

脱碳化航空运输

准实验的洞见

梅格斯亚·亚贝特
亚历山德罗·巴拉
蒂埃里·阿尔贝托·
布鲁诺利·弗拉维
奥·波尔塔



WORLD BANK GROUP

东亚和大西洋地区首席经济学
家办公室 2025年8月

摘要

2023年中美直飞航班仅占2019年同期的7%。这项准实验为航空运输脱碳化辩论提供了信息。据估计的结构模型显示，恢复疫情前的直飞连通性可将旅客数量增加387%并使价格降低63%。此外，由于航班管制，二氧化碳排放

下降了80%。一项反事实模拟表明，通过维持新冠疫情前的连接性，并通过市场机制（即抵消）实现相同的减排量，将导致旅客数量增加（+365%）、价格降低（-60%）以及消费者剩余的减少幅度更低（-40%），这比后新冠疫情时期的均衡状态观察到的要高。

这份报告是东亚及太平洋地区首席经济学家办公室的产品。它是世界银行更大规模努力的一部分，旨在向公众开放其研究成果，并为全球发展政策讨论做出贡献。政策研究工作论文也发布在网站 <http://www.worldbank.org/prwp> 上。作者可通过 abarattieri@worldbank.org; mabate@worldbank.org 联系。

政策研究工作论文系列发布研究进展中的成果，以鼓励关于发展问题的思想交流。该系列的目的是快速发布研究成果，即使展示的论文尚未完全完善。论文署有作者姓名，并应相应引用。本文中表达的研究成果、解释和结论完全是作者的。它们不一定代表国际复兴开发银行/世界银行及其附属机构、世界银行的执行董事或他们所代表政府的观点。

脱碳化航空运输：
准实验的洞见

*

梅格萨·亚贝特¹
，亚历山德罗·巴拉蒂埃里²
，阿尔贝托·布鲁诺利³
，和弗拉维奥·波尔塔³

¹
世界银行
²
World Bank &ESGUQAM
³
贝加莫大学

JEL分类：F10，Q56，R41 关键词：航空运输，CO 排放，结构估计

^{*} Megersa Abate: mabate@worldbank.org; Alessandro Barattieri: abarattieri@worldbank.org; Alberto Brugnoli: alberto.brugnoli@unibg.it; Flavio Porta: flavio.porta@unibg.it。我们感谢 Jakub K astl, A aditya Mattoo, Gianmaria Martini, Salvatore Piccolo, Patrick Rey, Pasquale Schiraldi, 以及在卢森堡 SOAR 会议、利兹 ITEA 会议上的参会人员，⁷
th tonale举办的unibg io冬季研讨会以及香港理工大学、贝加莫大学、巴塞罗那自治大学和世界银行的研讨会参与者对实用评论和建议表示衷心感谢。这项工作并不反映世界银行的看法，也不反映其执行董事或他们所代表国家的看法。所有错误都是我们的。

1 引言

对温室气体 (GHG) 排放的日益关注使航空业成为全球气候讨论的焦点。尽管航空业目前约占全球碳排放的2.5%([里克奇, 2024](#)), 预测显示航空业到2050年可能构成全球排放量的约22% ([Cames等人, 2015](#))。行业致力于在本世纪中叶实现“碳中和”碳排放, 但脱碳之路仍存在高度争议, 政策制定者与行业利益相关者正在讨论各种干预措施的有效性、可行性和公平性。其中一端是基于市场的机制, 如 CORSIA (国际航空碳抵消与减排计划) 等排放抵消方案, 允许航空公司通过投资于其他地方减少碳排放的项目来补偿其排放。

¹ 在另一方面, 则有更严格的管理措施, 例如飞行禁令或空中交通限制, 这些措施通过限制高排放活动来针对排放。例如, 法国等国家已经引入了短途国内飞行的禁令, 当地存在高速铁路替代方案。最近的提议也旨在减少长途高排放飞行 (例如, [范米德和米尔尤马雷格 \(2023 \)](#)), 因为它们对碳排放的贡献显著更大。这些更严格的方法引发了关于经济中断、消费者福利以及获取航空旅行的公平性的担忧。在全球航空业努力与国际气候目标保持一致的过程中, 平衡这些相互竞争的优先事项为全球航空政策带来了重大挑战。在本文中, 我们利用最近 [准实验](#) 以及一个结构计量经济学模型。

图1报告了美国和中国与其他几个地区 (欧洲、撒哈拉以南非洲和中东) 之间直飞航班的座位动态: 在COVID-19全球性中断之后, 除了美国和中国之间, 世界各地都观察到直航运输连接的恢复。

