arXiv:2304.01709v1 [econ.GN] 4 Apr 2023

电力（价格）如此充沛，尾气排放却如此严重？电价与电动汽车普及的自然实验。

Johannes Mauritzen 挪威科技大学与挪威经济学院，挪威特隆赫姆7491
johannes.mauritzen@ntnu.no

2023年4月5日

关键词— 电动汽车，电价，自然实验

摘要

摘要。 对于普遍认同的乘用车电动化目标而言，一个根本却尚未得到解答的问题是：在不同国家和地区差异显著的电价，会如何影响购买行为？我利用2021-2022年挪威的一项自然实验：当时南北部之间出现了显著的价格差异，据此估算电价对购买纯电池电动汽车决策的影响。沿价格区边界进行的简单差异估计，以及双重差分回归模型，均表明，高价区购买电动汽车的概率显著下降了2-4%，但这一效应在经济层面上较为温和。反事实模拟显示，与南部电价和北部同样低的情形相比，高价的南部少售出了约3000至6000辆电动汽车。

1 引言

大多数消除净碳排放的计划都将交通电气化作为核心组成部分。电池成本不断下降，加上新兴和成熟汽车企业对电动汽车开发的大量投资，推动了许多主要市场的电动汽车销量持续增长。

得益于慷慨的补贴，挪威一直致力于鼓励消费者购买无尾气排放的全新电动汽车，并且是全球新车销量中电动汽车普及率最高的国家。挪威可以被视为交通电气化的实验室，为电动汽车市场的发展提供了证据。

经济学和环境科学文献中的一个重要问题是，消费者燃油价格的变化如何影响汽车选择和驾驶行为的广延边际与集约边际（Klier 和 Linn，2010年；Busse 等人，2013年；Allcott 和 Knittel，2019年；Bento 等人，2009年；Sallee 等人，2016年；Davis 和 Kilian，2011年；Allcott 和 Wozny，2014年；Li 等人，2014年、2009年；Donna，2021年；Klier 和 Linn，2010年）。大部分

证据表明，汽油价格的大幅变动会显著影响购买行为。例如，Klier 和 Linn（2010年）发现，2002年至2007年间美国汽油价格上涨至原来的四倍，可以解释传统美国汽车制造商市场份额下滑的约40%；与外国竞争对手相比，这些制造商生产的汽车和轻型卡车往往燃油效率更低。Li 等人（2009年）估计，汽油价格上涨10%，长期车队燃油经济性约提高2%。Sallee 等人（2016年）也发现了汽油价格影响二手车市场车辆选择的证据。

电动机本身具有更高的能效，而且在大多数发达国家，按标准化能源单位计算，电力的价格历来低于汽油和柴油，因此，电动汽车总拥有成本中的能源成本通常会显著降低。Desreveaux 等人（2020年）发现，在2020年，即使前期成本显著较高，电动汽车在法国5年期间的总拥有成本仍低于同级别的柴油车和汽油车。这一结果主要归因于较低的燃料成本。假设一辆车辆每年行驶9500千米，则柴油车的预估年燃料成本约为750欧元，而同等电动汽车的相应成本为204欧元。

另一方面，放松管制的电力市场价格往往波动较大，偶尔会出现大幅飙升。上述计算假设电力价格为每千瓦时 0.13 欧元。2022年期间，价格一度超过每千瓦时 1 欧元。此外，电力市场具有区域性，不同市场之间持续存在较大的价格差异，这种情况并不少见。

由于存在许多潜在的混杂变量，通过比较平均电价不同的地区或国家来识别电价对购买电动汽车选择的效应十分困难。各国或地区在电动汽车激励措施和支持政策方面往往有所不同，也存在文化、气候和现有基础设施等其他因素，这些因素既会影响购买电动汽车的决定，也会影响电价。某个地区的人口如果更加倾向于环境保护，这种倾向可能是一个未观测变量，同时影响电价和电动汽车普及。

在本文中，我利用挪威各价格区之间的价格差异，估计电价对电动汽车选择的效应。挪威是北欧电力市场的一部分，该市场属于分区市场，价格在不同国家之间及各国内部均有所不同。在某些时期，这些区域可能会出现较大的价格差异。各区域的确切边界不一定遵循既定的行政、文化或地理边界。本文的识别假设是，在边际上，潜在买家居住（并充电）的区域可视为随机分配的一种形式。这一假设可能较强，因此我对数据施加了不同的限制，以改善高价区与低价区域之间的平衡。

此外，我利用了挪威各价格区之间历史价格差异相对较小这一事实。然而，在2021-2022年期间，南部三个价格区

挪威的价格区经历了创纪录的高电价，与欧洲大陆的高电价一致；这些市场通过输电电缆与欧洲大陆直接相连。另一方面，挪威北部的两个价格区电价相对较低。有时，挪威南部的电价是挪威中部电价的100多倍。通过采用双重差分法，我可以控制那些可能同时影响购买电动汽车决策和不同价格区电价的时不变因素。

从理论角度看，挪威南部电价区的电价上涨可能对电动汽车购买同时产生收入效应和价格效应，而分析购买电动汽车的总量很难将二者区分开来。不过，在我的模型设定中，我分析的是在发生新车购买的条件下，选择电动汽车的概率。这会突出电动汽车选择中的价格效应。换言之，观察单位是一个二元指示变量，用来表示一辆新注册车辆是否为电动汽车。

许多关于车辆选择的传统文献都采用相对复杂的多项选择模型，以便纳入多种购车选项，同时控制通常与关注变量相关的属性（例如汽车尺寸和燃油效率）（Beggs 等人，1981年；Daziano和Achtnicht，2014年；Bhat等人，2009年；Donna，2021年）。我的方法有意采用较为简单的设定，分析纯电池电动汽车与纯粹或部分由内燃机驱动的车辆之间的选择。之所以关注这种选择，是因为它与有关个人车辆的政策辩论，以及企业在电动交通领域的投资决策直接相关。例如，补贴往往直接取决于汽车是否为纯电动汽车这一二元结果；地方和国家政府关于充电基础设施投资规模的决策，则取决于有多少家庭和企业选择纯电池电动汽车。

尽管混合动力汽车和插电式混合动力汽车部分采用电力驱动系统，但在我的分析中，它们在因变量中的登记值为“0”。在电动汽车的界定中排除插电式混合动力汽车并非显而易见，因为理论上这类车辆可以完全依靠电力行驶。然而，插电式混合动力汽车车主能够以几乎零成本或零成本在电力和汽油/柴油之间切换，因此若将这类车辆纳入分析，就会削弱对电价影响动力系统选择的效应的估计。

模型结果表明，高电价对电动汽车购买决策的影响可以测量，但幅度不大。纯粹的双重差分估计表明，高电价使选择电动汽车的概率降低了约2至4个百分点。采用允许时间趋势变化的模型进行反事实模拟后估计，如果南部价格区的电价与北部价格区一样低，那么在这一时期南部价格区域登记的车辆总数为242,000辆，其中将有3,000至6,000辆额外车辆选择电动汽车。

