用时的影响仍然更为显著。

(2) 延迟出港与拥堵效应。除了延长航程时间外,热带气旋还可能通过以下两种机制影响航运系统的运行效率。其一,气旋的发生可能使部分船舶选择推迟出港,以规避恶劣天气,导致总体航程出发量下降。其二,如果气旋导致航程出发延迟,则先前积压的船舶在气旋结束后集中出港,可能会造成航运线路拥堵,原本不受热带气旋影响的船只也增加了航运时间。“延迟出港”和“拥堵效应”分别对应航程计划层面与运输网络层面的调整,本文对此进行了检验。

首先,为识别是否存在“延迟出港”的现象,本文构建了盆地日层面的样本,将各盆地每日航程出发量作为被解释变量,考察盆地中当日是否发生气旋($cyclone\ affected_{bt}$)以及持续时长($affected\ hours_{bt}$)对航程出发量的影响^⑨。

$$y_{bt} = \beta cyclone\ affected_{bt} + \varphi_{bm} + \varepsilon_{bt} \quad (3)$$

$$y_{bt} = \beta affected\ hours_{bt} + \varphi_{bm} + \varepsilon_{bt} \quad (4)$$

其中, y_{bt} 代表 t 日 b 盆地中的航程出发量, $cyclone$

表5 热带气旋对航程用时的影响

变量	(1) 中国	(2) 世界其他国家	(3) 中国	(4) 世界其他国家
$cyclone_affected$	12.29*** (1.08)	7.23*** (0.30)		
$cyclone_affected_intense$			34.89*** (2.99)	16.97*** (0.73)
$cyclone_affected_weak$			10.97*** (1.01)	5.40*** (0.30)
观测值	51174	335772	51174	335772
调整R ²	0.875	0.915	0.876	0.916
控制变量	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是
出发一到达港口对固定效应	是	是	是	是
出发港口一季节固定效应	是	是	是	是
到达港口一季节固定效应	是	是	是	是
经验P值	0.000***		0.000***	

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。组间系数差异的经验P值均采用费舍尔组合检验自体抽样(bootstrap)100次后得到。

表6 热带气旋对航程用时的影响(控制配对固定效应)

变量	(1) 中国	(2) 世界其他国家	(3) 中国	(4) 世界其他国家
$cyclone_affected$	9.68*** (0.88)	6.26*** (0.30)		
$cyclone_affected_intense$			26.56*** (2.56)	11.22*** (0.67)
$cyclone_affected_weak$			7.77*** (0.80)	5.07*** (0.30)
观测值	51558	195256	51558	195256
调整R ²	0.948	0.968	0.948	0.968
控制变量	是	是	是	是
配对固定效应	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是
出发一到达港口对固定效应	是	是	是	是
出发港口一季节固定效应	是	是	是	是
到达港口一季节固定效应	是	是	是	是
经验P值	0.000***		0.000***	

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。组间系数差异的经验P值均采用费舍尔组合检验自体抽样(bootstrap)100次后得到。

$affected_{bt}$ 为 t 日 b 盆地中是否发生气旋的虚拟变量, $affected\ hours_{bt}$ 代表 t 日 b 盆地中气旋持续的小时数。回归中控制了盆地月份固定效应(φ_{bm})以吸收盆地和时间层面的系统性变化。考虑到气旋对航程出发量的影响可能存在一定的滞后性,本文也使用了滞后一期的气旋变量进行了稳健性检验。

表7中,(1)~(2)列展示了当期气旋发生与否与持续时间的影响,(3)~(4)列展示了对应变量滞后一期的影响。总体而言,气旋对盆地中单日航程出发量的影响虽然为负,但系数很小且并不显著,说明热带气旋导致船舶延迟出港的现象并不严重。

其次,为识别潜在的“拥堵效应”,本文将气旋结束后1天(或3天)内出发的航程,与气旋开始前1天(或3天)内结束的航程进行比较,检验气旋结束后是否存在短期的航程积压和拥堵。选择这种“事前—事后”的对比策略,是因为它能够构建出一个相对合理的对照组。具体而言,在气旋开始前结束的航程尚未受到气旋的直接影响,其航程安排和航运环境可视为正常状态;而在气旋结束后出发的航程虽然本身未处于气旋存续期间,但可能受到因船舶集中出港而产生的短期拥堵影响。通过比较这两个时点航程的航行时间差异,本文可以识别气旋是否通过延迟出港造成的拥堵效应对原本不受直接影响的航程造成间接干扰。 $cyclone_delay_x$ ($x=1,3$)为“航程是否在气旋结束后 x 天内出发”的虚拟变量,回归中的其他控制变量和固定效应与基准回归保持一致,表8展示了对应的回归结果。无论是采用气旋结束后1天还是3天的窗口期,回归结果表明,中国与世界其他国家的航程在气旋形成前与结束后并未表现出显著的航行时间差异,这表明,热带气旋并未通过引发短期拥堵效应对其他航程造成间接影响。

同时,为进一步排除溢出效应对基准回归结果的影响,本文删除了在气旋结束后1天内出发和3天内出发的航程,作为稳健性检验。删掉可能存在溢出效应的样本后,回归结果如表9所示。总体来说,回归系数变化不大,和基准结果保持一致。

延迟出港和拥堵效应不显著可能源于以下两方面的因素。第一,高强度气旋的持续时间较集中,通常为几个小时,而跨国航程通常需要几天到一个月,气旋发生的时间占总航程时间的比例并不高,因此,相较于支付更多在港停泊费用,在海上直接绕开气旋可能是更为经济的选择。再者,对很多航程来说,当处于气旋活跃

表7 极端天气对单日航程出发量的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	当期影响	当期影响	滞后一期影响	滞后一期影响
$cyclone_affected_{bt}$	-0.08 (2.22)			
$affected_hours_{bt}$		-0.02 (0.10)		
$cyclone_affected_{b,t-1}$			-1.07 (2.62)	
$affected_hours_{b,t-1}$				-0.01 (0.13)
观测值	2552	2552	2545	2545
调整 R^2	0.974	0.974	0.975	0.975
盆地—月份固定效应	是	是	是	是

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到盆地层面的标准误。 $cyclone_affected_{bt}$ 和 $affected_hours_{bt}$ 代表当日盆地中是否发生气旋以及气旋持续的小时数, $cyclone_affected_{b,t-1}$ 和 $affected_hours_{b,t-1}$ 代表前一日盆地中是否发生气旋以及气旋持续的小时数。

表8 极端天气的溢出效应分析

变量	溢出效应1天		溢出效应3天	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	中国	世界其他国家	中国	世界其他国家
$cyclone_delay_1$	-1.71 (2.07)	-0.09 (0.63)		
$cyclone_delay_3$			-1.36 (1.23)	-0.01 (0.33)
观测值	855	8842	2930	28497
调整 R^2	0.951	0.956	0.933	0.942
控制变量	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是
出发—到达港口对固定效应	是	是	是	是
出发港口—季节固定效应	是	是	是	是
到达港口—季节固定效应	是	是	是	是

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。 $cyclone_delay_1$ 代表“航程是否在气旋结束后1天内出发”的虚拟变量,在气旋结束后1天内出发取1,在气旋开始前1天内结束取0。 $cyclone_delay_3$ 代表“航程是否在气旋结束后3天内出发”的虚拟变量,在气旋结束后3天内出发取1,在气旋开始前3天内结束取0。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。

表9 热带气旋对航程用时的影响(排除溢出效应)

变量	删除气旋结束后1天样本		删除气旋结束后3天样本	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	中国	世界其他国家	中国	世界其他国家
$cyclone_affected$	12.56*** (1.15)	7.31*** (0.32)	13.20*** (1.32)	7.56*** (0.35)
观测值	45520	312143	36098	268153
调整 R^2	0.874	0.916	0.867	0.920
控制变量	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是
出发—到达港口对固定效应	是	是	是	是
出发港口—季节固定效应	是	是	是	是
到达港口—季节固定效应	是	是	是	是
经验P值	0.000***		0.000***	

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。组间系数差异的经验P值均采用费舍尔组合检验自体抽样(bootstrap)100次后得到。

的季节和区域时,气旋总是频繁出现,无论延迟多久出发都无法达到完全规避的效果。第二,除天气因素外,托运者对货物的需求是决定船舶是否出港的更为重要的因素,且对于集装箱船而言,通常需要在规定的时间到达下一地点。因此,只要气旋没有影响到港口的正常运作,船舶更倾向于按时出发,并在航行过程中通过绕行来规避气旋。

(3)时空匹配法。考虑到基于盆地中气旋的发生时间来识别航程是否受到影响(简称“盆地法”)可能过于宽泛^③,本文进一步采用“时空匹配法”对航程是否受到热带气旋的影响进行了识别。具体而言,在“时空匹配法”中,本文对每一个气旋点构建了半径500海里的空间缓冲区,并允许船舶经过缓冲区的时间存在5小时的时间容错窗口,以此来识别航程是否受气旋影响。

表10和表11分别展示了“时空匹配法”下中国和世界其他国家受到气旋影响的航程占比,以及回归识别出的气旋造成的航运延误时长。在“时空匹配法”下,中国受到气旋影响的航程占比为22.92%,世界其他国家为7.18%;气旋导致中国航程的延误约为17.11小时,世界其他国家为15.40小时。无论从遭遇气旋频率的角度还是从延误时间的角度,中国航程受到热带气旋的影响均显著高于世界其他国家,与盆地法的结果保持一致。相较于“盆地法”,“时空匹配法”识别出的受到气旋影响的航程频率较低,识别出气旋导致的航运时间延误较大,这种差异总体而言符合预期。原因在于,由于“盆地法”对于气旋影响范围的限制更为宽松,匹配到受到影响的航程会更多,宽口径的匹配策略导致无论受到气旋影响大还是受到影响小的航程都会包含在内,从而使得“盆地法”识别出的平均延误更小。而“时空匹配法”对于气旋影响的范围限制更为严格,匹配到受到影响的航程会更少,仅包括受到气旋影响较大的航程,从而导致识别出的平均延误程度更高。

(四)极端天气引起的贸易成本变化的估算

1. 极端天气引起的国家贸易成本的变化

基于上述估计系数,本文可以进一步计算因海运极端天气导致的贸易成本的变化。具体而言,参照伯德等(2020),贸易成本的大小和运输时间的关系服从如下等式:

$$d=1+\lambda time^{\theta} \quad (5)$$

其中, d 代表贸易成本, $time$ 代表运输时长(单位为天), λ 和 θ 为经验参数,参照伯德等(2020)分别取0.09和0.75。因此,未遭遇气旋和遭遇气旋时对应的贸易成本可以分别表示为 $d_0=1+\lambda time^{\theta}$ 和 $d_1=1+\lambda (time+delay)^{\theta}$,其中 $delay$ 代表航行中遭遇极端天气导致的航程时间延误。

极端天气引致的贸易成本增加不仅取决于航程时间的增加,还取决于遭遇极端天气的概率,本文进一步基于如下等式,估算热带气旋导致的贸易成本变化:

$$\hat{d}=Pr(cyclone\ affected=1)\times\left(\frac{d_1}{d_0}-1\right) \quad (6)$$

其中, $\hat{d}$ 代表极端天气导致贸易成本变化, $Pr(cyclone\ affected=1)$ 代表航程受到热带气旋影响的概率。将式(1)的估计结果代入式(5)和式(6),计算可得中国和世界其他国家由极端天气引致的贸易成本变化。如表12所示,极端天气导致中国贸易成本增加0.86%,世界其他国家贸易成本增加0.36%,中国约为世界其他国家的