解释这种模式的原因可能与供需因素都有关。俄罗斯关闭其领空以报复西方关闭西方领空供俄罗斯航空公司的制裁, 这也可能起作用。

² 这种做法并未适用于所有航空公司, 因此, 在通过直飞航班连接美国和中国时, 在成本和时间方面存在潜在的失衡。

³ 这些不对称性, 加上美国和中国之间缺乏“开放天空”协议

⁴ , 很可能是解释

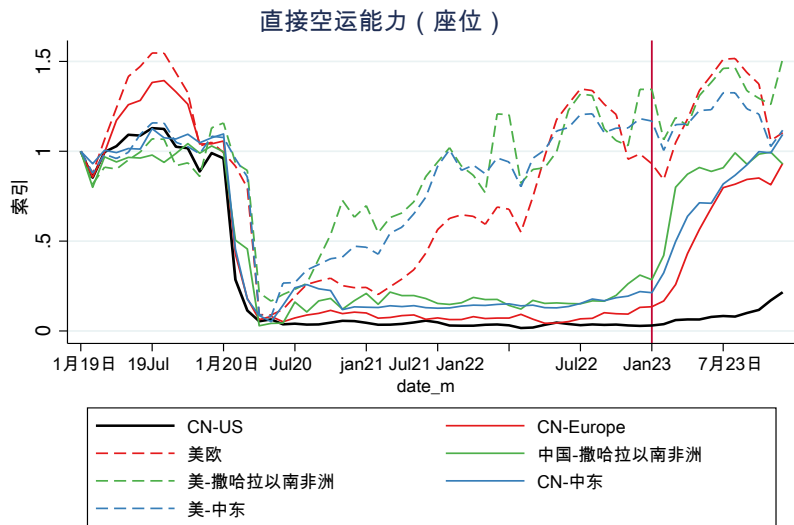
¹ 这些机制旨在平衡环境目标与行业的经济可行性, 但它们因对实际减排的有限影响和绿色漂白的潜在风险而受到批评。

² 见美国的情况下的通知令的通告 [DOT-OST-2018-0073-0012](#) 由交通部

³ 连接中国东部与美国东海岸的最短航线涉及飞越俄罗斯领空。 [文章](#) 来自 2023年3月17日《纽约时报》

⁴ 请查看美国在开放天空协定中的135个合作伙伴名单 [这里](#) .

图1：选定国家/地区的空中连通性



源：OAG时刻表分析器。

图1中呈现的模式。

表 1 展示了2023年第二季度和第三季度中美之间旅客总数的总人数为疫情前的83%。重要的是，在疫情之前，这两国之间约有半数旅客使用直飞航班。在后疫情时期，约有2/3的旅客使用中转航班，从而导致旅行时间更长（由于路线效率低下），从而，*ceteris paribus*，在更高人均CO₂排放

⁵

最后，表中所报的价格数据 1 显示显著

²

票价上涨，这为该事件主要是(主要是)供给冲击提供了证据。

在此论文中，我们首先针对中美市场开发了一个关于航空运输供需的结构模型，以估计两国之间直接连接全面恢复对旅客数量、价格以及人均排放的影响。该模型能够区分需求效应与供给效应，以及由全球冲击（例如燃油价格上涨）引起的供给效应和由影响特定中美航线特殊性冲击引起的供给效应。

其次，我们把这个事件作为一个 准实验 为告知关于航空脱碳的辩论。在观察到的后疫情均衡状态中，美中总排放

⁵

总数 CO₂ 排放量出乎意料地减少，因为它们取决于人均排放量和

²

总乘客数。

路线比新冠疫情前的均衡状态降低了80%。凭借我们的结构估计，我们可以计算一个反事实场景，其中通过市场机制（即“排放抵消”）实现了相同的总排放减少，同时不影响直飞航班的座位容量。然后，我们可以比较观测场景与反事实场景在乘客数量和价格方面的差异，并计算两个场景中消费者剩余的减少量。这使我们能够评估减少排放的不同替代工具的优劣。CO₂ 航空运输产生的排放：基于市场的脱碳政策，例如碳税（增加运营成本）和航班禁令（实施产能限制）。从这个意义上说，我们可以将这项分析视为对“税收与配额”辩论。

表1：中美乘客数量和经济舱票价

平均季度值		
新冠疫情阻止乘客	PAXP 帖 PAXP 价格*	价格价格价格
预全部 1,012,342 362		
发布全部 168,995 17%	1,285 355%	
预直接 589,234 355		
直接发布 52,647 9%	1,523 429%	
前1 422,890 373		
Post 1 115,625 27%	1,177 316%	
前 2 219 366		
帖子 2 723 330%	1,196 327%	
疫情前：2018 (Q1-Q2-Q3-Q4) 和2019 (Q1-Q2-Q3) 疫情后：2023 (Q2-Q3) *经济舱票价以美元计价，不含税费、手续费和燃油附加费		
来源：OAG交通分析器。		

我们分三步进行。首先，我们勾勒出一个简化的航空旅行模型。我们采用嵌套logit模型来模拟航空旅行的需求，同时考虑供给侧，其中包括竞争的航空公司。*à la* 在伯纳德，每个市场都有水平差异化产品。

其次，我们使用多种数据来源来估计所有（直接和间接）中美联系的需求和供给方程。该模型采用两阶段最小二乘法（2SLS）来处理价格 and 市场份额中的潜在内生性问题。所使用的工具变量包括不同联盟或航空公司的竞争产品数量、每座位燃油消耗量、直接航班竞争的虚拟变量。从观察到价格和估计的需求函数（我们从中推导出加价），我们可以计算与模型一致的边际成本估计值，然后将这些估计值与供给侧因素相关联，例如燃油成本，以及一个捕捉新冠疫情后座位数量变化的变量。

每条中美路线的周期（我们将其视为外生变量，并称为supply_change）。

6

最后，我们探讨两个反事实场景。首先，我们通过将变量设置为零来撤销供应量的减少 *供应 _ 改变*，并重新估计反事实均衡。其次，我们考虑一个场景，其中我们设计了一种减少总 *CO* 排放当量

2

与2020年至2023年间美国-中国航线观察到的情况相同，但使用价格机制（抵消）实现，同时将座位容量保持在COVID-19之前的水平。

我们发现以下主要结果。首先，我们对需求和供给时间表的估计似乎是合理的：我们估计需求弹性的平均值为-1.17，这在文献提供的范围之内。我们还发现对直接连接的偏好以及我们工具变量估计的第一阶段非常强烈。工具变量的系数（燃料成本、存在直接替代品和竞争产品的数量）都具有预期的符号，并且统计上非常显著。转向供给时间表的結果，根据直觉，我们发现该变量 *供应 _ 改变* 要为负且具有统计学上的显著性。

7

其次，我们发现重新建立中美之间的直接连通性，恢复到疫情前的水平，可以将两国之间的总旅客流量增加387%（相当于相对于COVID前平均水平的下降19%），并将价格降低63%，*CO* 每位乘客的排放量约

2

21%.