或许，这篇文章最值得注意的启示是，高电-

力价格对电动汽车购买决策的效应相当有限。南部地区的电价在较长时期内高出北部数个数量级，有时甚至达到北部电价的100倍。然而，在此期间，电动汽车普及率仍持续上升，只是增速略有放缓。

1.1 电动汽车普及与政策文献

随着电动汽车普及率不断提高，关于电动汽车市场的研究也逐渐兴起。Beggs 等人（1981年）对电动汽车需求的估算进行了颇为早期的分析，不过其目的在于示范如何基于调查数据估算不存在商品的需求。许多研究试图估算政府政策的效应，以及这些政策预期和非预期的后果。在对爱尔兰数据的分析中，Caulfield 等人（2022年）发现，人口密度高、平均收入较高的地区，电动汽车普及程度往往也更高，这引发了对补贴政策区域影响和收入分配影响的讨论。尽管我的研究主要并非政策分析，但分析中确实考虑了区域和收入效应。

另一类研究旨在分析不同政策之间的相互作用。Gillingham 等人（2021年）考察了电动汽车激励措施与碳税的组合，并展示了一个违背直觉的结果：与不征收碳税相比，适度的碳税会导致电动汽车使用碳强度更高的电力充电（不过，碳税较高时，这一结果会逆转）。挪威推行电动汽车政策的一个理由是其清洁能源结构以水力发电为主，同时风力发电的比重也日益增加。不过，挪威通过输电电缆与发电结构更加多元的欧洲国家相连。

与目前以奖励为主的激励方案不同，Holland 等人（2021年）构建了一个模型，用于评估一项禁止汽油车和柴油车、转而支持电动汽车的政策所产生的效应。他们发现，这项政策效率低下，且会造成巨大的无谓损失。挪威目前设有一项目标，要求到2025年所有轻型乘用车实现零排放（鉴于当前技术发展趋势，主要是电动汽车），但这并非强制性目标，而且尚未正式实施禁令。

多项研究专门分析了挪威及斯堪的纳维亚地区推动乘用车车队电动化、减少整体交通排放的政策。Yan（2018）分析了挪威整体的车辆登记税。该税于2007年与二氧化碳排放直接挂钩，研究发现，这项税收有效促使消费者转向二氧化碳排放强度较低的汽车。电动汽车可免缴新车注册税，这也是其在挪威具有经济优势的主要原因之一，后文将进一步讨论。在一项研究挪威柴油车、汽油车和电动汽车之间相似车型价格交叉价格弹性的研究中，Fridstroem 和 Oestli（2021）发现，电动汽车与汽油车、柴油车之间的弹性分别为 .36 和 .48

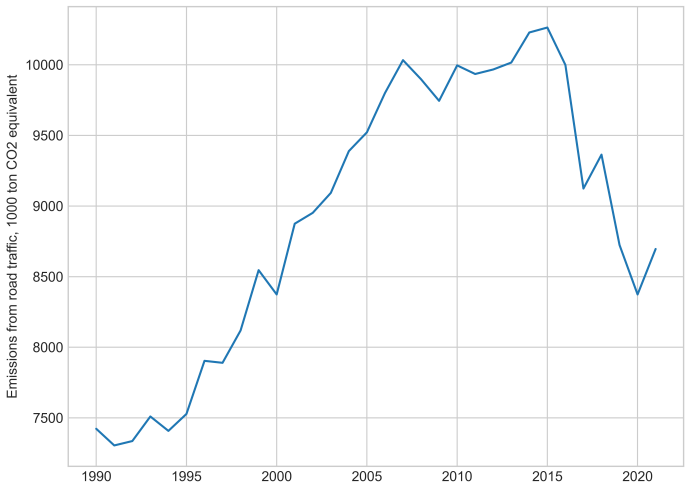


图1：挪威道路交通运输排放。来源：挪威统计局

。这种较高的可替代性表明，电价上涨也可能影响车辆选择。

1.2 挪威电动汽车政策与挪威电力系统

挪威中央政府和地方政府都为购买和使用电动汽车提供了慷慨的支持。这些政策的综合效应是电动汽车很早便得到大规模普及。到2022年年中，售出的新车中约有70%是电动汽车，挪威乘用车车队中约有18%是电动汽车。[1] 乘用车车队电气化的速度快于预期，因此交通运输的二氧化碳排放有所下降。如图1所示，2015年至2021年，道路运输的总排放量下降了15%以上。

在国家层面，支持电动汽车的主要措施包括免征25%的增值税（VAT）以及免除一次性新车注册费。注册费可能因车辆重量、发动机排量和二氧化碳排放等因素而异，但相较于国际水平，挪威的注册费很高。例如，一辆搭载汽油发动机的丰田凯美瑞[2] 一次性费用就超过400,000挪威克朗（约36,000欧元）。仅从购车价格来看，这使电动汽车具有了竞争力，而且与类似的内燃机汽车相比，电动汽车的价格优势日益显著。

[1] https://www.regjeringen.no/no/tema/transport-og-kommunikasjon/veg_og_vegtrafikk/faktaartikler-vei-og-ts/norge-er-elektrisk/id2677481/ [2] 根据以下假设：汽车重量为1500千克，发动机排量为2487立方厘米，功率为203马力，氮氧化物排放为60毫克/千米；这些数据已输入挪威税务局网站的税费计算器：https://www.skatteetaten.no/person/avgifter/bil/importere/regn-ut/

除了隐性购车补贴，电动汽车还享有颇具价值的使用补贴。1997年至2017年期间，电动汽车可免费使用收费公路、渡轮航线和市政停车位。2018年之后，各市镇可自行决定是否对电动汽车使用收费公路和渡轮航线收费，但费率不得超过内燃机汽车费用的50%。这一上限于2023年提高至70%，挪威道路管理局也已表示，2025年之后电动汽车不应继续享受折扣。

2 数据与描述性分析

2.1 数据

新车注册数据来自挪威道路交通信息委员会[3]。该数据涵盖挪威自2017年1月1日至2022年8月31日期间所有新注册的乘用车，后者是订购数据时的日期。原始观测单位是某一车型在某日、某个邮政编码区域内注册的数量。该数据集共有约875,000条观测值。变量包括注册日期、车辆的品牌和车型、发动机类型、邮政编码、车辆注册地址所属的市镇和县。

绝大多数观测值对应单辆车辆，但多辆车辆观测仍很常见，尤其是在高人口密度的邮政编码区域。对于回归分析，我希望将观测单位设为单次车辆注册。这样做是为了简化模型选择、便于解释模型，并确保观测值获得正确的权重。因此，我通过复制包含多辆车辆观测的记录，将数据集转换为以单次车辆注册为观测单位。例如，一条记录显示某日某个邮政编码区域内注册了3辆日产聆风，则将该记录复制，使转换后的数据集中包含3条完全相同的观测值。完成转换后，数据集约有102万条观测值。