表10 “时空匹配法”下中国和世界其他国家受到气旋影响的航程占比

中国	航程数	百分比(%)
未受到气旋影响	45034	77.08
受到气旋影响	13388	22.92
总计	58422	100.00
其他国家	航程数	百分比(%)
未受到气旋影响	362713	92.82
受到气旋影响	28078	7.18
总计	390791	100.00

数据来源:根据AIS数据计算。

表11 “时空匹配法”下热带气旋对航程用时的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	中国	世界其他国家	中国	世界其他国家
<i>cyclone_affected</i>	17.11*** (1.50)	15.40*** (0.80)		
<i>cyclone_affected_intense</i>			41.80*** (7.49)	24.60*** (3.83)
<i>cyclone_affected_weak</i>			15.99*** (1.46)	14.86*** (0.81)
观测值	51174	335772	51174	335772
调整R ²	0.875	0.915	0.875	0.915
控制变量	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是
出发—到达港口对固定效应	是	是	是	是
出发港口—季节固定效应	是	是	是	是
到达港口—季节固定效应	是	是	是	是
经验P值		0.02**		0.05**

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。组间系数差异的经验P值均采用费舍尔组合检验自体抽样(bootstrap)100次后得到。

2.4倍^③。

2. 极端天气引起的行业贸易成本的变化

上述结果表明,极端天气会显著增加中国海运的整体航程用时,相应的贸易成本由此增加。那么,中国行业层面的贸易成本将受到何种影响?由于中国不同港口通行的航线不同,极端天气增加的贸易成本可经由港口进出口产品结构的差异,给不同行业的贸易成本带来异质性影响。因此,我们将中国航程根据经由港口所属省(直辖市)分为11组^④,包括福建省、广东省、广西壮族自治区、海南省、河北省、江苏省、辽宁省、山东省、上海市、天津市、浙江省,分别估计式(1)和式(2),回归结果详见《管理世界》网络发行版附录A.1。式(1)中 $cyclone\ affected_{it}$ 的回归系数 β 即为模型估计出的极端天气导致的时间延误。将估计出的时间延误代入式(5)和式(6),能够计算出所有沿海省份的贸易成本变化。

由于中国不同省份港口进出口产品的结构存在差异,我们进一步结合各省海关进出口数据,构建了如下因海运中遭遇极端天气导致的行业层面贸易成本变化的指标:

$$\hat{d}_s = \sum_j \frac{import/export_{sj}}{import/export_s} \hat{d}_j \quad (7)$$

其中, s 代表行业, j 代表省份。 $import/export_{sj}$ 代表中国 s 行业从省份 j 港口的进(出)口额, $import/export_s$ 代表中国 s 行业海运的进(出)口总额。中国各港口海运进出口数据来自2015年中国海关数据库。本文对海关数据做了如下筛选:(1)仅保留“运输方式”为“河海运输”的样本;(2)删除内河港口的样本,其中,安徽省、重庆市、湖北省的港口均为内河港口。本文将筛选出的HS产品层面的数据与投入产出表的22个行业进行匹配,并在行业层面进行加总。

基于上述公式,最终计算可得极端天气导致的中国各行业进出口贸易成本的变化。如图2所示,热带气旋显著增加了中国各行业的进出口贸易成本,其中(a)展示了进口贸易成本变化,(b)展示了出口贸易成本变化。具体来说,进口贸易成本增加最多的3个行业分别为“农林牧副渔”“焦炭和精炼石油产品制造”“木材及木制品加工”;进口贸易成本增加最少的3个行业分别为“纺织业”“金属制品”“非金属矿物制品”。出口贸易成本增加最多的3个行业分别为“采矿业”“焦炭和精炼石油产品制造”“纺织业”;出口贸易成本增加最少的3个行业分别为“采矿业”“焦炭和精炼石油产品制造”“纺织业”。

表12 中国及世界其他国家面临的极端天气导致的贸易成本变化

	因极端天气导致的贸易成本变化
中国	0.86%
其他国家	0.36%

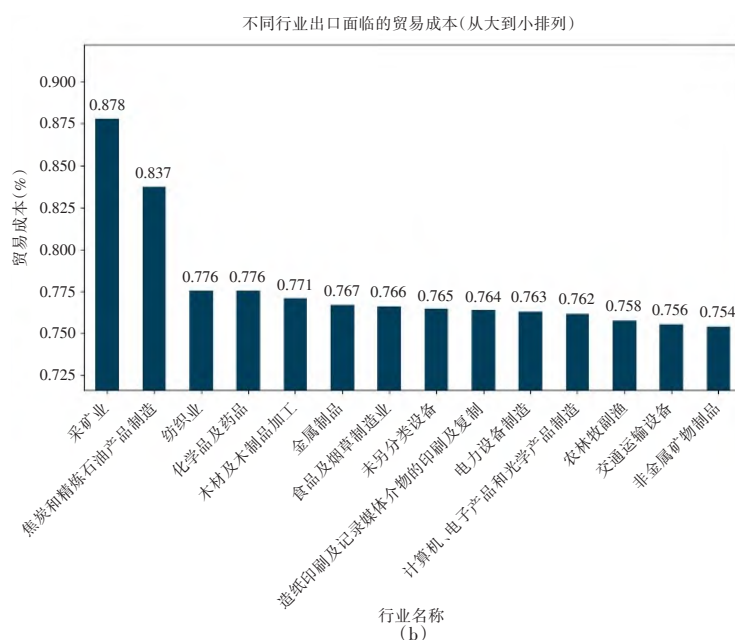
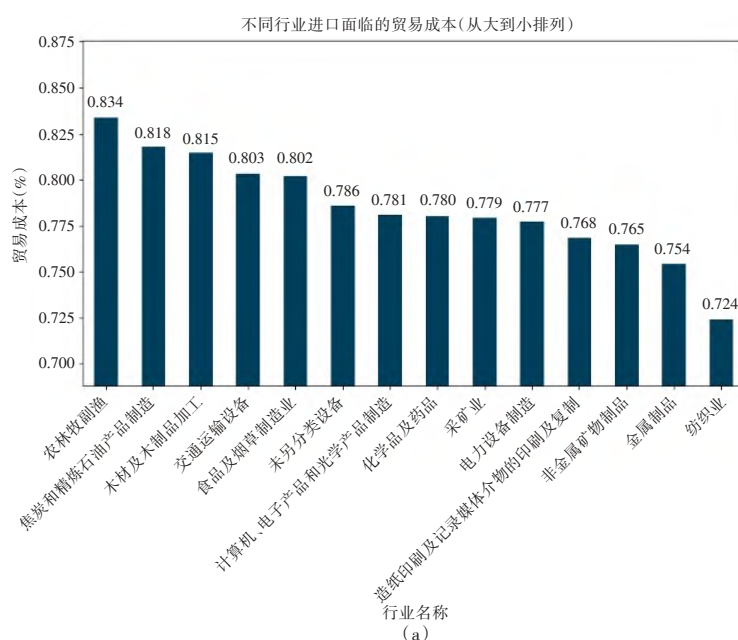


图2 中国不同行业面临的极端天气导致的进出口贸易成本的变化

个行业分别为“非金属矿物制品”“交通运输设备”“农林牧副渔”。

三、定量模型、参数估计及量化结果

前文实证分析提供了如下初步证据:远洋运输中遭遇的极端天气显著增加了国家和行业的贸易成本。由此增加的贸易成本将实质性地影响从事跨国贸易国家的经济增长。为了评估相应的效应,本文构造了定量模型,估计了相应的参数,并考虑气候变化对热带气旋长时间尺度的影响,开展了相应的反事实分析。

(一)理论模型设定

本文基于卡利恩多和帕罗(2015),建立了一个包含区域、行业间要素流动的一般均衡贸易模型。该模型同时考虑了跨国贸易成本和行业间投入产出关联,以综合评估极端天气事件的经济影响。该模型包括3个部分:消费者效用最大化问题、生产者成本最小化问题以及均衡条件。

模型的基本设定如下:假设世界上存在 N 个地区,每个地区有 S 个行业。其中 N 代表中国以及41个世界上的其他国家和地区, S 对应投入产出表的22个行业。假设企业使用劳动力和中间品进行生产,劳动力能够在国内进行跨地区和行业的流动,但不能进行跨国流动。各地区各行业内生产系列连续产品,用 $\omega \in [0, 1]$ 表示,该产品既可以用于最终消费,也可以作为中间品投入生产。 L_i 和 w_i 分别代表地区 i 的劳动力禀赋和工资水平。

1. 消费者效用最大化问题

假设每个地区都存在一个代表性消费者,地区 n 的代表性消费者效用函数为柯布道格拉斯形式:

$$U(C_n) = \prod_{s=1}^S (C_n^s)^{\eta_n^s} \quad (8)$$

其中, $C_n^s = \left[\sum_{i=1}^N \int_0^1 q_{in}^s(\omega) \frac{\sigma_n^s - 1}{\sigma_n^s} d\omega \right]^{\frac{\sigma_n^s}{\sigma_n^s - 1}}$ 代表 n 国消费者消费各地区 s 行业产品的CES加总, η_n^s 代表 n 国消费者购买 s 行业产品支出占总支出的份额。最大化代表性消费者效用可推出 n 地区的价格指数 $P_n^s = \prod_{i=1}^N \left[\frac{P_{in}^s}{\eta_n^s} \right]^{\eta_n^s}$,其中, $P_n^s = \left[\sum_{i=1}^N \int_0^1 p_{in}^s(\omega)^{1-\sigma_n^s} d\omega \right]^{\frac{1}{1-\sigma_n^s}}$ 代表 n 地区面临的 s 行业产品的价格指数。

2. 生产者成本最小化问题

n 国 s 行业中的企业生产异质性产品,其生产函数服从:

$$Y_n^s(\omega) = \varphi_n^s(\omega) (L_n^s)^{\beta_n^s} (M_n^s)^{1-\beta_n^s} \quad (9)$$

其中, $\varphi_n^s(\omega)$ 代表生产率水平,劳动力和中间品的投入份额分别为 β_n^s 和 $1-\beta_n^s$ 。 $M_n^s = \prod_{j=1}^J (m_n^{sj})^{\gamma_n^{sj}}$ 代表 n 地区 s 行业生产所需的中间品, $m_n^{sj} = \left[\sum_{i=1}^N \int_0^1 q_{in}^{sj}(\omega) \frac{\sigma_n^{sj} - 1}{\sigma_n^{sj}} d\omega \right]^{\frac{\sigma_n^{sj}}{\sigma_n^{sj} - 1}}$ 代表 n 国 s 行业生产所需 j 行业中间品的CES加总, γ_n^{sj} 代表 j 行业中间品的投入份额, $\sum_{j=1}^J \gamma_n^{sj} = 1$ 。

假设市场完全竞争,且企业层面满足规模报酬不变。由企业生产的成本最小化可推出单位生产要素组合投入($L_n^{s\beta_n^s} M_n^{s1-\beta_n^s} = 1$)的最小成本为:

$$c_n^s = B_n^s (w_n)^{\beta_n^s} \left(\prod_{j=1}^J (P_n^j)^{\gamma_n^{sj}} \right)^{1-\beta_n^s} \quad (10)$$

其中, $B_n^s = \beta_n^{s\beta_n^s} (1-\beta_n^s)^{-(1-\beta_n^s)} \left[\prod_{j=1}^J (\gamma_n^{sj})^{-\gamma_n^{sj}} \right]^{1-\beta_n^s}$ 。

进一步假设区域间 s 行业的关税壁垒为 $\tau_{in}^s = 1 + t_{in}^s$,贸易成本为 d_{in}^s ,则 n 地区从 i 地区进口 s 行业 ω 产品的价格为^⑧:

$$p_{in}^s(\omega) = \frac{\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s}{\varphi_i^s(\omega)} \quad (11)$$