最后，在观察到限制航班数量的均衡状态下所实现的总量减排，也可以通过抵消来实现。使用每吨32美元的基准值，我们发现在这个反事实情景中，旅客数量比2023年后的观察均衡状态多350%，价格低60%。在航班取消政策下，消费者剩余的减少估计约为48亿美元，而抵消政策导致的消费者剩余损失较小，约为28亿美元，这两者均扣除了可能提高福利的环境外部性，但根据构造，这两种情景下该外部性是相同的。

这项分析得出的见解对于基于市场的机制（如碳税）与监管方法（如飞行禁令）之间在减少航空运输排放方面的权衡具有启发性。这些发现也与关于全球航空政策的更广泛讨论相关，特别是在巴黎协定等框架下实现国际气候目标方面（Klenert等人，2018年；Hepburn等人，2006年）。更广泛地说，该分析突出了贸易便利化（在我们的案例中是重新引入直飞航班）与减少排放之间的权衡，后者会增加需求，并指出价格机制比数量限制更有效地应对这种权衡。

6

我们模型隐含的边际成本对价格不敏感，类似于假设水平供给表。

7

供应 _ 改变 可以被视为供应曲线的一个垂直外生移位因素。

相关文献 本文关联到多领域文献。首先，本文与交通运输脱碳领域的文献相关。在环境政策背景下，碳税与飞行禁令之间的经济与环境权衡已被广泛研究。碳税旨在内部化排放的外部成本，为企业减少排放提供经济激励 ([Cramton \(2017 \)](#) ; [高尔德和谢恩 \(2013 \)](#) ; [鲍莫尔 \(1972 \)](#))。相比之下，航班禁令通过限制航班数量直接减少排放，但以潜在降低市场效率和连接性为代价 (参见 [阿伏伽德罗和雷东迪 \(2024 \)](#) , [Txapartegi 和 Galarraga \(2024 \)](#) , 和 [多布斯克和马修 \(2022 \)](#))。我们对这份文献的贡献是提供基于结构计量经济学模型和利用准实验的估计，即新冠疫情后美国-中国航空运输市场缓慢复苏。

其次，它建立在采用结构模型分析航空运输市场的研究基础上。特别是，我们的模型借鉴了产业组织 (IO) 中关于差异化产品需求的文献 ([Berry , 1994](#) ; [贝里等人 , 1995](#)) , 在航空业有重要应用 (例如 , [Berry和Jia \(2010 \)](#) ; [Bontemps等 \(2022 \)](#))。

最后，我们连接到研究世界经济最新发展状况的新兴文献 (例如) [戈皮纳特等 \(2024 \)](#) 和 [艾亚尔等 \(2024 \)](#))。我们在现有文献中加入了对中美航空运输连通性近期模式的分析。

提纲 本文结构如下。第一节 [2](#) 说明数据和第 [3](#) 经验策略与反事实练习的构建。第 [4](#) 包含主要结果和第几节 [5](#) 得出结论。

2 数据

这项研究利用了来自多个来源的综合数据集。航空运输数据来自官方航空公司指南 (OAG) 。

⁸ 具体来说，交通分析器提供关于乘客数量和票价 (不含机场税) 的信息

⁹ 而日程分析器提供了可用座位、航班频率、距离和机型的详细信息。我们还包含每种机型的燃油消耗数据，数据来源于制造商的网站，以及国际航空运输协会 (IATA) 喷气燃料价格监测的喷气燃料价格。

我们的数据集包括中国和美国 (以及反之) 之间所有可能的航线，包括直达和转机，按季度计算。时间范围涵盖2018年全年以及前三季度。

⁸
<https://www.oag.com/>

⁹
主要的价格来源是GDS Travelport。

2019年各季度（标记为新冠疫情前），以及2023年的第二和第三季度（标记为新冠疫情后）。

10

3 航空旅行结构模型

3.1 需求

我们考虑一个在差异化产品文献精神下的航空公司寡头垄断模型 贝里等人 (1995),也称为BLP。我们采用嵌套logit模型来模拟航空旅行的需求。给定市场中的消费者 m ，定义为给定区域中一个起点城市和一个终点城市的非定向对，面临着在不同产品之间的选择 j ，定义为使用特定航空公司的往返行程，直接或通过特定门户中转，以及外部选项（ $j = 0$ ），其中包括所有非飞行的替代方案。市场上的产品分为两个类别：一个包含所有飞行选项，另一个是外部选项。