每个价格区的批发电价数据均取自 ENTSO-E 透明度平台。[4]我从挪威统计局获取市镇级收入中位数和人口数据。[5]

图 2 展示了自 2017年以来挪威每月售出的电动汽车、柴油汽车和汽油汽车总量。早在2017年，电动汽车就已占新售汽车的相当大一部分，但其普及率在 2020年之后加速提升。新冠肺炎期间，挪威的汽车购买量大幅增加，部分原因是对公共交通使用的限制。然而，在此期间，柴油汽车和汽油汽车的销量仍持续下降。

图3展示了自2017年初以来按传动系统类型划分的汽车累计销量。该

[3]在挪威语中，“Opplysningsrådet for veitraffikken”，https://ofv.no

[4]ENTSO-E 是一个由输电系统运营商组成的欧洲伞式组织。他们通过透明度网站免费提供覆盖欧洲的数据：https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show

[5] https://www.ssb.no/en

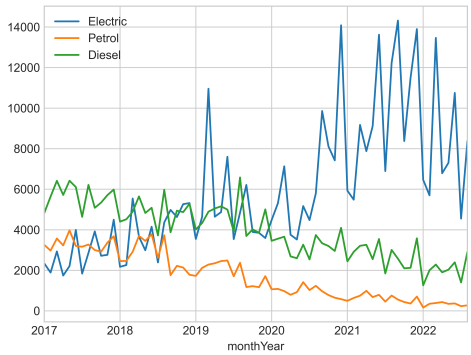


图 2：按月份统计的汽车销量。

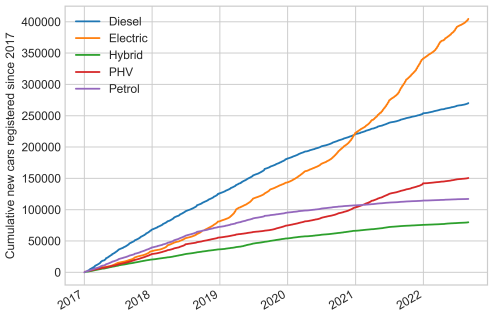


图 3：累计售出的汽车数量。

纯电动汽车的普及率也超过了插电式混合动力汽车（PHV）和混合动力汽车。

北欧电力市场是一种分区电力市场，会为预先划定的地区，或在某些情况下为整个国家，设定统一电价。其主要定价机制是由电力交易平台 Nord Pool 运营的日前拍卖系统。发电商提交报价曲线，说明他们愿意在不同价格水平下生产的电量；消费者——包括零售商和大型工业用户——则提交预期需求曲线。Nord Pool 根据这些报价生成汇总供需曲线，并据此确定市场中的理论系统电价。

挪威划分为5个电价区域（通常也称为价格区）。图4展示了所有市镇的边界地图，并用颜色标示五个电价区域。NO1覆盖挪威东南部，包括奥斯陆大都市区。NO2包括挪威南部和西南部，包括克里斯蒂安桑和斯塔万格等城市。NO5覆盖挪威西部，包括挪威第二大城市卑尔根。NO3覆盖挪威中部，包括特隆赫姆市。NO4覆盖挪威北部地区。

图5展示了挪威五个电价区域的月均电价。在2021年之前，各区域的平均电价大多相近。然而，电价从2021年初开始出现分化，并在2021年末至2022年期间加速扩大。造成这种分化的主要原因是欧洲大陆天然气价格上涨，而天然气往往是欧洲大陆和英国的边际发电能源。挪威不使用天然气发电，但南部电价区域均与欧洲大陆和/或英国相连，因此电价仍可能由天然气发电设定。另一方面，最北部的两个电价区域没有直接连接欧洲大陆的输电电缆，其边际发电能源通常是风电和水力发电。南北天气状况的差异加剧了这一趋势。2022年，东部和南部地区经历了异常干燥、温暖的春季和夏季，导致水电水库水量减少。另一方面，挪威中部和北部则经历了一个降雨较多的夏季。

图6展示了2020年、2021年和2022年各电价区域的年均电价。图中清晰显示了挪威中部电价

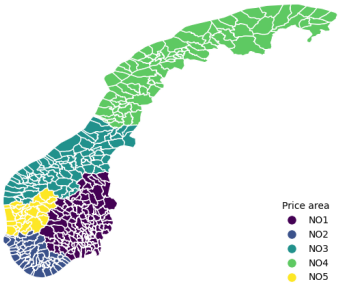


图4：地图显示了挪威各市镇的边界，并按电价区进行标记。NO3和NO4是最北端的两个电价区域。NO1位于东南部，包括奥斯陆大都市区。NO2包括挪威南部和西南部地区，其中有克里斯蒂安桑和斯塔万格两座城市。NO5包括西部沿海地区的大部分区域，其中有挪威第二大城市卑尔根。

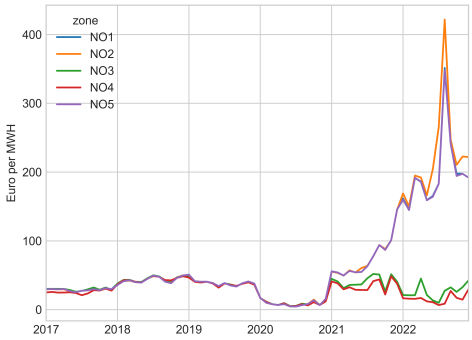
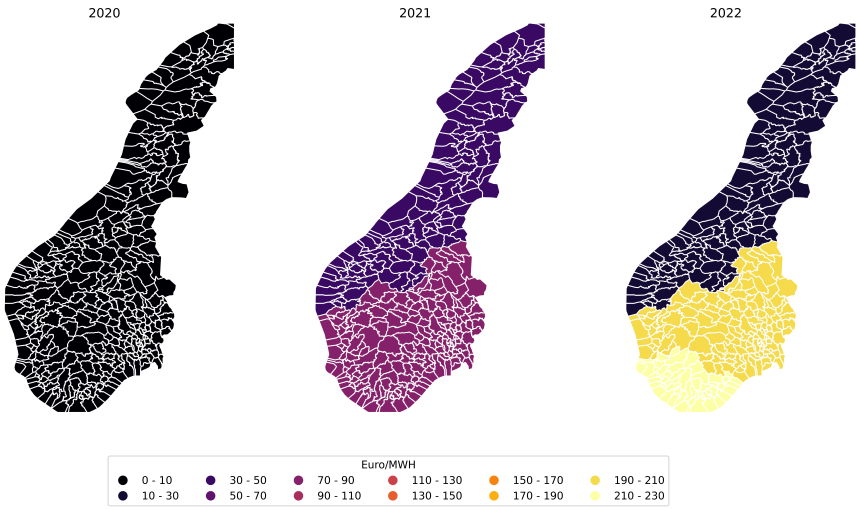