参考伊顿和科图姆(2002)的设定,在 i 国异质性产品部门 s 中,各企业单独抽取生产率水平 φ ,该生产率水平服从弗雷歇分布,即 $F(\varphi) = e^{-T_i^s \varphi^{-\theta}}$ 。其中, T_i^s 代表 i 国 s 行业的平均技术水平, θ 决定分布的方差, θ 越小,生产率

的分布越分散,这里假设不同地区相同行业的 θ_s 相同,且 $\theta_s > 1$ 。

对不同地区生产的 s 行业产品, n 地区的消费者选择价格最低的产品进行购买,可得 n 地区消费 s 行业产品来自 i 地区的份额满足引力方程:

$$\lambda_{in}^s = \frac{T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s}}{\sum_{i=1}^N T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s}} \quad (12)$$

结合弗雷歇分布(Frechet Distribution)的性质, n 地区面临的 s 行业的价格指数可以重新表示为:

$$P_n^s = \Gamma_s \left\{ \sum_{i=1}^N T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s} \right\}^{\frac{1}{\theta_s}} \quad (13)$$

其中, Γ_s 是由 σ_s 和 θ_s 决定的常数。因此, n 地区的综合价格指数可以改写为:

$$P_n = \prod_{s=1}^S \left[\frac{P_n^s}{\eta_n^s} \right]^{\eta_n^s} = \prod_{s=1}^S \left(\frac{\Gamma_s}{\eta_n^s} \right)^{\eta_n^s} \left\{ \sum_{i=1}^N T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s} \right\}^{-\frac{\eta_n^s}{\theta_s}} \quad (14)$$

3. 均衡条件

由消费者问题可得 n 国 s 行业综合价格指数:

$$P_n^s = \Gamma_s \left\{ \sum_{i=1}^N T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s} \right\}^{\frac{1}{\theta_s}} \quad (15)$$

由生产者问题可得 n 国 s 行业单位生产成本:

$$c_n^s = B_n^s w_n^{\beta_n^s} \left(\prod_{j=1}^J (P_n^j)^{\gamma_n^{s,j}} \right)^{1-\beta_n^s} \quad (16)$$

i 地区 s 行业对 n 地区的出口占 n 地区 s 行业总花费的比重:

$$\frac{X_{in}^s}{X_n^s} = \frac{T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s} \tau_{in}^{s-1}}{\sum_{i=1}^N T_i^s [\tau_{in}^s d_{in}^s c_i^s]^{\theta_s}} \quad (17)$$

n 地区 s 行业总产出等于所有地区对 n 国 s 行业产品的需求:

$$Y_i^s = \sum_{n=1}^N X_{in}^s \quad (18)$$

n 地区 s 行业总需求等于最终品需求与中间品需求之和:

$$X_n^s = \eta_n^s \left(w_n L_n + \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S t_{in}^s X_{in}^s \right) + \sum_{s'=1}^S (1 - \beta_n^{s'}) \gamma_n^{s',s} Y_n^{s'} \quad (19)$$

劳动力市场均衡:

$$w_n L_n = \sum_{s=1}^S \beta_n^s Y_n^s \quad (20)$$

参照卡利恩多和帕罗(2015),本文采用帽子算法进一步简化上述系统,以精简系统中冗余的变量。令 $\hat{x}$ 代表冲击后的值, x 表示冲击前的值,则 $\hat{x}=x/x$ 代表冲击后相对于冲击前的变动。最终建立由(15)~(20)6组方程和6组未知数($P_n^s, w_n, Y_n^s, X_n^s, X_{in}^s, c_n^s$)组成的系统,详见《管理世界》网络发行版附录B。

(二) 实际GDP计算

由前文构建的一般均衡模型可知,当极端天气冲击对贸易成本 d_{in} 造成影响后,会影响消费、生产决策以及要素的流动,对经济系统的各个变量造成影响。为衡量极端天气冲击对中国宏观经济的影响,本文测算了实际GDP的变化幅度。

在本文模型的假设下,实际GDP根据收入法可表示为实际工资收入和关税收入之和。参照樊海潮等(2024), n 地区 j 行业的实际GDP可以表示为:

$$rGDP_n^j = L_n^j \frac{w_n}{P_n} + L_n^j \frac{TR_n}{P_n} \quad (21)$$

其中, L_n^j 代表 n 地区 j 行业户籍人口数, TR_n 代表 n 地区的人均关税收入, P_n 代表 n 地区的综合价格指数。进一步在行业层面进行加总即可得到国家层面的实际GDP。

当极端天气冲击造成贸易成本发生改变 $\hat{d}_{in}$ 后,基于上述等式,本文采用帽子算法可以写出各地区行业实际GDP的变动表达式,并进一步写出全国层面对应的实际GDP变动表达式,限于篇幅此处不再赘述。

（三）数据来源和变量介绍

本文使用的核心数据包括2016年世界投入产出表(WIOD-2016)和双边进口关税数据(WITS-TRAINS)，贸易替代弹性的数据来自文献。表13详细列出了本文模型估计需要的变量、参数及其来源。

为保证投入产出表的内在一致性,我们参照樊海潮等(2024)的做法,将WIOD-2016的56个行业统一加总至22个行业,最终获得42个地区22个行业的拓展投入产出表^②。22个行业中,14个行业为贸易行业,8个行业为服务行业^③,其中,仅贸易行业的贸易成本受海运极端天气影响。基于上述的投入产出表,本文可以进一步计算出各地区各行业的增加值占总产出的比例(即劳动力投入份额) β_n^s ,中间品投入份额 γ_n^s 和最终消费占比 η_n^s 。贸易弹性 θ_s 来自于樊海潮等(2024)。

（四）GDP的整体影响

表14汇报了海洋运输中遭遇的极端天气冲击对中国和世界其他国家实际GDP的影响^④。对中国而言,为方便对比极端天气冲击对经济的直接影响和间接影响,本文考虑如下两种情形:(1)生产中不使用中间品($\beta_n^s=1$);(2)生产中使用中间品。

表14列(1)~(2)分别汇报了情形(1)和情形(2)的模拟结果。情形(1)反映了极端天气冲击对中国实际GDP的直接影响。与情形(1)相比,情形(2)进一步考虑了产品要素的流动,反映了极端天气冲击通过行业投入产出关联的途径,对中国经济产生的间接影响。在不考虑中间投入时,极端天气使得实际GDP下降0.018%,当存在中间投入时实际GDP下降0.073%。可见,投入产出关联会进一步放大极端天气冲击的负面影响。原因在于,极端天气对可贸易行业的直接冲击会通过投入产出关联,影响上游行业产品销售和下游行业产品生产,进一步放大对实际GDP的负面影响。

表14列(3)汇报了极端天气冲击对世界其他国家实际GDP的影响,海运极端天气冲击使得其他国家实际GDP下降0.055%。对比列(2)和列(3)可知,极端天气对中国实际GDP的负向冲击显著大于对世界其他国家的影响,中国约为世界其他国家的1.32倍。极端天气冲击对实际GDP影响的行业分解详见《管理世界》网络发行版附录C中表C3。

表 13 模型参数说明

变量及参数	参数及变量说明	数据来源
X_m^s	双边贸易额	WIOD-2016
β_n^s	n 地区 s 行业生产中劳动力投入份额	WIOD-2016
γ_n^s	n 地区 s 行业生产中 j 行业中间品投入份额	WIOD-2016
η_n^s	n 地区最终消费中 s 行业产品消费所占比重	WIOD-2016
θ_s	s 行业贸易替代弹性	樊海潮等(2024)
t_m^s	双边进口关税	WITS-TRAINS

表 14 极端天气冲击对中国和世界其他国家实际 GDP 的影响

	(1)	(2)	(3)
	中国		其他国家
	无中间品投入	有中间品投入	
GDP	-0.018%	-0.073%	-0.055%

四、情境模拟：气候变化的长期影响

影响气旋的因素主要包括海温、大气稳定性、对流层湿度和垂直风切变(格雷,1968),其中海温是全球变暖影响气旋强度的主要途径。科学文献证实,海表温度是决定气旋强度的重要变量,海表温度的小幅度上升会引起热带气旋强度的大幅增加。根据卡诺定理,热带气旋可以被看作是将热能转化为机械能的热机,海表温度越高,该系统热能转化为机械能的效率越高,气旋从海洋中获得的能量越大,驱动的风速越大(伊曼纽尔,1987),潜在破坏力也越强(伊曼纽尔,2005)。最新研究基于高分辨率全球气候模型进一步证实了全球气候变化对气旋强度的增强效应(伊曼纽尔,2021;彼得里科拉、韦纳,2018;索贝尔等,2016)。图3展示了第六阶段耦合气候模型CMIP6^⑤在高排放情景(SSP5-8.5)^⑥下对1850~2100年平均海温的预测结果。长期来看,全球平均海温上升速度

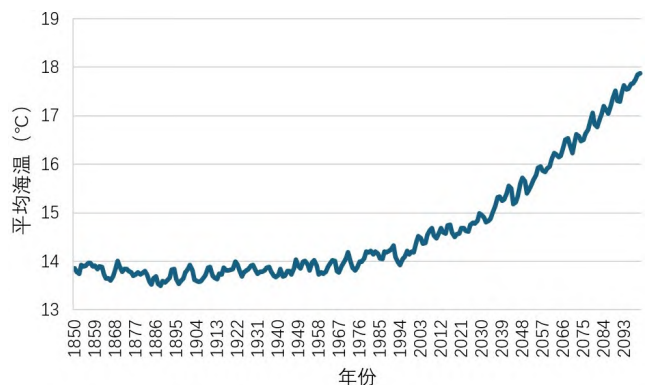


图3 全球平均海温预测

数据来源:第六阶段耦合气候模型CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)。

加快,未来全球变暖对气旋强度的影响将进一步提升。

鉴于此,有必要在全球气候变化的现实背景下,分析海运遭遇极端天气冲击对各国经济的长期影响,这对理解气候变化对国际贸易成本影响这一基本问题具有重要的意义。因而,本文基于科学文献对未来气旋强度变化的预测和第二部分式(2)的实证结果,进一步估算了中国和世界其他国家贸易成本的长期变化趋势。

首先,本文基于布卢门达尔等(2022)对过去(1980~2017年)和未来(2015~2050年)热带气旋活动的模拟结果,计算出高强度和低强度气旋时间占比的变化^⑧。具体地,他们分别采用历史数据和4种全球气候模型的预测数据模拟了过去(1980~2017年)和未来高排放情形下(2015~2050年)气旋的位置、风速、气压、半径等信息。本文基于该研究的模拟数据,分别对高强度气旋和低强度气旋的时间进行统计,表15展示了西太平洋(中国所在海域)和全球“过去情景”(1980~2017年)和“未来情景”(2015~2050年)下高、低强度气旋持续时间的占比。其中,未来情景是4种气候模型模拟结果的均值,4种气候模型的统计结果详见《管理世界》网络发行版附录C.2的表C4。同期来看,西太平洋高强度气旋时长占比高于全球平均水平;长期来看,西太平洋和高强度气旋的占比都将有明显提升,但西太平洋涨幅高于全球平均水平。

其次,本文计算出高强度气旋时间占比的年均涨幅,并扩展至2100年。基于过去情景和未来情景,可得西太平洋高强度气旋时长占比的年均涨幅为0.28%,全球高强度气旋时长占比的年均涨幅为0.20%。若年均涨幅保持不变,2100年西太平洋高强度气旋时长占比将达到37.44%,全球高强度气旋时长占比将达到27.59%。