在需求规格中，每个产品 j 在市场 m 以一个外生的特征向量为主要特征 X （例如，直飞/间接航班），机票价格 p ，未观察到

特性 ξ （例如，预订条件、退款政策以及特定航班限制）

以及嵌套参数 σ ，它支配着飞鸟巢和外部商品之间的替代性。间接效用 u 由消费者导出 i 从产品 j 在市场 m 是

建模为：

$$u = \beta X + \alpha p + \xi + \sigma v + (1 - \sigma) \varepsilon \quad (1)$$

根据Berry(1994)，市场份额方程为

$$s = \frac{\exp(\beta X + \alpha p + \sigma \ln s + \xi \log)}{\sum_{j \in J} \exp(\beta X + \alpha p + \sigma \ln s + \xi \log)} \quad (2)$$

哪里 s 是产品的市场份额 j （即，乘客人数除以

市场规模 M ）， s 是外部商品的市场份额，以及 s is the market share of the market

在飞行集中分享。

向量 X 涵盖了外源性特征，如航空公司联盟或非联盟航班的单个承运人标识符、中转次数、美国出发（或到达）州、中国出发（或到达）地区以及通过年份和季度虚拟变量进行的时间控制。

术语 α 表示观测到的。中国于2023年1月8日仅通过取消入境旅客的隔离要求，结束了所谓的零冠政策。因此，我们认为从2023年3月开始进入后疫情时期是合理的。

参见附录了解更多详情 A。

考虑到新冠疫情对网络的干扰，区域固定效应可能会提供有偏的估计。例如，如果一条直接连接被移除，旅客可能会选择在另一个机场中转，从而增加该地区的需求。为了解决这个问题，我们增加了与模型交互的灵活性

经济舱票价。

13

3.1.1 需求估计

在公式(2),价格(p)和巢中的市场份额(s)是内生的。随后

jmt jmt/f

在文献中,我们考虑三个供给变动因素作为价格的工具变量 [贝里和海尔, 2024](#))。首先,我们包括每位乘客的燃料成本 ([燃料 _ 成本](#)),第二个是一个虚拟的

jmt

如果承运人被允许飞越俄罗斯领空,则为值一 [上 _ 俄罗斯](#)),和

jmt

最后,一个表示外生的变量 [供应 _ 改变](#) ,后者将讨论

jmt

在以下小节中详细说明 (即, [3.2](#))。我们接着考虑两种竞争性产品 (所谓的“BLP工具”) 的市场份额的特定特征 s 。首先,

jmt/f

不同联盟 (或非联盟的航空公司) 供应的竞争产品数量

14

, 并且当产品与直接连接竞争时, 一个值为1的虚拟变量。

15

3.2 供应

每个市场的航空公司 m 与伯特兰一样, 使用水平差异化产品进行竞争。我们可以为航空公司建模利润函数 a as:

X

π

a

$= (p - mc) \times s M$

利润最大化的第一阶条件是: jmt jmt jmt mt mt $j \in J$ a

a

$\frac{\partial \pi}{\partial s} =$

$\frac{\partial \pi}{\partial p} =$

$s + (p$

$- mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

方程式(3)可以等价地用矩阵形式重写:

a

$\frac{\partial \pi}{\partial s} =$

$\frac{\partial \pi}{\partial p} =$

$s + (p$

$- mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

$s + (p - mc) \Delta = 0$

p

$J \times J'$

Δ

带有新冠疫情前后虚拟变量的区域虚拟变量。

13

该研究通过关注经济舱数据来考察机票价格和旅客趋势。这种方法的依据在于经济舱机票更能准确地反映消费者的支付意愿, 从而降低道德风险的影响。例如 [巴索等人 \(2009 \)](#)。

14

产品竞争数量增加与航空公司产品市场份额减少相对应。

15

直接选项的可用性会对价格施加下行压力, 因为消费者倾向于更快的旅行。因此, 这种竞争与所讨论产品的市场份额成负相关。

观察 s 和 p ，并且能够估计 Δ ，我们能够计算与模型一致的向量

ρ
 边际成本(mc)。

最后，使用回归模型估计供给侧，以评估产品特征对估计边际成本的影响：

$$mc_{jmt} = \psi w_{jmt} + \gamma X_{jmt} + \omega_c \quad (5)$$

哪里 X 包含与需求方程 (Eq. (2)) 和 w 包含

jmt jmt

外生观测到的供给变动因素。特别是我们在需求估计中包含相同的价格工具集 (即，燃料 _ 成本，上 俄
 罗斯，和 供应 _ 改变)。

jmt jmt jmt

对燃料成本和承运商在俄罗斯领空运营能力的影响显而易见。我们分析的关键变量是我们所谓的
 供应 _ 改变。更具体地说，这个变量衡量了在 di-

jmt

分析新冠前后美国与中国之间的直飞航线。考虑一个单中转的航班行程，例如2023年第二季度的美国航
 空公司 (AA) 华盛顿 (IAD) - 洛杉矶 (LAX) - 北京 (PEK) 航班。在这种情况下，需要考察的关键航
 段是从LAX到PEK的直飞航段。我们评估2018-2019年新冠前时期的该直飞航段平均每季度座位容量，
 并将其与2023年的相应容量进行比较。假设2023年LAX-PEK航段的座位容量比新冠前平均降低了50%
 。在这种情况下，我们将变量赋值为-0.5 供应 _ 改变 该特定观测的变量，反映了重大的

jmt

供应减少。

16

最后， ψ 和 γ 表示用于估计的成本参数向量，同时
 ω 解释未被观察到的成本冲击。

jmt

讨论。 在异质产品行业的消费者需求和供给的结构性BLP估计中，寡头垄断供给最常用的模型是伯特兰
 -纳什均衡，其中企业在完全信息下进行同时定价。每家企业选择价格以最大化利润，既考虑自身产品属
 性，也考虑市场价格中竞争产品的价格和属性。其隐含假设是每家企业可以供给其产品需求量。在没有
 中美之间开放天空协定的情况下，我们对 供应 _ 改变 作为外生变量，