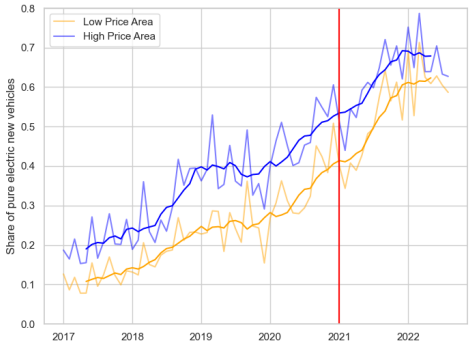
图5：图中显示了挪威五个电价区域的月均价格。2017年至2020年间，各区域的价格平均而言相近。2021年，各区域价格开始出现分化：南部电价区域（NO1、NO2和NO5）的价格大幅上涨，而挪威中部和北部的价格仍然较低。

区域（NO3）与西部（NO5）和挪威东部（NO1）电价之间的显著断层，这正是本文识别策略的重点。挪威各地区在气候、经济和政治等多个层面可能存在差异，但电价区域的边界在边缘地带可视为人为划定的。这些边界不一定遵循既有的政治或文化边界，会穿越郡，有时甚至穿越市镇。

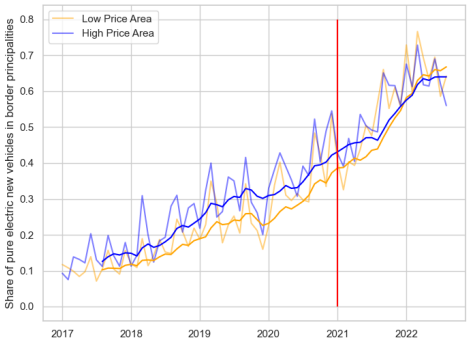
在自然实验研究中，要实现识别，一个必要假设是，在实践中应将个体分配到对照组和处理组视为随机的，这称为可忽略性假设。双重差分设计通过差分消除时不变因素，从而放宽了这一假设。不过，要使双重差分得出无偏的因果估计，仍须假设在没有处理的情况下，各组趋势相同。图7a将观测值分为两组：一组是2021年和2022年经历高价格的地区，称为高电价区；另一组是2021年和2022年价格较低的地区，称为低电价区。图中显示了电动汽车占新注册车辆的平均比例随时间的变化，并采用平滑移动平均项来呈现序列趋势。高电价区主要由挪威南部地区组成，其电动汽车普及率平均较高。这可能是因为这些地区人口密度较高、城市较多，其中包括奥斯陆地区。如图8所示，城市和人口稠密地区的电动汽车占比往往较高。然而，在价格分化之前，各地区随时间变化的趋势大致相似。2021年初价格分化之后，普及率差距有所缩小。

图6：该地图显示了2020年和2021年各电价区域的年均价格。2020年，不同电价区域之间的平均电价差异很小。2021年，所有电价区域的价格均有所上涨，南部价格区域的涨幅更大。2022年，各区域价格走势出现分化，其中挪威中部价格区（NO3）与东部（NO1）和西部价格区（NO2）交界处的反差尤为明显。





(a) 全挪威。在价格分化之前，南部的高电价区普及率较高，但两者的趋势看起来大致相似。价格分化之后，与高电价区相比，低电价区的电动汽车普及率加速上升。



(b) 仅限于高电价区（NO1、NO5）和低电价区（NO3）边界沿线的市镇。

图7：2021年之后经历高电价的地区（NO1、NO2、NO5）新注册电动汽车月均占比，以及电价持续保持低位的地区（NO3、NO4）的新注册电动汽车占比。为了展示趋势，在月度数据上叠加了一条平滑移动平均线。

为了尝试加强两个电价区域之间的可忽略性假设，我还将分析限制在以下市镇集合内：这些市镇位于北部低价NO3电价区与NO1和NO5价格区的高价市镇之间的边境地带。图 refmapBorder.png 显示了该子样本中所包含市镇的地图。这些市镇总体上大致相似：没有中型或大型城市或市镇，且气候和地理环境也大致相似。图7b显示了边境地区新登记电动汽车所占份额的月均值。高价区域和低价区域的电动汽车普及率大致相近。价格出现分化之后，低价区的普及率似乎加快了。

除了电价之外，还有若干因素可能影响电动汽车购买决策。在模型中纳入这些因素，有助于纠正对照组之间的不平衡，并提高参数估计值的精确度。上文已经结合不同电价区域中城市的位置讨论了人口密度。人口密度在更精细的地理层面上也可能发挥作用。图10a展示了一张散点图，纵轴为市镇平均人口的对数，横轴为2017年至2022年间新注册电动汽车的平均占比。两者呈正相关，但数据的离散程度较大。

家庭收入是另一个可能影响电动汽车购买决策的因素。图10b展示了一张散点图，横轴为以挪威克朗计的家庭收入中位数，纵轴为新注册电动汽车的平均占比。家庭收入中位数与市镇内电动汽车的占比呈正相关。

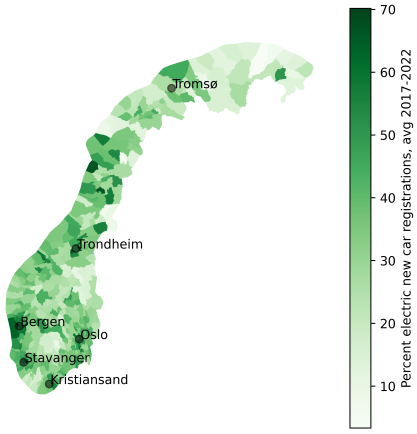


图8：该图展示了2017年至2022年9月各县纯电动汽车注册量的平均占比。人口密度较高的城市和地区，电动汽车普及率往往也较高。

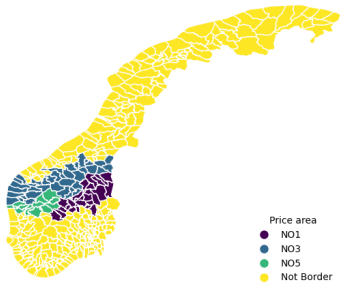
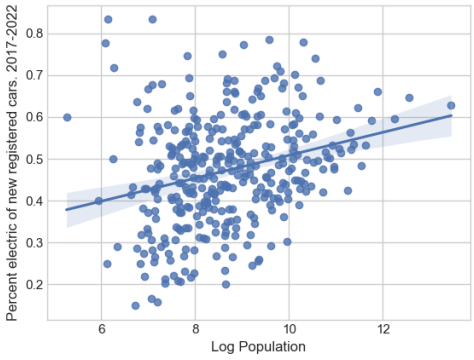
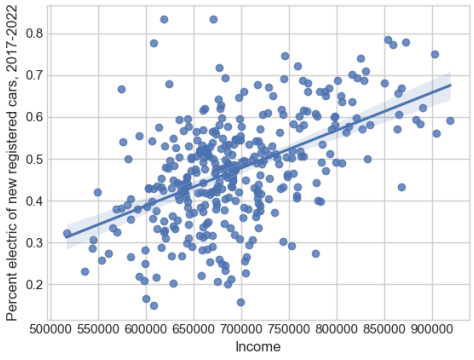