最后,以高、低强度气旋时间占比作为权重,基于第二部分关于高强度和低强度气旋的回归结果,我们分别计算出中国和世界其他国家2040年、2060年、2080年、2100年气旋导致的贸易成本变化。具体计算方法如式(22)所示:

$$delay_{nt} = p_{nt}^I \times delay_{nt}^I + (1 - p_{nt}^I) \times delay_{nt}^W \quad (22)$$

其中, $n=\{CHN, ROW\}$ 代表地区, t 代表年份, I 代表高强度气旋(Intense), W 代表低强度气旋(Weak)。 $delay_{nt}$ 代表 n 地区 t 年的航程由于受到气旋影响导致的平均延误时间。 p_{nt}^I 和 $1-p_{nt}^I$ 分别代表 n 地区 t 年高强度气旋和低强度气旋的时间比例。 $delay_{nt}^I$ 和 $delay_{nt}^W$ 分别代表式(2)估计的高、低强度气旋导致 n 地区航程的平均延误时间。随全球温度上升,高强度气旋时间占比 p_{nt}^I 上升,加权航程平均延误时间 $delay_{nt}$ 上升,将 $delay_{nt}$ 代入式(5)和式(6)计算可得贸易成本的变化 $\hat{d}_{nt}$ 。

图4展示了中国和世界其他国家因气候变化下海运极端天气导致的贸易成本长期变化的计算结果。在高排放情景(SSP5-8.5)下,2040年、2060年、2080年和2100年热带气旋引起的极端天气冲击将分别使中国的贸易成本增加1.12%、1.21%、1.30%、1.39%,使其他主要经济体的贸易成本增加0.36%、0.38%、0.40%、0.43%。从贸易成本增加的速率来看,中国贸易成本增加的速率约为其他主要经济体的4倍,因此,气候变化下的极端天气冲击对中国跨国贸易的影响将持续高于世界平均水平。

基于上述分析,本文进一步估算出2040年、2060年、2080年和2100年行业层面贸易成本的变动,详见《管理世界》网络发行版附录C.2的图C1和图C2,并纳入第三部分提出的一般均衡模型,对中国和世界其他经济体的实际GDP变动进行预测。量化结果如表16所示。总体而言,随着全球气候变化的进一步加剧,

表15 过去和未来情景高低强度气旋时长占比

	过去情景(1980~2017年)		未来情景(2015~2050年)	
	西太平洋	全球	西太平洋	全球
高强度气旋	9.44%	7.29%	18.82%	14.09%
低强度气旋	90.56%	92.71%	81.18%	85.91%

数据来源:根据布卢门达尔等(2022)数据计算。

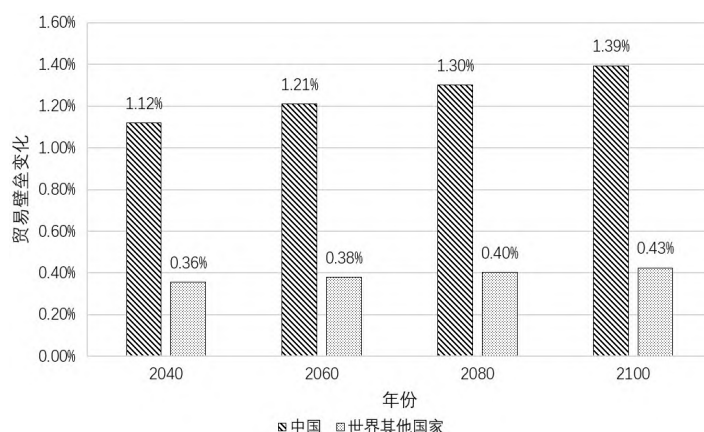


图4 中国和世界其他国家贸易成本长期变化

海运极端天气冲击对中国和世界其他国家实际 GDP 的负面影响将持续扩大。其中,中国实际 GDP 受到的负面影响加剧最快,从 2040 年的-0.10% 上升至 2100 年的-0.12%。海运极端天气冲击引起的其他经济体的 GDP 变动则相对稳定,从 2040 年的-0.06% 恶化至-0.07%。

值得注意的是,我们应当理性地分析长期情景与基准情景下的不同结果。首先,两者依托的数据来源与时间尺度截然不同。基准情景基于 2017 年实际观测到的气旋活动,反映的是特定年份气候条件下极端天气对经济活动的短期扰动;而长期情景则依托气候模型模拟的未来气旋数据,反应了全球变暖背景下气旋活动增强的演化趋势。其次,极端天气具有显著的年度波动性与不确定性,单一年份的极端天气事件可能偏离长期趋势,而长期模拟去除了短期波动,与极端天气的长期趋势保持一致。在长期视角下,极端天气的强度持续提升,这要求政策制定从事后响应转向前瞻性管理,着力构建常态化、系统化的风险应对框架。一方面,应将气候风险纳入基础设施建设、区域协同发展与供应链安全的核心决策中;另一方面,应加强技术赋能,推动气象预报、航运调度与应急机制的协同联动,全面提升运输系统和经济系统在气候变化背景下的适应能力与韧性。

表 16 极端天气冲击对中国和其他国家实际 GDP 的长期影响

年份	中国	其他国家
2040 年	-0.10%	-0.06%
2060 年	-0.11%	-0.06%
2080 年	-0.11%	-0.07%
2100 年	-0.12%	-0.07%

五、结论与启示

应对气候变化是未来人类社会面临的重大挑战。随着地球大气中温室气体的不断累积,全球气候变化加剧,极端天气事件的频率和强度显著上升,对经济生产和民众生活产生了深远影响。在实现碳达峰、碳中和与推动绿色发展的时代背景下,有必要将新经济地理学纳入分析框架,量化评估极端天气事件对经济的长期影响,为政策制定提供科学依据。

本文研究了海运遭遇的极端天气冲击对贸易成本的影响,并将极端天气冲击纳入包含投入产出关联的一般均衡框架,量化模拟了极端天气冲击对中国经济的影响,并对气候变化带来的长期影响进行了预测。研究表明,由于中国位于热带气旋高发的西太平洋海域,其受海运极端天气影响的概率显著高于其他国家。具体而言,中国海运航程遭遇极端天气导致的平均延误时长和贸易成本增量均显著高于全球平均水平。量化结果进一步表明,海运极端天气冲击使得中国实际 GDP 下降约 0.073%,明显高于世界其他地区的 0.055%。投入产出关联会放大极端天气冲击对 GDP 的负面影响。长期来看,中国周边海域的高强度气旋时间占比将进一步上升,到 2100 年预计将达到现有水平的 2 倍,从而使中国 GDP 受到的负面影响上升至当前的 1.68 倍,约为-0.12%。为增加研究结果的可信度,与以往相关研究仅依赖国家一年份贸易流量数据不同,本文基于实时、高频的船舶轨迹大数据,准确识别了航程,并采用盆地法和时空匹配法双重验证,准确捕捉了国际贸易海运运输过程中的绕行或等待行为而引起的航行时长变化^⑧,并将其转化为可量化的贸易成本。总体上,本研究首次揭示出中国在气候风险暴露和海运运输不确定性下面临的更大挑战。

结合主要发现和关键启示,本文提出如下政策建议。

第一,鉴于热带气旋导致的航程延误是系统性贸易成本的重要组成部分,为此,需尤为关注气候风险的外溢经济风险,并采取相应举措。一方面,对宏观决策而言,应将气候风险纳入宏观经济政策框架,开展审慎的影响评估,并制定相应的规划和产业引导政策。此外,相关部门还可考虑借助高频 AIS 数据联合多区域投入产出模型量化气候风险的经济影响,建立动态的“气候—贸易”大数据平台,以开展精准的政策仿真。另一方面,对微观的贸易企业而言,应从风险管理、物流配置、市场布局与金融保障等方面系统提升应对极端天气的能力。首先,应强化风险预期管理机制,基于气象数据,建立动态库存调节与弹性履约系统。结合《“十四五”对外贸易高质量发展规划》关于“柔性供应链”的政策导向^⑨,提升产运销协同效率,以增强应对突发气候事件的响应能力。其次,应提升运输路径与物流模式的多样性,构建具备弹性调节能力的运输网络。外贸企业可通过发展多式联运体系、拓展替代港口和跨境物流通道,增强运输系统的可替代性与灵活性,从而在极端天气干扰下保持物流链条的连续性,降低运输延误或中断带来的风险。再次,应强化与国内国际双循环战略的联动,提升

产能与市场布局的动态调整能力。在外需波动或运输受限的背景下,企业应灵活配置资源,通过发展内外贸一体化经营模式,实现供给渠道与销售市场的有序切换,增强对外部冲击的市场适应性 with 配置效率。最后,应积极引入金融保险工具,构建多元主体参与的风险转移机制。外贸企业应参与气象指数保险、运输延误险等,同时联合港口、物流企业与保险机构建立责任共担机制,从而实现从事后补偿向事前防控的转型。

第二,鉴于气候风险的分布高度不均衡,中国因地理区位和高度依赖海运的贸易结构,承受了远高于全球平均水平的热带气旋暴露风险,因而,应强化海运基础设施韧性建设。具体而言,首先,应加快气象服务体系的数字化转型,构建“监测精密、预报精准、服务精细”的智慧气象体系^⑤。政府应推动人工智能、大数据与高分辨率数值预报技术的深度融合,开发覆盖不同海域、航线和灾种的个性化气象服务产品,提升极端天气的识别能力与航运调度的决策效率。在此基础上,着力打造全国统一、部门协同、开放共享的气象信息支撑系统,提高预警精度、优化运力与应急资源的动态调配速度,提升整个海运系统的协同响应能力。其次,建立极端天气应急响应机制,特别是完善船岸协同响应机制。船舶企业应建立与港口管理部门之间的常态化沟通机制,围绕极端天气情形下的预警接收、路径调整与靠泊调度,制定联合应急预案。通过提升信息共享水平和决策协同效率,可有效降低预警传导滞后和操作响应失灵等风险,增强突发气象事件下的应对能力。再次,加大对先进船舶及智能化设备的投资,提升极端天气条件下的航行安全性与风险应对能力。基于《气象高质量发展纲要(2022-2035年)》和国际海事组织技术规范,船舶企业应进一步明确对船体结构和船舶性能的要求,引导造船业提升制造标准,推动高精度气象监测设备与船载系统的标准化集成,强化前端预警与路径规避系统在船舶上的一体化应用,促进船舶制造业的高质量发展与现代化转型。最后,还应基于未来气候变化冲击的情景,提前规划基础设施的更新,提高港口海拔标准、防波堤强度等。

第三,由于气候冲击具有长期复合性,加速低碳转型与全球气候治理协作是长期、系统、根本的应对策略。首先,应支持绿色航运技术研发和相关举措,降低行业排放以减缓气旋强度加剧趋势。航运业作为全球温室气体排放的重要来源之一,已被纳入国际气候治理框架。例如,欧盟碳市场已经将航运业纳入规制范围,国际海事组织也制定了逐步强化的温室气体减排战略。中国应加快构建覆盖能源、交通、工业等重点领域的碳排放监测与管控体系,并推动与国际碳市场规则的衔接。其次,通过国际航运、联合国贸易和发展等组织推动建立全球航运气候适应标准,要求关键航道沿线国加强韧性建设,避免“气候风险转嫁”。最后,加快全球碳减排,推动清洁燃料及绿色技术的研发及推广应用,通过减排减缓气候变化趋势,从根本上降低未来全球贸易面临的系统性冲击^⑥。

(作者单位:王欢欢,华东师范大学经济与管理学院、华东师范大学法学院;郭策,复旦大学经济学院;倪童,新加坡管理大学经济学院)