jmt

与游戏中存在的一个初始阶段 (在此未建模) 一致，该阶段中数量是通过两国之间的双边谈判确定的，
 而不是由企业战略性地设定。

16

供应 _ 改变 对于COVID-19之前的任何旅行行程均设为0，表示没有减少

jmt

在该时间段内供应。

3.3 事实验证分析

在估计需求和供给参数后，我们计算了两个反事实场景的均衡。

第一个反事实是通过重新引入因疫情取消的所有直达航线以及所有使用已重新引入的直达连接的联程产品来计算的。

17
接下来，在假设变量 *供应* _ *改变* 被重置为零。与估计的需求函数一起，

jmt
允许计算乘客数量、价格以及每位乘客的排放量，这些指标将表征一个均衡状态，在该状态下，美国和中国之间的直接空中运输连接性已完全恢复到疫情前的水平。

在第二个反事实中，我们基于第一个，重新引入了所有因疫情取消的直接航线，但我们抵消了排放，直到达到相同的水平

CO 新冠疫情期间由于数量减少而观察到的减少

2
关于航班。

18
在这个分析中，我们将后疫情情景视为一个 *准实验*，仿佛航班因环境考量被取消或大幅减少。这种方法为航空脱碳提供了两种截然不同的政策选择：（1）通过取消航班来减少排放，（2）通过抵消来减少排放。除了反事实的旅客数量和价格之外，我们还可以使用对数和公式来衡量在观察到的均衡（即削减航班）中，从新冠疫情前到后消费者剩余的总体减少量，并将其与反事实均衡（即抵消排放）中相等的消费者剩余减少量进行比较。

4 结果

表 2 展示了需求和供给的估计

19
需求回归系数具有预期的符号，并且在统计上显著。系数 *价格* 在需求

jmt
方程式为负，并且嵌套参数 σ ，链接到 $\ln(s)$ ，介于 0 和 1 之间，

jmtlf
表示外部选择项与所有空气产品之间的替代程度。

正如预期，乘客倾向于直接航班。平均而言，乘客愿意为直接航班支付约1,273美元更多，为有一个中转的航班支付约294美元更多，与有两个中转的航班作为参考类别相比。需求估计允许

17
使用需求估计的第一阶段来预测新产品的价格 and 市场份额，并根据新的竞争情况对所有产品进行调整。

18
假设每吨抵消成本为32美元 *CO*。

2 19
While表格 2 它提供了分开的需求和供给估计，我们也使用GMM同时估计它们。结果，如需，与这里呈现的结果非常相似。

20
在线附录中，我们报告了第一阶段回归的结果，具有强大的F统计量。

表2：需求和供给估计

需求估计 边际成本估计	
回归模型	回归模型
价格 jmt -0.0021*** (0.0002)	燃料_成本 jmt 0.5538*** (0.0547)
$\ln(s_{jmt/f})$ 0.2318*** (0.0111)	供应_改变 jmt -670.9094*** (96.6486)
直接 jmt 2.6735*** (0.1818)	上_俄罗斯 jmt -197.1840* (106.4521)
1conn jmt 0.6166*** (0.1709)	
观察8,822	观察8,822
年虚拟变量是	年虚拟变量是
季度虚拟变量是	季度虚拟变量是
联盟/航空公司虚拟变量是	联盟/航空公司虚拟变量是
中国市场 $\times$ Pre/Post 是的	中国市场 $\times$ Pre/Post 是的
美国市场 $\times$ Pre/Post 是的	美国市场 $\times$ Pre/Post 是的
括号内的稳健标准误差 - *** p	<0.01 , ** p<0.05 , * p<0.1

我们需要计算需求的价格弹性。我们计算得到平均自身价格弹性为-1.17。

21 我們對航空運輸產品價格彈性的估計與先前研究中發現的結果一致。

表右侧 2 展示了边际成本组成部分的估计系数。燃料成本系数为正且显著。正如预期，飞越俄罗斯领空导致边际成本降低，每位乘客约减少197美元。此外，供应变化系数为负且统计显著，正如预期。 *Ceteris paribus*，供应减少50%使估计边际成本增加335美元。

全球成本冲击（例如大流行期间被解雇的员工重新招聘的困难）被体现在年份虚拟变量中。如小节所述 3.3，我们计算了第一个反事实，假设航班容量恢复到新冠疫情前的水平。结果见表 3 我们观察到均衡发生了重大变化。首先，反事实分析显示总乘客量增加了 387%，相应地减少仅为 19%

自身的价格弹性是使用公式计算的

$$\partial \ln (s) / \partial t$$

$$=$$

α

$$p \begin{pmatrix} 1 & -\sigma s \\ -\sigma s & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & -\sigma \\ -\sigma & 1 \end{pmatrix} s$$

$$jmt \quad jmt \quad jmt/a \quad \partial \ln \quad (p)^1 \quad -\sigma \quad jmt$$

22 贝里和贾 (2010) 发现1999年的价格弹性为-1.55, 上升到2006年的-1.67。类似地, 西里伯特和威廉姆斯 (2014) 报告称, 游客的平均自身价格弹性为-6.260, 商务旅客为-0.559。他们还指出, 弹性会随着不同的产品定义而变化 (脚注24)。然而, 这些研究侧重于美国国内市场, 而在中美市场, 差异可能源于航空旅行的替代品缺失, 以及商务旅客和休闲旅客的比例不同。

与疫情前的观察流量相比。这种增长集中在乘坐直飞航班的乘客，这会增长814%。其次，价格将大幅下降，平均下降，直飞航线甚至更多（分别下降63%和72%）。最后，虽然总 CO_2 排放将增加，每人 CO_2 排放会更低

22
21%.