图9：挪威北部NO3电价区与南部NO1和NO5电价区边界沿线的县。在分析中，使用这些县作为样本，以改善县分配的可忽略性假设，从而帮助识别电价的效应。





(a) 按县绘制的2017—2022年电动汽车平均占比与人均平均收入的散点图。(b) 按县绘制的2017—2022年电动汽车注册量平均占比与人均平均收入的散点图。

3 简单差分估计

图11显示了高价区和低价区之间新注册电动汽车平均占比的简单差异估计值（高价区 - 低价区）。区间表示估计值的近似68%置信区间（+/- 1个标准误）。图中显示了六个估计值。第一个是2021年之前整个数据集中高价区与低价区之间的差异。这里我们得到的系数约为.075，可以解释为：平均而言，高价区售出的电动汽车占比比低价区高7.5%。如前所述，这主要反映了南部和北部电价区之间的结构性因素差异，例如人口密度和收入。左起第二个和第三个区间分别表示2021年和2022年的差异，即价格出现分化的时期。我们可以看到，南部（高价）与北部（低价）之间的差异有所下降。

从左起第四个区间中，差异仅限于2021年之前的挪威中部NO3区（低电价）和挪威西部NO5区（高电价）。这两个区域相邻，且不包括NO1中的奥斯陆大都市区。每个区域都包含一座中等规模的区域城市（西海岸的卑尔根和挪威中部的特隆赫姆）。这里的估计值约为 .15。从左起第五个区间显示的是NO5区与NO3区在2021年和2022年的差异。同样，差异幅度有所缩小。

从左数第六个估计值仅考察电价区域边境地区内高低市镇之间的差异（如图9所示）。从左数最后一个区间再次显示了边界子样本的结果，这次仅针对2021年和2022年。该区间从以.025为中心变为约-.015。

图12显示了简单双重差分估计的结果。这些差异是在2021年开始之前和之后，分别对高价区和低价区进行比较得出的。第一个区间根据整个挪威的数据计算得出，其中心值约为 -.037。将比较范围限制在 NO3 和 NO5 电价区后，如从左数第二个区间所示，估计值的绝对值有所增大。第三个区间代表对边境地区的估计，其绝对值约为 -.035 至 -.05。所有这些估计结果都支持这样一种结论：较高的电价对电动汽车购买概率具有显著效应，影响幅度大致在 3%–5% 之间。

简单差分的结果表明，价格上涨对电动汽车普及可能产生显著效应。以下各节将介绍双重差分回归模型的结果。这些模型通过明确纳入时间趋势，并控制人口和家庭收入等变量，减少偏差并提高估计的精确度。

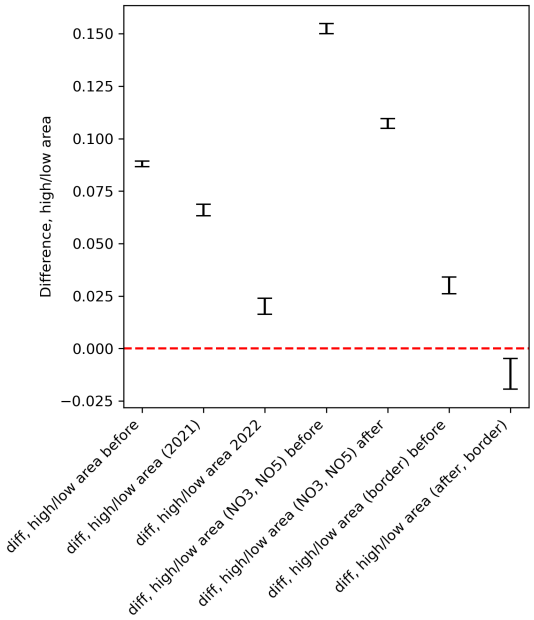


图11：2017—2022年高价区和低价区选择电动汽车的概率简单差异。带状区域表示估计值约68%的置信区间（+/- 一个标准误）。

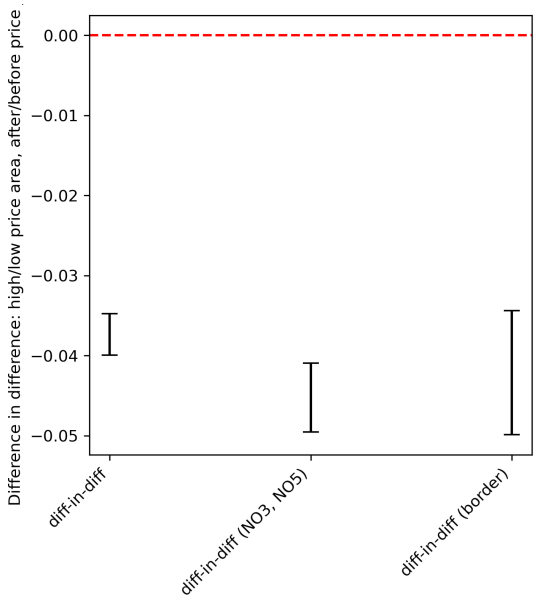


图12：低价区和高价区之间、价格分化之前和之后的简单双重差分估计值。

3.1 回归断点回归

3.2 简单双重差分回归

本节介绍双重差分回归的结果。这些回归模型明确纳入时间趋势，并在假设平行趋势恒定以及趋势斜率变化的情况下，估计价格分化的效应。可以从以下模型入手：

$$I_{ict}^{E} = \alpha + \tau timeDays_i + \gamma high_c + \zeta after_t + \eta high_c * after_t + \mathbf{X}\beta_{\mathbf{c}} + \lambda group_i + \epsilon_{ict} \quad (1)$$

此处左侧变量是二元变量 I_{ct}^{E}：如果新登记车辆为电动车，则取值为 1；否则取值为 0。该指示变量同时按时间（以天为单位）和市镇 c 编制索引。 $timeDays_t$ 是一个日历时间变量，以自 2017年首日起的天数衡量，系数 τ 表示线性时间趋势的估计斜率。 $high_c$ 是一个指示变量，用于表示某市镇是否位于 2021年年初之后经历高电价的价格区，系数 γ 可解释为电价尚未出现分化时，高价区和低价区之间的组间差异。类似地， $after_t$ 是一个指示变量：若新车注册发生在电价分化之后，则取值为 1；系数 ζ 表示在低价区，电价分化前后电动新车注册量占比的平均差异。

在低价区，电价分化前后电动新车注册量占比的平均差异。

交互项 $high_c * after_t$ 上的系数 η 表示双重差分估计量。这是价格出现分化前后，高价区与低价区之间相对差异的变化。最后，市级控制变量向量由项 $\mathbf{X}\beta_c$ 表示。具体而言，包括人口（$population_st$）和税后收入（$income_at_{st}$）指标。 st 表示这两个变量都经过了标准化处理，即减去均值后再除以标准差。由于这些变量不随时间变化，纳入它们不一定会影响双重差分估计量的点估计。不过，通过控制可能导致对照组之间不平衡的因素，纳入这些变量可以提高双重差分估计量的精度。这种简单形式的双重差分回归假设，无论是高电价区与低电价区之间，还是价格出现分化前后，时间趋势的斜率都保持不变。