注释

①联合国教育、科学及文化组织, <https://www.unesco.org/zh/climate-change>。

②正如《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出的,要“加强全球气候变暖对我国承受力脆弱地区影响的观测和评估,提升城乡建设、农业生产、基础设施适应气候变化能力”(https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)。

③2024联合国贸易和发展会议, https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d32_ch.pdf。

④<https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024>

⑤http://paper.people.com.cn/hwbwap/html/2024-07/09/content_26068149.htm

⑥从热带气旋发生的频率来看,中国地处西太平洋和北印度洋交界处,周围海域全年发生气旋总数高达全球全年气旋总数的约40%。从热带气旋发生的强度来看,全球高强度气旋时间占比不断提升,气旋快速增强率和降雨率也显著增加(巴蒂亚等,2019,2022;古斯曼、蒋,2021)。

⑦中国十大贸易伙伴包括美国、日本、韩国、德国、澳大利亚、越南、马来西亚、巴西、印度和俄罗斯,虽然不同年份贸易量排序有差异,但中国前十大贸易伙伴的组成相对稳定。

⑧已有文献重点讨论了关税政策(丁浩员等,2024)、反倾销政策(王孝松等,2020)、产业链风险(倪红福等,2024)与贸易不确定性(刘洪愧,2022)等对于国际贸易和中国经济的影响,而缺乏对于极端天气冲击的关注。尽管厘清极端天气与跨国贸易之间的关系具有重要的经济学意义,受限于微观层面航运数据的可获性与精细度,既有文献对此问题的实证探索较少。原因在于,传统贸易数据集(如海关记录等)通常仅涵盖贸易数额、商品类别与运输模式等信息,缺乏精细的时空维度数据,难以支撑对具体航运路径动态、航

程时间波动等微观层面影响机制的识别与分析。

近来,船舶自动识别系统(AIS, Automatic Identification System)数据的出现为克服已有研究障碍提供了可能。船舶自动识别系统通过高频次、高精度的船舶动态监测,完整记录了全球船舶的实时位置、航速、航向等信息。然而,由于大数据清洗、空间匹配、航程信息与贸易数据的整合等技术挑战,既有文献中涉及微观航运与贸易领域的研究并不多见。

⑨埃利奥特等(2015)基于夜间灯光数据发现台风对中国沿海经济活动有显著的负面影响。埃利奥特等(2019)研究了台风对中国沿海制造业的冲击,发现台风会降低企业的营业额、利润和生产率,并显著增加企业负债。

⑩卫星信号受到干扰可能导致数据中的船舶位置 and 实际船舶位置存在严重不符,即为“非点”。“非点”的存在会干扰航程识别,因此对每条船的任意位置点 Z (纬度为 x ,经度为 y),本文采用半正矢公式分别计算出 Z 与其前1小时位置点 Z_{-1} 和后1小时位置点 Z_1 之间的距离:

$$m_i = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{x - x_i}{2} \right) + \cos x \cos x_i \sin^2 \left(\frac{y - y_i}{2} \right)} \right)$$

其中, i 等于1或-1, x_i, y_i 代表位置点 Z_i 的纬度和经度, R 代表地球半径。若求得 m_1 和 m_{-1} 均大于船舶单位小时最大航行距离(严格起见此处取100km),则判定 Z 点是“非点”,从数据中删除。

⑪当某一位置点匹配到多个港口时,仅保留距离最近的港口作为匹配港口。

⑫<https://www.msa.gov.cn/page/article.do?articleId=53C0B663-CD7E-46DD-9D52-EC091B32ACA5>

⑬考虑到“盆地法”的识别结果可能不够精确,在实证设计与实证结果进一步讨论中,本文采用了更为精确的“时空匹配法”对航程是否受到气旋影响进行了识别。总体而言,“时空匹配法”的结果与“盆地法”的结果保持一致。

⑭<https://www.sea-intelligence.com/press-room/307-2024-schedule-reliability-largely-within-50-55>

⑮<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

⑯航程出发时间用季度表示。一年分为4个季度:1~3月为第一季度;4~6月为第二季度;7~9月为第三季度;10~12月为第四季度。

⑰“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。

⑱船舶类型包括干散货、集装箱、渔船和油轮。

⑲参照萨菲尔-辛普森飓风风力等级,三级(1分钟持续风速达到50m/s)及以上的热带气旋属于“强飓风”,因此,本文以50m/s为界将气旋划分为“高强度气旋”和“低强度气旋”。

⑳该处理的目的在于避免共线性问题,也更符合现实。考虑到船舶面对低强度气旋时具备一定的承受能力,高强度气旋才是对航程造成严重影响的来源。本文认为在航程同时受到“高强度气旋”和“低强度气旋”影响时,高强度气旋的影响占主导。《管理世界》网络发行版附录A.3稳健性检验中也展示了基于“是否受到高强度气旋影响”和“是否受到低强度气旋影响”划分的回归结果,与当前结果保持一致。

㉑在《管理世界》网络发行版附录A.2回归系数解释部分,本文为上述解释提供了相应的证据支撑。

㉒AIS数据仅覆盖船舶实际航行的轨迹,无法看到船舶层面是否延迟出港的决策数据,因此本文基于单日盆地层面的航程出发总数对延迟出港现象进行检验。

㉓“盆地法”是基于气旋活跃海域(海洋盆地)内,气旋的存续时间和同海域(海洋盆地)航程的运行时间是否存在交集,来判定航程是否受到气旋影响的方法,具体讨论详见第二部分典型事实、数据介绍与实证设计的“气旋匹配与典型事实”部分。在基准结果中,本文采用了“盆地法”对航程是否受到气旋影响进行了识别,在本部分进一步采用“时空匹配法”作为稳健性检验。

㉔在《管理世界》网络发行版附录C.1的表C1中,我们展示了基于“时空匹配法”计算的极端天气导致的贸易成本变化。“时空匹配法”下,极端天气导致中国的贸易成本上升0.45%,世界其他国家上升0.15%,中国约为世界其他国家的3倍,与基准结果保持一致。

㉕由于数据中中国港口数量较多,共68个,分别对每个港口估计气旋导致的时间延误会出现样本过少无法估计或估计不准确的情况。为避免上述问题,我们根据港口所属省份将经由同一省份港口的航程归为一组,对每组分别进行估计。囿于数据限制,我们并未考虑我国香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省的港口。

㉖由于极端天气会显著增加海洋运输的整体航程用时,贸易成本 d_{it} 的变化直接衡量了热带气旋对于 i 地区到 n 地区 s 行业国际贸易的冲击影响。

㉗考虑到关税等其他数据的可得性,此处将卢森堡和比利时合并为一个经济体,将中国台湾省单列。

㉘14个贸易行业包括农林牧副渔业,采矿业,食品及烟草制造业,纺织业,木材加工及家具制造,造纸印刷及记录媒介物的印刷及复制业,焦炭和精炼石油产品制造业,化学品及药品,非金属矿物制品业,金属制品,计算机、电子产品和光学产品制造,电力设备制造,未另分类的机械和设备制造,交通运输设备制造业;8个服务行业包括电、煤气、蒸汽和空调供应,建筑业及房地产,批发与零售业,交通运输、仓储和邮政业,住宿和餐饮业,信息与通讯业,金融与保险,其他服务行业。

㉙在《管理世界》网络发行版附录C.1的表C2中,我们同时汇报了基于“时空匹配法”,极端天气冲击对中国和世界其他国家的GDP影响的量化模拟。量化结果与“盆地法”下的结果保持一致。

㉚第六次耦合模式比较计划(CMIP6, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)是一个全球性的气候科学研究项目。该项目由世界气候研究计划(WCRP, World Climate Research Programme)的气候模拟与诊断计划(WGCM, Working Group on Coupled Modeling)组织、协调和开发。其主要目标是通过多种气候模型的对比研究,深入探讨气候系统的复杂性及其对自然和人为强迫的响应。CMIP6提供了标准化的实验框架和数据共享平台,被广泛用于气候系统模拟研究,为理解历史气候变化、预测未来气候趋势和全球气候政策制定提供科学依据。

㉛共享社会经济路径(SSP, Shared Socio-economic Pathway)是一个社会经济路径的叙述性框架,最早于2010年联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告中提出,描述了未来社会经济发展可能的多种情况。目前SSP主要包含5种情景(SSP1~SSP5),对应

温室气体排放量从低到高。SSP5-8.5代表化石燃料主导的高速经济增长路径,是一种高排放情景,对应“2100年温室气体排放引起的全球平均辐射强迫值达到 8.5W/m^2 ”,即全球气温相较于工业化前水平上升超过 4°C 。

②现有研究发现,全球变暖会显著增加气旋强度和平均风速,但没有证据表明全球变暖会增加热带气旋的频率和时长。

③该发现与科学文献(张等,2024)保持一致,该文献以2019年热带气旋韦罗妮卡为例,研究了灾害条件下船舶运输延误的行为特征与影响机制,发现改道航行、失控漂移等是航运延误的主要来源。

④https://wms.mofcom.gov.cn/cms_files/oldfile/wms/202111/20211123170359494.pdf

⑤气象高质量发展纲要(2022—2035年),https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/19/content_5691116.htm。

⑥中外文人名(机构名)对照:克努森(Knutson);赫梅尔(Hummels);肖尔(Schaur);伊曼纽尔(Emanuel);刘(Liu);詹(Chan);巴蒂亚(Bhatia);古斯曼(Guzman);蒋(Jiang);德兰科夫(Djankov);伯德(Bird);塞尔斯(Soyres);亚历山德里亚(Alessandria);贝克尔斯(Bekkers);陈(Chen);张(Zhang);龚(Gong);布卢门达尔(Bloemendaal);索贝尔(Sobel);宇津美(Utsumi);金(Kim);科辛(Kossin);斯塔德霍姆(Studholme);埃利奥特(Elliott);王(Wang);许(Xu);卡利恩多(Caliendo);帕罗(Parro);伊顿(Eaton);科图姆(Kortum);格雷(Gray);彼得里科拉(Patricola);韦纳(Wehner)。