表3：反事实新产能：旅客和价格

	乘客		价格（美元）		
	观察到的		反事实		
	前后全	新冠病毒 供应	前后全	新冠病毒 供应	
所有航班	1,012,342	168,995	823,668		
Δ % vs pre-COVID		-83%		-19%	
Δ % vs 后疫情				387%	
直达航班	589,234	52,647	481,240		
Δ % vs pre-COVID		-91%		-18%	
Δ % vs 后疫情				814%	
1连接	422,890	115,625	342,291		
Δ % vs pre-COVID		-73%		-19%	
Δ % vs 后疫情				196%	
2个连接	219	72	136		
Δ % vs pre-COVID		230%		-38%	
Δ % vs 后疫情				-81%	
	总数	CO_2	每人	CO_2	
Δ % vs pre-COVID		-80%		-21%	
Δ % vs 后疫情				287%	

该表格展示了反事实情景(1)中的平衡状态，在该情景中，我们模拟了恢复COVID-19大流行前所有可用的直接连接。*当计算每位乘客的 CO_2 时，我们忽略了LF。

这些预测与可比市场观察到的趋势相符。例如，在同一期间，美国与中东的特价机票价格上涨了28%，从449美元上涨到574美元。同样，美国与西欧的价格上涨了44%，从282美元上涨到406美元。

23

在我们的案例中，反事实均衡揭示平均价格上涨了33%。这些上涨可能归因于全球成本冲击。

第二节反事实分析的结果，详见小节 3.3，被总结在表中 4。本质上，我们复制了第一个反事实的均衡，恢复了新冠之前的航班容量，然后抵消排放，直到它们与新冠后的水平一致。在这种情况下，观察到的新冠后时期的排放与我们在

反事实

24

表4：反事实新增容量和抵消：旅客和价格

	乘客		价格 (美元)		
	观察到	反事实	观察到	反事实	
	前置后置抵消 COVID COVID 排放		前置后置抵消 COVID COVID 排放		
所有航班	1,012,342	168,995	760,656		
Δ % vs pre-COVID	-83%	-25%	362	1,285	516
Δ % vs 后疫情		350%		255%	43%
直达航班	589,234	52,647	447,560		
Δ % vs pre-COVID	-91%	-24%	355	1,523	454
Δ % vs 后疫情		750%		329%	28%
1连接	422,890	115,625	312,975		
Δ % vs pre-COVID	-73%	-26%	373	1,177	605
Δ % vs 后疫情		171%		216%	62%
2个连接	219	723	121		
Δ % vs pre-COVID	230%	-45%	366	1,196	1,073
Δ % vs 后疫情		-83%		227%	193%
	总数	CO ₂	每人	CO ₂	
Δ % vs pre-COVID	-80%	-80%	22%	-73%	
Δ % vs 后疫情		0%		-78%	
	消费者剩余				
Δ与新冠前 (百万美元)	-4,882	-2,862			
Δ % vs 后疫情		+41%			

本表展示了反事实情景 (2) 中的均衡状态，在该情景中，我们模拟了恢复COVID-19大流行前可用的所有直接连接并抵消。*假设抵消成本为每吨二氧化碳32美元，为实现与后疫情相同的排放水平，必须抵消71.941%的排放量。**在计算每位乘客的二氧化碳排放量时，我们忽略了自由落体。

如表所示 ⁴，这是一个碳排放中性情景：两种政策都实现了相同的减排目标——减少80% CO₂ 排放。然而，与

2 对冲的特点在于美国和中国之间的旅客量大幅增加，预计将比新冠疫情后时期增长350%。尽管这比疫情前水平减少了25%，但仍然比后疫情现实中观察到的83%的减少有了显著改善。此外，在这种对冲情景下，机票价格将受到显著影响。虽然价格将比疫情前观察到的高出约43%，但它们仍然远低于后疫情时期的价格，反映了更为易得且环保的方法。

24

通过以每吨32美元的成本，使用CORSIA框架内的最高价格抵消约72%的排放量，实现了这种减排。

最后，根据航班取消政策，消费者剩余的减少估计约为48亿美元，而抵消政策导致消费者剩余损失较小，约为28亿美元（降低了41%）。

总的来说，这些发现表明抵消 CO 排放可能是一种更有效的治理措施

²
低碳路线 icy route for decarbonization, allowing for substantial environmental benefits while imposing a comparatively smaller economic burden on consumers.