表1的前三列展示了模型的结果。第一列展示挪威全境的结果。第二列将样本限定为 NO3 和 NO5 价格区，第三列则将样本限定为图9所示高价区和低价区边境地区的市镇。在涵盖挪威全境的样本中，双重差分系数的点估计约为 -.025，95%置信区间约为 -.03 至 -.021。在仅包括 NO3（低价）和 NO5（高价）价格区的子样本中，效应幅度增至约 -.034。在边境地区周围市镇的子样本中，点估计为 -.046，95%置信区间为 -.032 至 -.060。这些估计结果支持以下假设：电价上涨使电动汽车购买量占比下降了约 2% 至 5%。

通过直观观察，可以最好地评估结果的大小以及模型的整体有效性。图13以回归线叠加分箱平均值数据的形式展示模型结果。红线表示高电价区的估计回归线，蓝线表示低电价区的估计回归线。黑色竖向虚线表示2021年初，此时两个区域的电价开始出现分化。面板A展示样本包含挪威所有新注册车辆时的结果；面板B展示NO3 和 NO5电价区域的结果；面板C展示边境地区子样本的结果。结果相似。挪威南部高电价区的电动汽车普及率最初较高；南部高价区域的趋势水平保持稳定，而电价分化后，低电价区的趋势水平有所上升。

将回归线与分箱数据叠加后可以看出，平行趋势假设并不成立，尤其是在2020年后数据中。我可以放宽这一

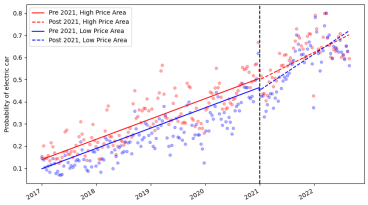
表1

	固定趋势			变化趋势	
	全挪威	NO3 和 NO5	边境地区	全挪威	边境地区
价格跳升后	0.0376	0.0394	0.0668	-0.2991	-0.4911
	(0.0025)	(0.0036)	(0.0066)	(0.0188)	(0.0424)
高价区域	0.0413	0.0565	0.0522	0.0413	0.0522
	(0.0013)	(0.0028)	(0.0040)	(0.0013)	(0.0039)
天数	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)
人口_街道	0.0591	0.1164	0.0683	0.0592	0.0721
	(0.0005)	(0.0026)	(0.0328)	(0.0005)	(0.0327)
med_收入 _at_st	0.0348	0.0796	0.0548	0.0349	0.0551
	(0.0005)	(0.0019)	(0.0027)	(0.0005)	(0.0027)
之后:高	-0.0257	-0.0342	-0.0461	0.1655	0.2355
	(0.0024)	(0.0040)	(0.0071)	(0.0209)	(0.0630)
天数:之后				0.0002	0.0003
				(0.0000)	(0.0000)
天数:之后:高				-0.0001	-0.0002
				(0.0000)	(0.0000)
决定系数	0.2113	0.2381	0.2371	0.2118	0.2396
调整后决定系数	0.2113	0.2380	0.2370	0.2118	0.2395
N	1022868	228940	64723	1022868	64723
AIC	1196342.17	264973.61	67717.68	1195764.97	67508.06
R2	0.21	0.24	0.24	0.21	0.24
调整后决定系数	0.21	0.24	0.24	0.21	0.24

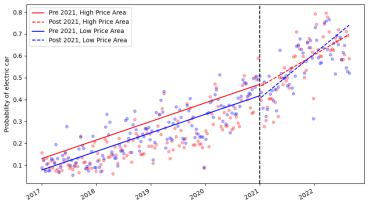


(a) 挪威全境。 (b) NO3 和 NO5 (c) 边境县

图13：双重差分回归估计示意图。



(a) 整个挪威。



(b) 边境地区。

图14：允许2021年后高、低电价区的斜率各不相同的模型结果示意图。

这一假设，但代价是失去了对双重差分估计量的清晰解释。

第四列展示了放宽时间趋势斜率恒定假设后的结果。具体而言，回归中加入了交互项 $timeDays*afterPriceJump$ 和 $timeDays*after*high$。这使得2021年价格出现分化之后，高价区和低价区的时间趋势斜率可以有所不同。各系数本身不易直接解读，但模型结果的可视化呈现在图14中。A面板展示了挪威全境的结果，B面板展示了边境地区的结果。此时，模型不再显示电动汽车普及率出现离散跃升，而是显示价格分化后低价区的趋势斜率相对上升。这可能更能体现电动汽车选择的动态变化：南部价格区域的价格上涨，而北部区域的价格保持低位。价格是随时间逐渐分化的，因此，估算单次离散跃升并不现实。

在该模型中，我仍然假设2021年前时期南部和北部电价区趋势的斜率相同。我可以通过对2021年前的数据运行模型来检验这一假设：一个模型假设时间趋势共同，另一个模型则允许时间趋势有所不同，方法是纳入时间变量与南部价格区域（“高电价区”）指示变量之间的交互效应。由于观测值超过100万，即使趋势差异很小、在实际意义上并不显著，也可能仍具有统计显著性，因此最好通过图示来评估结果。图15展示了两个模型对2017年至2020年这4年期间的预测值，同时将除时间变量以外的所有变量保持不变。针对高电价区单独估计趋势的模型斜率略大，但共同斜率这一假设似乎是合理的。

4 反事实估计的规模

在本节中，我利用上述模型结果的模拟，对高电价对电动

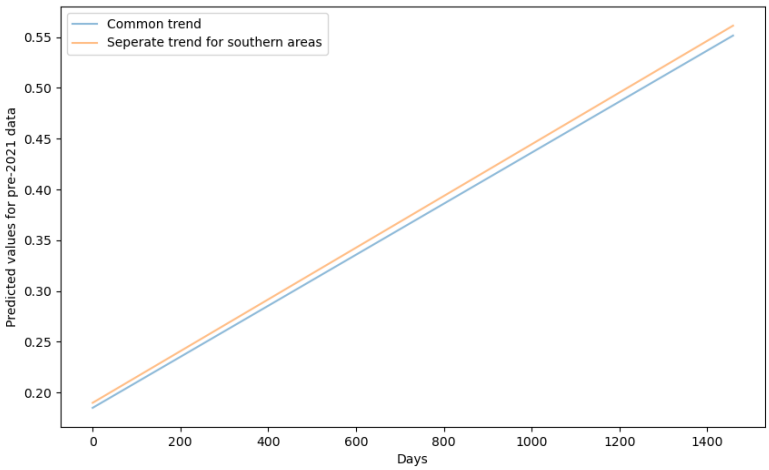


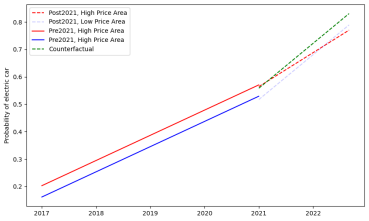
图15：该图展示了基于2021年前的数据拟合的模型预测值，分别对应设定和不设定南部和北部电价区之间的变化趋势，同时保持除天数以外的所有变量不变。假设2021年前时期具有共同斜率似乎是合理的。