参考文献

- (1)丁浩员、董文娟、余心珂:《贸易政策冲击下的跨国供应链断裂与重构研究》,《经济研究》,2024年第8期。
- (2)段玉婉、蔡龙飞、陈一文:《全球化背景下中国碳市场的减排和福利效应》,《经济研究》,2023年第7期。
- (3)樊海潮、丁关祖、张丽娜:《外部经贸冲击、国内要素流动与中国经济增长》,《经济研究》,2024年第7期。
- (4)樊海潮、张丽娜、丁关祖、彭方平:《关税与汇率变化对福利水平的影响——基于理论与量化分析的研究》,《管理世界》,2021年第7期。
- (5)纪珽、陆毅、段玉婉:《关税和境内税收协同视角下的国际贸易政策设计》,《管理世界》,2025年第3期。
- (6)刘洪愧:《不确定冲击下中国企业出口能力研究》,《经济研究》,2022年第10期。
- (7)倪红福、钟道诚、范子杰:《中国产业链风险敞口的测度、结构及国际比较——基于生产链长度视角》,《管理世界》,2024年第4期。
- (8)王欢欢、樊海潮、陈诗一:《污染物总量控制与结构调整》,《经济学(季刊)》,2023年第4期。
- (9)王孝松、林发勤、李功:《企业生产率与贸易壁垒——来自中国企业遭遇反倾销的微观证据》,《管理世界》,2020年第9期。
- (10) Alessandria, G., Khan, S. Y., Khederlarian, A., Mix, C. and Ruhl, K. J., 2023, “The Aggregate Effects of Global and Local Supply Chain Disruptions: 2020–2022”, *Journal of International Economics*, vol.146, No.103788.
- (11) Bekkers, E., Francois, J. F. and Rojas-Romagosa, H., 2018, “Melting Ice Caps and the Economic Impact of Opening the Northern Sea Route”, *The Economic Journal*, vol.128(610), pp.1095–1127.
- (12) Bhatia, K., Baker, A., Yang, W., Vecchi, G., Knutson, T., Murakami, H., Kossin, J., Hodges, K., Dixon, K., Bronselaer, B. and Whitlock, C., 2022, “A Potential Explanation for the Global Increase in Tropical Cyclone Rapid Intensification”, *Nature Communications*, vol.13(1), pp.1–11.
- (13) Bhatia, K. T., Vecchi, G. A., Knutson, T. R., Murakami, H., Kossin, J., Dixon, K. W. and Whitlock, C. E., 2019, “Recent Increases in Tropical Cyclone Intensification Rates”, *Nature Communications*, vol.10(1), p.635.
- (14) Bird, J., Lebrand, M. and Venables, A. J., 2020, “The Belt and Road Initiative: Reshaping Economic Geography in Central Asia?”, *Journal of Development Economics*, vol.144, No.102441.
- (15) Bloemendaal, N., Moel, H. de, Martinez, A. B., Muis, S., Haigh, I. D., Wiel, K. van der, Haarsma, R. J., Ward, P. J., Roberts, M. J., Dullaart, J. C. M. and Aerts, J. C. J. H., 2022, “A Globally Consistent Local-Scale Assessment of Future Tropical Cyclone Risk”, *Science Advances*, vol.8(17), No.eabm8438.
- (16) Caliendo, L. and Parro, F., 2015, “Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA”, *The Review of Economic Studies*, vol.82(1), pp.1–44.
- (17) Chen, S., Chen, X. and Xu, J., 2016, “Impacts of Climate Change on Agriculture: Evidence from China”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.76, pp.105–124.
- (18) Chen, S. and Gong, B., 2021, “Response and Adaptation of Agriculture to Climate Change: Evidence from China”, *Journal of Development Economics*, vol.148, No.102557.
- (19) Djankov, S., Freund, C. and Pham, C. S., 2010, “Trading on Time”, *The Review of Economics and Statistics*, vol.92(1), pp.166–173.
- (20) Eaton, J. and Kortum, S., 2002, “Technology, Geography, and Trade”, *Econometrica*, vol.70(5), pp.1741–1779.
- (21) Elliott, R. J. R., Liu, Y., Strobl, E. and Tong, M., 2019, “Estimating the Direct and Indirect Impact of Typhoons on Plant Performance: Evidence from Chinese Manufacturers”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.98, No.102252.
- (22) Elliott, R. J. R., Strobl, E. and Sun, P., 2015, “The Local Impact of Typhoons on Economic Activity in China: A View from Outer Space”, *Journal of Urban Economics*, vol.88, pp.50–66.
- (23) Emanuel, K., 2005, “Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones over the Past 30 Years”, *Nature*, vol.436(7051), pp.686–688.
- (24) Emanuel, K., 2021, “Response of Global Tropical Cyclone Activity to Increasing CO₂: Results from Downscaling CMIP6 Models”, *Journal of Climate*, vol.34(1), pp.57–70.
- (25) Emanuel, K. A., 1987, “The Dependence of Hurricane Intensity on Climate”, *Nature*, vol.326(6112), pp.483–485.
- (26) Gray, W. M., 1968, “Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms”, *Monthly Weather Review*, vol.96(10), pp.669–700.

- (27)Guzman, O. and Jiang, H., 2021, "Global Increase in Tropical Cyclone Rain Rate", *Nature Communications*, vol.12(1), No.5344.
- (28)Hummels, D., 2007, "Transportation Costs and International Trade in the Second Era of Globalization", *Journal of Economic Perspectives*, vol.21(3), pp.131~154.
- (29)Hummels, D. L. and Schaur, G., 2013, "Time as a Trade Barrier", *American Economic Review*, vol.103(7), pp.2935~2959.
- (30)Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., Emanuel, K., Ho, C. H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K. and Wu, L., 2020, "Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.101(3), pp.E303~E322.
- (31)Kossin, J. P., Emanuel, K. A. and Vecchi, G. A., 2014, "The Poleward Migration of the Location of Tropical Cyclone Maximum Intensity", *Nature*, vol.509(7500), pp.349~352.
- (32)Liu, K. S. and Chan, J. C. L., 2022, "Growing Threat of Rapidly-Intensifying Tropical Cyclones in East Asia", *Advances in Atmospheric Sciences*, vol.39(2), pp.222~234.
- (33)Patricola, C. M. and Wehner, M. F., 2018, "Anthropogenic Influences on Major Tropical Cyclone Events", *Nature*, vol.563(7731), pp.339~346.
- (34)Sobel, A. H., Camargo, S. J., Hall, T. M., Lee, C. Y., Tippett, M. K. and Wing, A. A., 2016, "Human Influence on Tropical Cyclone Intensity", *Science*, vol.353(6296), pp.242~246.
- (35)Soyres, F. de, Mulabdic, A. and Ruta, M., 2020, "Common Transport Infrastructure: A Quantitative Model and Estimates from the Belt and Road Initiative", *Journal of Development Economics*, vol.143, No.102415.
- (36)Studholme, J., Fedorov, A. V., Gulev, S. K., Emanuel, K. and Hodges, K., 2022, "Poleward Expansion of Tropical Cyclone Latitudes in Warming Climates", *Nature Geoscience*, vol.15(1), pp.14~28.
- (37)Utsumi, N. and Kim, H., 2022, "Observed Influence of Anthropogenic Climate Change on Tropical Cyclone Heavy Rainfall", *Nature Climate Change*, vol.12(5), pp.436~440.
- (38)Wang, X. T., Liu, H., Lv, Z. F., Deng, F. Y., Xu, H. L., Qi, L. J., Shi, M. S., Zhao, J. C., Zheng, S. X., Man, H. Y. and He, K. B., 2021, "Trade-Linked Shipping CO₂ Emissions", *Nature Climate Change*, vol.11(11), pp.945~951.
- (39)Xu, Z., Guo, J., Zhang, G., Ye, Y., Zhao, H. and Chen, H., 2024, "Global Tropical Cyclone Size and Intensity Reconstruction Dataset for 1959~2022 Based on IBTrACS and ERA5 Data", *Earth System Science Data Discussions*, vol.16(12), pp.5753~5766.
- (40)Zhang, C., Zhao, P., Huang, Z., He, Z., Niu, Y., Huang, G. and Chen, Y., 2024, "Assessing Vessel Transportation Delays Affected by Tropical Cyclones Using AIS Data and a Bayesian Network: A Case Study of Veronica in Northwestern Australia", *Ocean Engineering*, vol.308, No.118385.
- (41)Zhang, P., Deschenes, O., Meng, K. and Zhang, J., 2018, "Temperature Effects on Productivity and Factor Reallocation: Evidence from a Half Million Chinese Manufacturing Plants", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.88, pp.1~17.

Climate Change, Trade Cost, and Economic Growth: A Quantitative Estimation Based on International Shipping Data

Wang Huanhuan^{a,b}, Guo Ce^c and Ni Tong^d

(a. School of Economics and Management, East China Normal University; b. East China Normal University Law School;
c. School of Economics, Fudan University; d. School of Economics, Singapore Management University)

Abstract: Against the background of ongoing climate change, this study uses high-frequency global shipping data to identify maritime voyages and assess the impact of climate-related extreme weather on trade cost. The empirical findings reveal that China's maritime voyages face a higher risk of extreme weather than those of other countries, resulting in longer average delays and a 0.86% increase in trade costs. Furthermore, this research integrates maritime extreme weather shocks and input-output linkage into a multi-region, multi-sector general equilibrium framework to quantitatively evaluate the impact of extreme weather on China's economy. The quantitative results demonstrate that the adverse impact of maritime extreme weather on China's GDP is approximately -0.07%, 1.32 times larger than the corresponding impact on other countries while input-output linkages amplify the negative effects on GDP. Finally, the long term effects analysis shows that, as climate change intensifies, the frequency of China's exposure to intense tropical cyclones is projected to rise, further amplifying the trade costs disparity between china and other coastal countries. By 2100, the negative impact on China's economy is projected to increase to 1.68 times the current level, equivalent to a GDP loss of 0.12%.

Keywords: climate change; extreme weather; maritime transport; trade cost; input-output linkage

Climate Change, Trade Cost, and Economic Growth: A Quantitative Estimation Based on International Shipping Data

Wang Huanhuan^{a,b}, Guo Ce^c and Ni Tong^d

(a. School of Economics and Management, East China Normal University; b. East China Normal University Law School; c. School of Economics, Fudan University; d. School of Economics, Singapore Management University)

Summary: Climate change is one of the greatest challenges facing human society. Among the various extreme weather events triggered by climate change, among these, events affecting maritime shipping—such as tropical cyclones—are particularly representative for understanding the impact of climate change on socio-economic activities, especially international trade costs. Since maritime shipping accounts for more than 80% of global trade volume, extreme weather at sea can directly disrupt cross-border trade, producing global economic and trade chain reactions that other climate disasters can hardly match in scale.

Against the backdrop of climate change, this paper uses high-frequency global Automatic Identification System (AIS) data to identify maritime voyages and empirically estimate the extent to which voyages concerning different Chinese provincial ports are affected by maritime extreme weather. We then convert these measured voyage delays into changes in trade costs through a transformation model, and by taking into account the heterogeneity in port-level import and export structures, we calculate the corresponding trade cost variations at the industry level. These estimated shocks are subsequently incorporated into a multi-region, multi-sector general equilibrium trade model with detailed input-output linkages. Drawing on the World Input-Output Database and bilateral tariff data, we quantify the impact of maritime extreme weather on China's real GDP and project its long-run effects under climate change.

Our empirical findings reveal that China's maritime voyages face a higher risk of extreme weather than those of other countries, leading to longer average voyage delays and a more significant increase in trade cost, approximately 0.86%. The quantitative results demonstrate that the adverse impact of maritime extreme weather on China's GDP is approximately -0.07%, 1.32 times larger than the corresponding impact on other countries, while input-output linkages amplify the negative effects on GDP. Beyond these results, this paper further predicts and quantifies the long-run impact of climate change. In the long run, intensifying climate change will increase the share of time affected by intense tropical cyclones, widening the trade cost gap between China and the rest of the world. By 2100, the negative impact on China's economy is projected to increase to 1.68 times the current level, equivalent to a GDP loss of 0.12%.

By combining real-time vessel tracking data with methods such as basin-based and spatio-temporal matching, and by embedding the results in a general equilibrium trade model, the paper delivers a more precise quantification of the economic impacts of climate change on trade. Compared with existing literature, this study has three main contributions. First, in terms of research focus, it shifts the focus from the well-studied effects of extreme weather on production to its role in shaping trade, filling a key gap in the literature. Second, in methodological design, it incorporates the impact of extreme weather on maritime transport time into the trade cost dimension, quantifying its effects on trade costs for both China and other countries. Third, in terms of scope, it not only examines current impacts but also makes forward-looking projections of the long-term consequences under worsening extreme weather, thus adding an economic perspective to the existing scientific literature under intensified climate change.

The findings provide valuable insights for incorporating climate risks into macro-level policy frameworks and industrial planning, as well as for enhancing risk management and logistics configuration capabilities at the firm level. They also underscore the importance of strengthening the resilience of maritime infrastructure in the future.