5 结论

在这篇论文中，我们估计了美国—中国市场航空运输的供需结构模型，以分析后疫情时代的航空连通性动态及其对脱碳化的影响。我们的结果表明，重新建立疫情前的直达连通性可将客流量提高387%，并将票价降低63%。后疫情时期的航班减少导致CO₂排放量下降80%。利用这 准实验，我们评估了基于市场的机制（如碳抵消）作为减少航班以实现环境目标的替代方案的潜力。反事实分析表明，在保持疫情前连通性的同时，通过抵消实现相同的减排量，将使旅客流量增加365%，机票价格降低60%，与观察到的后疫情均衡相比，消费者剩余损失减少40%。我们的研究突显了航班取消作为一种脱碳策略的效率低下，以及基于市场的机制（如抵消）在协调环境目标与保持经济效益和连通性方面的潜力。

我们的研究表明了几条未来研究的潜在途径。该分析可以扩展到对冲配额的供需进行建模。虽然本研究在假设对冲配额的价格不变的情况下评估了价格机制的影响，但未来的研究可以将这些工具的市场内生性，考虑需求增加如何影响其价格，进而决定成本冲击的幅度。此外，该框架可以扩展用于分析其他脱碳政策，例如建模可持续航空燃料（SAF）的供需。

²⁵

包含SAF的反事实情景可以帮助评估其作为航空部门脱碳可持续替代方案的可行性。

²⁵

国际民航组织的“措施组合”以减少航空排放包括四个关键组成部分：改进飞机技术（例如，节能设计）、提高运营效率（例如，优化航线和空中交通管理）、推广可持续航空燃料（例如，生物燃料和合成燃料），以及实施基于市场的措施（如 CORSIA）以抵消剩余排放。

参考文献

艾亚尔, S., 马拉克里诺, D., 和普雷斯比特罗, A. F. (2024)。投资朋友：地缘政治一致在外国直接投资流动中的作用。 *欧洲政治经济学杂志* , 83(C).

阿伏伽德罗, N. 和雷东迪, R. (2024)。使用微观数据的非参数识别差异化产品需求。 *交通研究A：政策与实践* , 186:104– 121.

巴索, L. J., 克莱门茨, M. T., 和罗斯, T. W. (2009)。道德风险和顾客忠诚度计划。 *美国经济评论：微观经济学* , 1(1):101–123.

鲍莫尔 (1972年)。关于税收与外部性控制。 *美国经济评论* , 62(3):307–322.

Berry, S.和Jia, P.(2010).追踪困境：对航空业的经验分析
美国经济评论：微观经济学 , 2(3):1–43.

Berry, S., Levinsohn, J., 和 Pakes, A. (1995). 市场均衡中的汽车价格。 *计量经济学：计量经济学会会刊* , 第 841–890 页。

Berry, S. T. (1994). 估计产品差别的离散选择模型。 *《兰德经济学杂志》* , 第242-262页。

Berry, S. T.和Haile, P. A.(2024)。使用微观数据的非参数识别差异化产品需求。 *计量经济学* , 92(4):1135–1162.

Bontemps , C. , Remmy , K.和Wei , J. (2022年)。美国航空公司与美国航空公司合并的事后评估：一种结构化方法。 *运输经济学与政策杂志 (JTEP)* , 56(2):129–155.

Cames , M. , Graichen , J. , Siemons , A.和Cook , V.(2015)。国际航空和航运的减排目标。

西里伯特, F. 和威廉姆斯, J. W. (2014). 多市场接触是否促进默契串通？航空业行为参数的推断。 *兰德经济学杂志* , 45(4):764–791.

Cramton, P., O. A. . S. S. (2017). 一个国际碳价承诺促进合作。 *能源环境政策的经济学* , 6(2):51–63.

多布斯克, F., M. G. 和马蒂厄, L. (2022). 禁止超短途航班: 环境证据还是政治动荡? *运输地理学杂志* , 104:p.103457.

盖尔, P.G.和布朗, D. (2014)。重叠市场中的航空公司战略联盟: 政策制定者应担忧吗? *运输经济学* , 3(4):243–256.

戈皮纳特, M. G., 古林查斯, P.-O., 普雷兹比托罗, M. A. F., 和 托帕洛娃, P. (2024). 变化的全球联系: 新的冷战? 国际货币基金组织工作论文 2024/076, 国际货币基金组织。

高尔德, L. H. 和 施泰因, A. (2013). 碳税与总量控制交易: 一项批判性综述。 *气候变化经济学* , 4(3): 1–28.

里奇, H. (2024)。全球航空排放占多少比例? *我们的世界数据* . <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>.

沙帕尔特格伊, A., C. I. 和加拉拉加, I. (2024)。法国短途航班禁飞: 温室气体减排具有相关潜力, 但影响尚显 modest。 *生态经济学* , 即将出版。

范米德, M. K. e. B. 和米尔尤马特雷格尔, V. V. (2023). 荷兰史卓思机场: 扩张还是延长?

一个在线附录

A.1 描述性统计

表 A.1 为我们的数据集中的产品和市场层面变量提供汇总统计，每个变量都包含未加权和乘客加权平均值。

每个产品的乘客平均数为841.58，标准差为2,548.63。未加权平均市场份额 (s) 对于每个产品的成本都非常低，为0.0004，

jmt
这与本研究使用的市场和市场规模的具体定义相一致 (详见附录) A.2)。段内市场份额 (s) 约为28 jmt/a

产品平均价格为451.29美元，加权后降至404.49美元。直达航班相对较少，在未加权样本中平均为0.06；然而，它们占据了更大的乘客份额，加权平均为0.57。相反，有中转航班的产品的未加权平均值为0.94，加权后降至0.43，表明乘客更偏好直达航班。其余航班涉及两个或更多的中转。