汽车购买的效应大小进行近似估算。我使用允许价格分化后时间趋势的斜率变化的模型。选择这一模型，一方面是因为它似乎比趋势斜率固定的模型更能拟合数据；另一方面，该模型的系数也无法直接、清晰地解释效应大小。

我希望计算的幅度，是高价区在电价出现差异之后售出的电动汽车数量，与反事实估计数量之间的差值；后者表示如果电价与北部价格区域一样低，电动汽车的销量会是多少。图16以可视化方式呈现了这一反事实。在图中，红色虚线表示南部（高价）区域消费者选择电动汽车的平均概率。绿色线表示反事实估计的平均概率，即如果电价与北部区域一样低，消费者选择电动汽车的平均概率。主要假设是，对南部价格区2021年初的水平进行调整，而斜率则假设与北部（低价）区域的斜率相同。

反事实由方程 2 表示。这里，某一辆登记的新车 i 为电动汽车的概率用 p_i^C 表示，上标C表示这是反事实。 I^H 表示高电价区的指示变量；由于反事实仅包含南部高价区的观测值，该变量始终等于 1。 γ^H 表示高电价区估计的截距调整。ˆ δ^L 表示北部低价区时间趋势的斜率参数。

$$p_i^C = \hat{\alpha} + \hat{\gamma^H} I^H + \hat{\delta^L} t_i + \mathbf{X_i}\hat{\zeta} \tag{2}$$



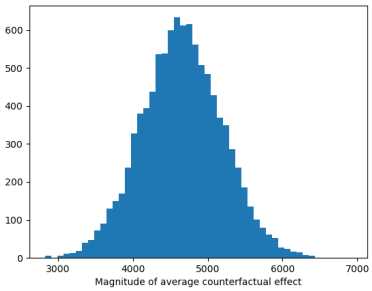


图16：反事实示意图。图17：高价带来的平均反事实效应的估计分布。假设价格区在低价区观察到的斜率变化，在价格较低时也会出现在高价区。该分布是根据.....进行多元正态分布抽样生成的。

模型估计的点估计和方差-协方差矩阵。

效应的大小 M^C 随后通过以下方式计算：将高电价区价格出现分化之后各观测值 i 的反事实值相加，再减去该时期实际售出的电动汽车数量。该计算如方程 3 所示。

$$M^C = \sum_i p_i^C - \sum_i y_i^H \tag{3}$$

模型参数存在不确定性，因此，效应大小的估计也应结合这种不确定性进行呈现。具体做法是从多元正态分布中进行模拟，该分布的均值参数和协方差矩阵取自模型结果，如方程 4 所示，其中 $\beta^{\mathbf{S}}$ 是一个由 k 个随机变量组成的向量，这些变量对应于模型中的参数。$\hat{}\ \beta$ 表示回归模型中参数点估计值组成的向量，这些值代表均值。$\hat{}\mathbf{\Sigma}$ 是模型估计得到的方差-协方差矩阵。

$$\beta^{\mathbf{S}} \sim \mathcal{N}_{\parallel}(\hat{\beta}, \hat{\mathbf{\Sigma}}) \tag{4}$$

估计的反事实效应幅度分布如图 17 所示。该分布的中心值约为 5000 辆车辆。这可以理解为：假设识别正确，如果南部价格区的价格与北部一样低，那么就会有 5000 辆额外车辆登记为电动汽车，而非汽油车、柴油车或混合动力汽车。在价格出现分化之后，南部价格区共登记了 242,000 辆车辆。因此，这代表的效应约为 2%。这一估计与早期双重差分模型得出的估计相符；在该模型中，斜率被限制为恒定。

这些计算都基于样本内预测。从技术层面而言，或许可以对未来进行预测，进而计算电价对电动汽车普及率的效应。但这些计算会面临很大的不确定性。首先，

这需要对未来电价作出假设。更根本的问题是，该模型的预测本质上是线性的。当电动汽车注册量的普及率处于中间水平时，这种简化或许可以接受。但若假设普及率遵循S形扩散过程，那么随着普及率接近饱和水平——挪威或许很快就会达到这一水平——线性假设可能并不恰当。

虽然效应显而易见，但鉴于这一时期电价差异巨大，对电动汽车选择的影响仍然有限。值得注意的是，尽管电价一度飙升至北部地区价格的100倍，挪威南部地区电动汽车的占比仍呈上升趋势，只是增速比原本可能达到的水平稍低。

5 结论

电价如何影响电动汽车的普及，在现有文献中鲜有研究。本文通过一个独特案例提供了相关证据：我们可以比较电价差异显著、但制度、政治、文化和气候因素大体相似的地区。证据表明，较高电价产生了可测量的效应：在高电价区，购买电动汽车的概率低 2% 至 5%。

从纯技术层面而言，可以尝试估算价格与采用概率之间更直接的关系，例如估算价格弹性。然而，这种估算将受到诸多不确定因素的影响。其中最值得注意的是，从决定购买某种类型的汽车（推测这一决策会考虑电价）到该汽车实际完成注册之间，存在显著且未知的滞后。因此，任何关于特定价格差异与汽车采用概率之间关系的估算，都需要作出一些强假设，进而可能产生看似精确、实则并不准确的估算。在本文中，我选择估算高电价区与低电价区之间的影响幅度。

结果中或许最值得注意的，并非电价上涨导致电动汽车普及概率下降这一结论。最简单的经济模型就能预测这一结果；考虑到对比区域之间的价差以及数据点的数量，如果没有发现任何效应，反而会令人惊讶。更重要的发现是，这种效应有多么有限。在南部电价创纪录地高企期间，电动汽车购买量在新车市场中的普及率仍持续上升，只是增速略低于低电价的北部价格区。

对这一效应较小的一种合理解释是，消费者或许理性地认为，2021年和2022年的高价格只是暂时的。在做出购买决策时，一个理性

消费者在购买一辆可能会拥有十年或更久的车辆时，会对电力价格的大幅但暂时的上涨打折看待。然而，这似乎意味着消费者的行为相较于关于消费者如何形成未来汽油价格预期的证据发生了变化。Anderson 等人（2013年）通过分析调查数据发现，消费者平均而言持有与价格不变预测相符的看法。因此，平均而言，面对较高汽油价格的消费者在做出消费决策时，往往会预测高价格将持续到未来。

另一种解释是，电动机本身的高效性、针对电动汽车的州政府补贴，以及种类繁多且价格亲民的电动汽车日益普及等因素共同作用，其影响超过了电价的效应。无论背后的机制是什么，结果似乎表明，电价上涨——即使大幅上涨——也不太可能严重阻碍乘用车电动化。