Keywords: climate change; extreme weather; maritime transport; trade cost; input-output linkage

JEL Classification: F18, Q54

附录 A 实证部分补充
A.1 分省份回归

表 A1 热带气旋对不同省(直辖市)航程时间的影响

	被解释变量:航程时间										
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	福建省	广东省	广西壮族自治区	海南省	河北省	江苏省	辽宁省	山东省	上海市	天津市	浙江省
Panel A:不区分气旋强度											
<i>cyclone_affected</i>	13.03*** (3.78)	9.09** (4.11)	42.51*** (16.12)	67.15** (28.84)	4.27 (3.18)	21.44*** (3.04)	14.89*** (3.56)	6.30*** (2.02)	8.10*** (1.56)	5.80*** (2.22)	8.14*** (1.83)
观测值	2228	6458	1466	432	2404	8250	2929	8494	5714	3042	7377
调整 R ²	0.789	0.711	0.619	0.504	0.944	0.828	0.905	0.945	0.867	0.918	0.921
Panel B:区分气旋强度											
<i>cyclone_affected_intense</i>	38.91** (15.78)	29.27* (15.70)	117.38** (55.59)	158.95* (83.15)	15.71*** (5.12)	52.32*** (7.02)	37.47*** (7.61)	21.40*** (3.38)	24.72*** (3.82)	30.17*** (8.40)	21.51*** (4.93)
<i>cyclone_affected_weak</i>	11.39*** (3.51)	7.93** (3.48)	38.33*** (13.90)	57.73** (26.91)	3.67 (3.19)	19.43*** (2.98)	13.59*** (3.52)	5.37*** (2.02)	7.21*** (1.54)	4.51** (2.21)	7.36*** (1.84)
观测值	2228	6458	1466	432	2404	8250	2929	8494	5714	3042	7377
调整 R ²	0.791	0.712	0.629	0.518	0.944	0.830	0.907	0.945	0.868	0.920	0.921
Panel A and B											
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
船舶类型固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
出发—到达港口对固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
出发港口—季节固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
到达港口—季节固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10%的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。Panel A 和 B 的被解释变量为航程时间,Panel A 展示了遭遇气旋对航程时间的平均影响,Panel B 展示了高强度气旋和低强度气旋对航程时间的差异化影响。所有回归中均控制了船舶和船舶公司层面的控制变量(包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”)、船舶类型固定效应、出发—到达港口对固定效应、出发港口季节固定效应、到达港口季节固定效。

A.2 回归系数解释

在回归模型中,本文已控制了是否遭遇气旋的虚拟变量及基于强度等级的分类变量。因此,中国延误效应更大的结果不能简单归因于气旋暴露频率或强度差异,这一现象更可能反映出其他结构性特征方面的差异。具体而言,本文从以下两个方面对该结果进行了补充解释。

第一,中国周边海域航程密度更高,避让空间受限,同等强度的气旋干扰范围更广。根据我们对全球航程分布的统计,中国在全球范围内的跨国航程数量最多,亚太地区海域船舶活动频繁、航线密度较高,一旦发生气旋,更容易同时影响多条航线,从而造成更显著的航程延误效应。这一现象可以类比公路上的交通状况,例如,在车流密度较大的路段(如城市主干道),因为车辆密集、可替代路径少,即便是一场中等强度的降雨也更容易引发严重拥堵和延误;而在车流量较小的区域,同等强度的降雨虽仍构成干扰,但造成的延误相对较轻。

基于 AIS 数据,本文统计了 2017 年全球航程数量排名前 20 的国家,如表 A2 所示。在全球 449213 个跨国航程中,中国占比 16.93%,排名第一,新加坡和日本分别占比 11.79%和 7.86%,位列第二和第三。航程数量排名前 20 的国家中,位于西太平洋沿岸(中国附近海域)的国家有 7 个,涵盖的航程占全球总量的 35%。这一结果在一定程度上反映出中国及其周边海域航线密集、船舶活动频繁的情况。因此,在这样的区域结构下,即便是相同强度的气旋,也可能因航线集中、避让空间有限而造成更大范围的干扰,从而能够一定程度上解释中国航程受气旋影响更大的现象。

表 A2 2017 年全球航程数量排名前 20 的国家及其航程占比

排名	国家	航程数	比例	排名	国家	航程数	比例
1	中国	76031	16.93%	11	西班牙	24755	5.51%
2	新加坡	52977	11.79%	12	马来西亚	23280	5.18%
3	日本	35305	7.86%	13	印度尼西亚	21117	4.70%
4	土耳其	34564	7.69%	14	埃及	19927	4.44%
5	俄罗斯	31785	7.08%	15	阿联酋	19608	4.36%
6	荷兰	30451	6.78%	16	澳大利亚	18124	4.03%
7	美国	29872	6.65%	17	印度	14743	3.28%
8	韩国	27274	6.07%	18	比利时	14228	3.17%
9	德国	26923	5.99%	19	法国	14100	3.14%
10	英国	26327	5.86%	20	乌克兰	13586	3.02%

第二,同为受到气旋影响的航程中,中国航程受到气旋影响的时间占比更长。本文在回归中控制的虚拟变量仅代表“航程是否受到气旋影响”,而没有体现航程受到气旋影响时间的差异。换言之,虽然受到影响的航程 *cyclone_affected_{it}* 都取 1,但实际上这个“1”代

表的含义不同,对中国而言,这个“1”对应着更大的受到气旋影响的时间占比,因此中国航程的回归系数更大。

本文分别统计了“盆地法”和“时空匹配法”下中国和世界其他国家的航程受到气旋影响时间占航程总时间的比例,如表 A3 所示。总体而言,无论采用哪种识别方法,中国航程受到气旋影响的时间占比均高于世界其他国家。具体地,“盆地法”下,中国航程受到气旋影响的时间占航程总时间的 34.45%,而世界其他国家受到气旋影响的时间占航程总时间的 23.90%;“时空匹配法”下,中国航程受到气旋影响的时间占航程总时间的 4.35%,而世界其他国家受到气旋影响的时间占航程总时间的 1.80%。

综上所述,在 $cyclone\ affected_n$ 同为 1 的情况下,由于中国航程受到气旋影响的时间更长,从而在回归中体现出更大的处理效应,这也可以在一定程度上解释中国样本中的回归系数更大的原因。

表 A3 不同方法下中国与世界其他国家航程受到气旋影响的时间占比

	盆地法	时空匹配法
中国	34.45%	4.35%
世界其他国家	23.90%	1.80%

A.3 稳健性检验

对于“航程是否受到高强度或低强度气旋影响”的定义是,如果该航程受到高强度气旋影响,则 $cyclone\ affected\ intense_n$ 取 1,如果该航程受到低强度气旋影响,则 $cyclone\ affected\ weak_n$ 取 1。该定义下的回归结果如表 A4 所示,无论是高强度还是低强度气旋,中国航程受到的影响均高于世界其他国家,与正文结果保持一致。

表 A4 热带气旋对航程用时的影响

变量	(1)	(2)
	中国	世界其他国家
$cyclone_affected_intense$	23.92*** (2.43)	11.63*** (0.72)
$cyclone_affected_weak$	10.97*** (1.01)	5.51*** (0.29)
观测值	51174	335772
调整 R ²	0.876	0.916
控制变量	是	是
船舶类型固定效应	是	是
出发—到达港口对固定效应	是	是
出发港口—季节固定效应	是	是
到达港口—季节固定效应	是	是
经验 P 值	0.000***	

注:***、**、*分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平。括号中为聚类到航线层面的标准误。控制变量包括“船舶载重”和“船舶企业规模”,其中“船舶企业规模”的定义是“船舶企业管理船舶的总数”。组间系数差异的经验 P 值均采用费舍尔组合检验自体抽样 (bootstrap) 100 次后得到。

附录 B 模型部分补充

正文 (15) 式~(20) 式可进一步写为 6 组未知数 $(P_n^s, w_n^s, Y_n^s, X_n^s, X_{in}^s, c_n^s)$ 组成的帽子算法系统^①:

$$\widehat{P}_n^s = \left[\sum_{i=1}^N \lambda_{in}^s \left[\widehat{d}_{in}^s c_i^s \right]^{\theta_i} \right]^{\frac{1}{\theta_i}} \tag{B-1}$$

$$\widehat{c}_n^s = \widehat{w}_n^{B_n^s} \left(\prod_{j=1}^S \widehat{P}_n^{j_s} \right)^{1-B_n^s} \tag{B-2}$$

$$\widehat{X}_{in}^s = \frac{\left[\widehat{d}_{in}^s c_i^s \right]^{\theta_i}}{\sum_{i=1}^N \lambda_{in}^s \left[\widehat{d}_{in}^s c_i^s \right]^{\theta_i}} \widehat{X}_n^s \tag{B-3}$$

$$\widehat{Y}_i^s = \sum_{n=1}^N \xi_{in}^s \widehat{X}_{in}^s \tag{B-4}$$

$$\widehat{X}_n^s = \eta_n^s \left(\frac{w_n L_n}{X_n^s} \widehat{w}_n + \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S t_{in}^s \frac{X_{in}^s}{X_n^s} \widehat{X}_{in}^s \right) + \sum_{s'=1}^S (1-\beta_n^s) \gamma_n^{s'} \frac{Y_n^{s'}}{X_n^s} \widehat{Y}_n^{s'} \tag{B-5}$$

$$\widehat{w}_n = \sum_{s=1}^S \mu_n^s \widehat{Y}_n^s \tag{B-6}$$

其中, $\lambda_{in}^s = \frac{\tau_{in}^s X_{in}^s}{\sum_{i=1}^N \tau_{in}^s X_{in}^s}$; $\xi_{in}^s = \frac{X_{in}^s}{\sum_{n=1}^N X_{in}^s}$; $\mu_n^s = \frac{\beta_n^s Y_n^s}{\sum_{s=1}^S \beta_n^s Y_n^s}$

附录C 量化结果补充
C.1 基准情形补充

表 C1 中国与世界其他国家面临的贸易成本变化(时空匹配法)

	时空匹配法
中国	0.45%
世界其他国家	0.15%

表 C2 极端天气冲击对中国和世界其他国家实际 GDP 的影响(时空匹配法)

	(1)	(2)	(3)
	中国		其他国家
	无中间品投入	有中间品投入	
GDP	-0.010%	-0.040%	-0.025%

注:表中汇报了基于“时空匹配法”,极端天气冲击对中国和世界其他国家实际 GDP 的影响。总体而言,极端天气对中国 GDP 的负面影响大于世界其他国家,投入产出关联会放大极端天气冲击对 GDP 的负面影响。

表 C3 极端天气冲击对实际 GDP 的影响:行业分解

	无中间品		有中间品	
	中国	其他国家	中国	其他国家
经济体				
农林牧副渔业	0.01%	-0.03%	-0.08%	-0.04%
采矿业	0.43%	-0.05%	0.48%	-0.20%
食品及烟草制造业	0.00%	-0.03%	-0.07%	-0.06%
纺织业	-0.31%	0.24%	-0.48%	0.22%
木材加工及家具制造	-0.55%	0.10%	-0.33%	0.03%
造纸印刷及记录媒介的印刷及复制业	-0.17%	0.00%	-0.06%	-0.06%
焦炭和精炼石油产品制造业	-0.01%	-0.02%	-0.01%	-0.11%
化学品及药品	-0.13%	0.01%	-0.05%	-0.18%
非金属矿物制品业	-0.28%	0.04%	-0.15%	-0.02%
金属制品	-0.05%	-0.01%	-0.11%	-0.04%
计算机、电子产品和光学产品制造	-0.57%	0.33%	-0.87%	0.36%
电力设备制造	-0.05%	0.03%	-0.30%	0.09%
未另分类的机械和设备制造	0.11%	-0.14%	-0.04%	-0.10%
交通运输设备制造	0.08%	-0.11%	-0.01%	-0.11%
电、煤气、蒸汽和空调供应	-0.01%	-0.02%	-0.02%	-0.04%
建筑业及房地产	-0.02%	-0.02%	-0.07%	-0.06%
批发与零售业	0.04%	-0.03%	-0.06%	-0.05%
交通运输、仓储和邮政业	0.06%	-0.03%	-0.03%	-0.05%
住宿和餐饮业	0.01%	-0.03%	-0.05%	-0.06%
信息与通讯业	0.01%	-0.03%	-0.06%	-0.06%
金融与保险	-0.01%	-0.02%	-0.06%	-0.05%
其他服务行业	0.00%	-0.03%	-0.07%	-0.06%