关于联盟会员资格，星空联盟占比最高，平均为0.39，其次是天合联盟 (0.31) 和寰宇一家 (0.15)。这些比例在未加权平均值和加权平均值之间保持相对稳定，表明联盟会员资格对客流量影响不大。单位产品的燃油成本也值得关注，未加权平均为310.75美元，加权后略低为286.12美元，表明客流量较高的产品与直飞航班相关联，因此航线较短。

变量 供应 _ 改变 仅针对后疫情时期计算，显示 a

jmt
-0.25 (非加权) 和 -0.32 (加权) 的平均值，表明在此期间产品供应总体收缩。此外，穿越俄罗斯空域的产品相对较少，非加权平均值为0.12，但加权平均值为0.22，表明这些航线的旅客份额较高。该变量也仅针对新冠疫情后时期进行计算。

每个市场的竞争产品平均数量为5.34 (未加权)，加权后上升至8.27，表明高流量市场面临更多竞争。此外，存在直飞替代方案 (直接 _ 可替代) 在无权重的相对较低

jmt
样本 (0.31)，但在加权平均中上升到0.56，表明在高乘客市场中直接替代品的可用性更强。

在市场层面概述中，每个市场平均有3.56种产品，2.58个不同的运营商，其标准差分别为4.12和2.25，表明存在中等程度的变化。外部选择的市占率 (s) 接近于1 (0.9985)，反映了高概率

$0 \text{ } mlt$
以便旅行者可以选择观察产品之外的替代方案，例如其他交通方式

模式或目的地。该数据集包括2,477个不同的市场。

表 A.1：统计摘要

产品平均				
变量	均值	S.D.	无权重 权重	
			pax_{jmt}	
均值	S.D.	均值	S.D.	
pax_{jmt}		841.58	2,548.63	
s_{jmt}		0.0004	0.0012	0.0037 0.0043
$s_{jmt/a}$		0.28	0.32	0.42 0.29
价格 $_{jmt}$		451.29	292.98	404.49 262.77
直接 $_{jmt}$		0.06	0.24	0.57 0.50
1 conn $_{jmt}$		0.94	0.24	0.43 0.50
oneworld $_{jmt}$		0.15	0.36	0.12 0.32
星 $_{jmt}$		0.39	0.49	0.39 0.49
星空联盟 $_{jmt}$		0.31	0.46	0.29 0.45
燃料_成本 $_{jmt}$		310.75	76.74	286.12 78.26
供应_改变 $_{jmt}^*$		-0.25	0.36	-0.32 0.39
上_俄罗斯 $_{jmt}^*$		0.12	0.33	0.22 0.42
#_竞争_产品 $_{jmt}$		5.34	6.40	8.27 7.13
直接_可替代 $_{jmt}$		0.31	0.46	0.56 0.50
观察8,822				
市场平均				
平均数 标准差				
编号 产品	3.56	4.12		
编号 运营商	2.58	2.25		
s_{0mt}		0.9985	0.0036	
市场数量	2,477			

*针对后疫情产品进行计算。

A.2 市场份额计算公式

在计算航空市场份额时，标准方法是使用公式 $s = \frac{jmt_{乘客} jmt}{jmt_{jmt} M^{mt}}$ ，其中 s 表示产品的市场份额 j ， pax 是乘客数量， jmt 和 M 是原点 (O) 和目的地 (D) 区域人口的几何平均数
例如，Berry和Jia (2010)。然而，由于这两个地区的人口规模和购买力存在巨大差异，将此方法应用于中美航空旅行时存在一定的局限性。为了解决这个问题，我们调整了市场份额公式中的人口成分。

$$s_{jmt} = \frac{GDP_{per_capital_CNM}}{GDP_{per_capital_US}} \times \frac{pop_{US}}{pop_{CN}} \times \frac{pop_{CN}}{pop_{US}}$$
 (CN城市流行音乐)

具体来说， s_{jmt} 被计算为美国流域人口和中国流域人口的几何平均值，按其人均GDP加权。
 A.1 国内生产总值 - per - 资本 - 美国
 这项调整使得能够更细致地考虑美国和中国消费者之间的异质性。
 A.2

A.3 IV估计

表A.2：需求估计：第一阶段回归

仪器	价格 jmt	$\ln(s_{jmt})$
直接 jmt	34.8659 (57.4596)	2.0681*** (0.2571)
1 conn jmt	-3.2414 (56.0699)	0.3548 (0.2473)
num _ comp _ prod jmt	-3.6659*** (0.6895)	-0.0703*** (0.0028)
直接 _ 可替代 jmt	-9.2058 (7.6527)	-1.6886*** (0.0333)
燃料 _ 成本 jmt	0.5284*** (0.0547)	-0.0024*** (0.0002)
供应 _ 改变 jmt	-664.4355*** (96.9623)	0.9675*** (0.1964)
上 _ 俄罗斯 jmt	-213.5481** (106.9548)	-0.5114*** (0.1967)
2019年	7.2113 -0.0936*** (4.9881)	(0.0217)
2023年	540.4632*** -1.2825*** (135.2478)	(0.3299)
观测值	8,822 8,822	
F检验	35.67 1058.71	
季度虚拟变量	是 是	
联盟/航空公司虚拟变量	是 是	
中国市场	× 前/后 是 是	
美国市场	× 前/后 是 是	
括号内的稳健标准误差 - *** p	<0.01 , ** p<0.05 , * p<0.1	

A.1 需要注意的是，在这个市场，虽然我们可以识别出行方向，但消费者来源——无论是前往中国的美国人还是返华的中国公民——仍然无法确定。
 A.2 见例如 盖尔和布朗 (2014)