6 软件与复现

本文中的所有计算与分析均使用 Python 编程语言（Van Rossum 和 Drake，2009年）以及用于数值计算的 NumPy 库（Harris 等人，2020年）完成。Pandas 库（McKinney 等人，2010年）用于数据管理、转换和表格创建。Matplotlib（Hunter，2007年）和 Seaborn（Waskom 等人，2017年）库用于数据可视化。Statsmodels（Seabold 和 Perktold，2010年）和 Scikit-learn（Pedregosa 等人，2011年）库用于回归建模。GeoPandas（Jordahl，2014年）用于地理数据处理和地图创建。

数据和代码可应要求提供。

参考文献

Allcott, H. 和 C. Knittel（2019年2月）。消费者是否对燃油经济性了解不足？来自两项实验的证据。《美国经济学杂志：经济政策》*11*(1)，1–37。

Allcott, H. 和 N. Wozny（2014年12月）。汽油价格、燃油经济性与能源悖论。《经济学与统计学评论》*96*(5)，779–795。

Anderson, S. T.、R. Kellogg 和 J. M. Sallee（2013年11月）。消费者对未来汽油价格有何看法?《环境经济学与管理杂志》*66*(3)，383–403。

Beggs, S., S. Cardell 和 J. Hausman（1981年9月）。评估电动汽车的潜在需求。《计量经济学杂志》*17*(1)，1–19。

Bento, A. M., L. H. Goulder, M. R. Jacobsen 和 R. H. von Haefen（2009年6月）。提高美国汽油税的分配影响与效率影响。《美国经济评论》*99*(3)，667–699。Bhat, C. R., S. Sen 和 N. Eluru（2009年1月）。人口统计特征、建成环境属性、车辆特征及汽油价格对家庭车辆拥有量与使用的影响。《交通研究*B*辑：方法论》*43*(1)，1–18。Busse, M. R., C. R. Knittel 和 F. Zettelmeyer（2013年2月）。消费者是否目光短浅？新车和二手车购买方面的证据。《美国经济评论》*103*(1)，220–256。Caulfield, B., D. Furszyfer, A. Stefaniec 和 A. Foley（2022年6月）。衡量政府对电动汽车补贴的公平影响。《能源》*248*，123588。

Davis, L. W. 和 L. Kilian（2011年）。估算汽油税对碳排放的效应。《应用计量经济学杂志》*26*(7), 1187–1214. _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jae.1156.

Daziano, R. A. 和 M. Achtnicht（2014年11月）。使用多项Probit模型的贝叶斯估计和GHK模拟器预测超低排放车辆的采用情况。《交通科学》*48*(4), 671–683。出版方：INFORMS。

Desreveaux, A., E. Hittinger, A. Bouscayrol, E. Castex, and G. M. Sirbu (2020年). 电动汽车与柴油车总拥有成本的技术经济比较。*IEEE Access 8*，195752–195762。会议名称：IEEE Access。

Donna, J. D.（2021年）。衡量城市出行需求中的长期汽油价格弹性。《兰德经济学杂志》*52*(4), 945–994. _电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1756-2171.12397.

Fridstroem, L. 和 V. Oestli（2021年1月）。汽油、柴油、混合动力汽车和纯电动汽车需求的直接价格弹性与交叉价格弹性：以挪威为例。《欧洲交通研究评论》*13*(1), 3. Gillingham, K.、M. Ovaere 和 S. M. Weber（2021年3月）。碳政策与电动汽车的排放影响。Harris, C. R.、K. J. Millman、S. J. van der Walt、R. Gommers、P. Virtanen、D. Cournapeau、E. Wieser、J. Taylor、S. Berg、N. J. Smith、R. Kern、M. Picus、S. Hoyer、M. H. van Kerkwijk、M. Brett、A. Haldane、J. Fernández del Río、M. Wiebe、P. Peterson、P. Gérard-Marchant、K. Sheppard、T. Reddy、W. Weckesser、H. Abbasi、C. Gohlke 和 T. E. Oliphant（2020）。使用 NumPy 进行数组编程。《自然》*585*, 357–362. Holland, S. P.、E. T. Mansur 和 A. J. Yates（2021年8月）。电动汽车转型与禁止汽油车的经济学。《美国经济学杂志：经济政策》*13*(3), 316–344.

Hunter, J. D.（2007年）。Matplotlib：二维图形环境。科学与工程计算 *9*(3), 90–95. 出版商：IEEE。

Jordahl, K.（2014年）。GeoPandas：用于地理数据处理的 Python 工具。网址：*https://github. com/geopandas/geopandas*。

Klier, T. 和 J. Linn（2010年8月）。汽油价格与新车燃油经济性：来自月度销售数据的证据。《美国经济学杂志：经济政策》*2*（3），134–153。

Li, S.、J. Linn 和 E. Muehlegger（2014年11月）。汽油税与消费者行为。《美国经济学杂志：经济政策》*6*（4），302–342。

Li, S.、C. Timmins 和 R. H. von Haefen（2009年8月）。汽油价格如何影响车队燃油经济性?《美国经济学杂志：经济政策》*1*（2），113–137。

Mabit, S. L.（2014年6月）。税制改革和燃油价格上涨对车辆类型选择的影响。《交通研究*A*辑：政策与实践》*64*，32–42。

McKinney, W. 等人（2010年）。Python 中用于统计计算的数据结构。载于第九届 *Python* 科学会议论文集，第 445 卷，第 51–56 页。德克萨斯州奥斯汀。

Pedregosa, F., G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg 等（2011年）。Scikit-learn：Python 中的机器学习。《机器学习研究杂志》*12*（10月），2825–2830。

Sallee, J. M., S. E. West, 和 W. Fan（2016年3月）。消费者是否认识到燃油经济性的价值？来自二手车价格和汽油价格波动的证据。《公共经济学杂志》135，61–73。

Seabold, S. 和 J. Perktold（2010）。statsmodels：使用 Python 进行计量经济学和统计建模。载于第九届 *Python* 科学会议。

Van Rossum, G. 和 F. L. Drake（2009年）。《*Python 3* 参考手册》。加利福尼亚州斯科茨谷：CreateSpace。Waskom, M., O. Botvinnik, D. O'Kane, P. Hobson, S. Lukauskas, D. C. Gemperline, T. Augspurger, Y. Halchenko, J. B. Cole, J. Warmenhoven, J. d. Ruiter, C. Pye, S. Hoyer, J. Vanderplas, S. Villalba, G. Kunter, E. Quintero, P. Bachant, M. Martin, K. Meyer, A. Miles, Y. Ram, T. Yarkoni, M. L. Williams, C. Evans, C. Fitzgerald, Brian, C. Fon- nesbeck, A. Lee 和 A. Qalieh（2017年9月）。mwaskom/seaborn：v0.8.1（2017年9月）。

Yan, S.（2018年12月）。欧洲纯电动汽车税收优惠的经济与环境影响。*Energy Policy 123*, 53–63。