注:表中汇报了极端天气冲击对实际 GDP 的影响在行业层面的分解。总体而言,极端天气冲击对中国行业 GDP 的影响大于世界其他国家。与基准情形分解类似,行业投入产出关联会进一步放大极端天气对行业实际 GDP 的冲击。

C.2 长期情形补充

表 C4 不同气候模型对未来高、低强度气旋时长占比的预测

	西太平洋				
	CMCC	CNRM	ECEARTH	HADGEM	均值
低强度气旋	83.82%	79.59%	82.55%	78.77%	81.18%
高强度气旋	16.18%	20.41%	17.45%	21.23%	18.82%
	全球				
	CMCC	CNRM	ECEARTH	HADGEM	均值
低强度气旋	88.02%	85.43%	86.43%	83.77%	85.91%
高强度气旋	11.98%	14.57%	13.57%	16.23%	14.09%

注:表中汇报了4种常用气候模型对未来高、低强度气旋时长占比的预测及其均值。4种气候模型分别为欧洲地中海气候变化中心气候模型(CMCC)、法国国家气象研究中心气候模型(CNRM)、欧洲共同体气候模型(ECEARTH)以及哈德利中心气候模型(HADGEM)。根据上述4种气候模型对未来气旋变化的预测结果(布卢门达尔等,2022)和萨菲尔-辛普森飓风风力等级定义,计算可得西太平洋和全球高强度气旋的时长占比。

数据来源:根据布卢门达尔等(2022)数据计算。

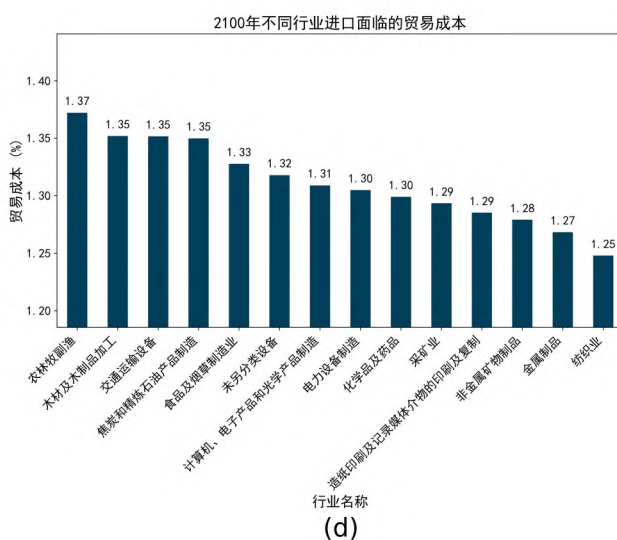
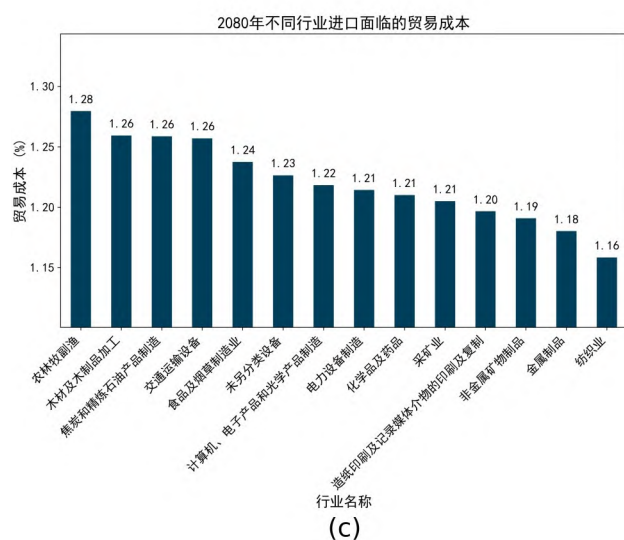
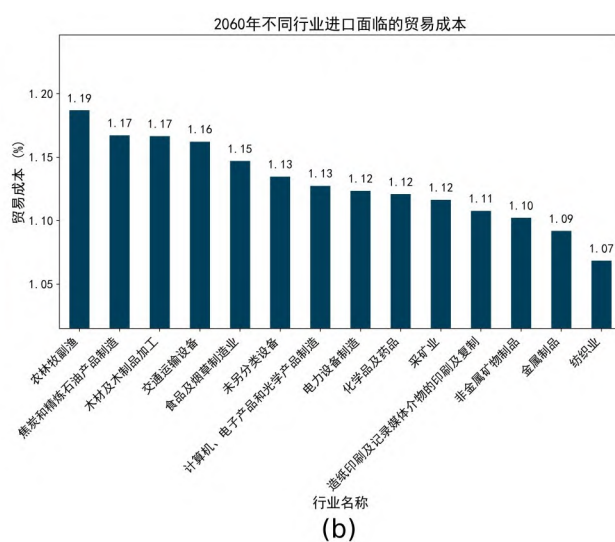
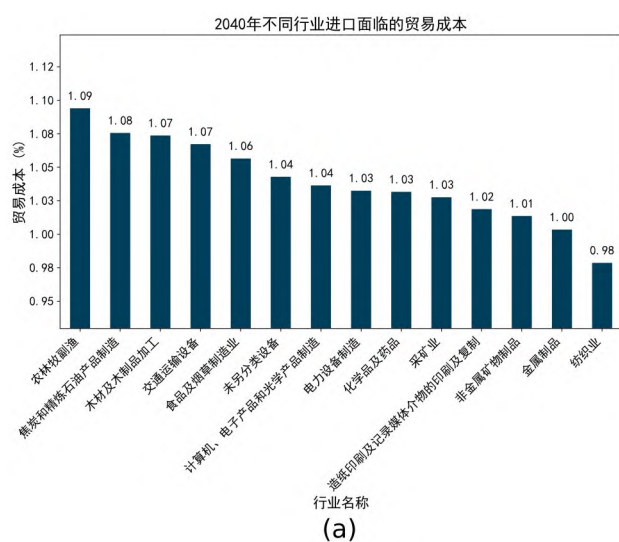


图 C1 中国不同行业进口面临的贸易成本的变化(2040~2100年)

注:图中a、b、c和d分别汇报了2040年、2060年、2080年、2100年行业面临的因极端天气导致的进口贸易成本变化。

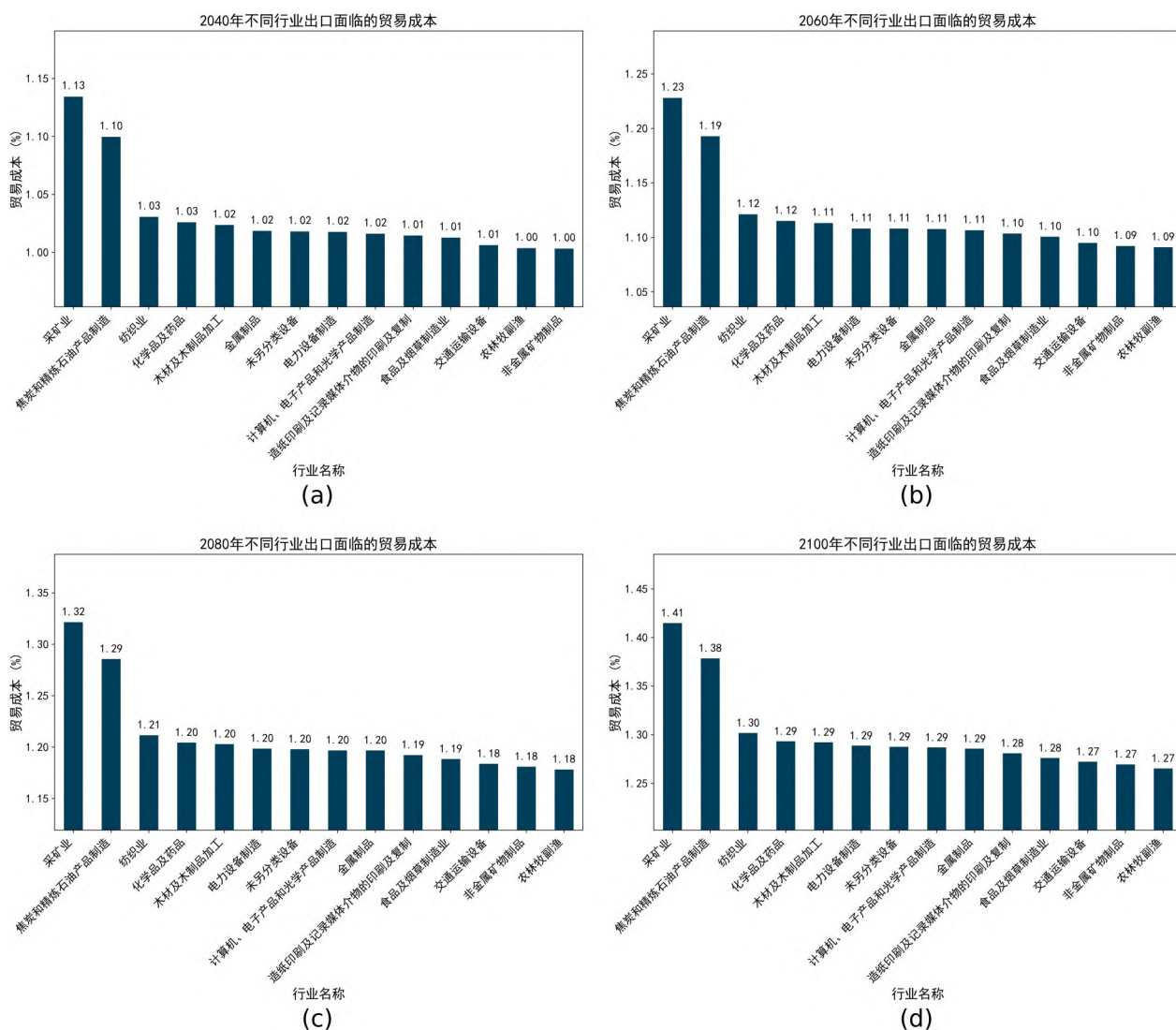


图 C2 中国不同行业出口面临的贸易成本的变化(2040~2100 年)

注:图中 a、b、c 和 d 分别汇报了 2040 年、2060 年、2080 年、2100 年行业面临的因极端天气导致的出口贸易成本变化。

注释

①中外文人名(机构名)对照:布卢门达尔(Bloemendaal)。

参考文献

(1) Bloemendaal, N., Moel, H. de, Martinez, A. B., Muis, S., Haigh, I. D., Wiel, K. van der, Haarsma, R. J., Ward, P. J., Roberts, M. J., Dullaart, J. C. M. and Aerts, J. C. J. H., 2022, "A Globally Consistent Local-Scale Assessment of Future Tropical Cyclone Risk", *Science Advances*, vol.8(17), p.eabm8438.