

德国淘汰核武器的私人 and 外部成本

斯蒂芬·贾维斯·奥利维耶·德申内斯·阿克沙娅·贾

国家经济研究局
麻萨诸塞州大道1050号
剑桥, MA 02138
2019年十二月

作者感谢怀俄明大学, 德克萨斯大学奥斯汀分校和Regensburg大学的研讨会参与者的评论和建议。作者还希望感谢加利福尼亚大学伯克利分校的图书馆, 该图书馆为完成这项研究提供了支持。本文中表达的观点仅代表作者, 不一定反映国家经济研究局的观点。

分发NBER工作文件用于讨论和评论目的。它们尚未经过同行评审, 也没有受到NBER官方出版物随附的NBER董事会的审查。

©2019 by Stephen Jarvis, Olivier Deschenes和Akshaya Jha。版权所有。文字的短小部分(不超过两段)可以在未获得明确许可的情况下引用, 但要注明出处包括©声明在内。

德国逐步淘汰核武器的私人 and 外部成本斯蒂芬·贾维斯 (Stephen Jarvis), 奥利维尔·德申内斯 (Olivier Deschenes) 和阿克沙娅·贾 (Akshaya Jha)
NBER工作文件第26598号, 2019年12月
JEL号C4, Q4, Q5

抽象

为了应对对核废料和核事故风险的担忧, 许多国家已经淘汰了核电生产。本文研究了2011年福岛核事故后德国大约一半的核生产能力停产的影响。我们使用每小时的电厂运行数据和新颖的机器学习框架来估算如果分阶段运营, 电厂的运营方式将有所不同-没有发生。我们发现, 由于淘汰而导致的核电生产损失主要由燃煤生产和净电力进口所取代。从核能向煤炭转移的社会成本每年约为120亿美元。其中超过70%的成本来自与化石燃料燃烧时暴露于当地空气污染相关的更高的死亡风险。

斯蒂芬·贾维斯 (Stephen Jarvis)
加州大学伯克利分校能源与资源小组, 加利福尼亚州伯克利94720 jarviss@berkeley.edu

Olivier Deschenes经济部2127 North Hall
加州大学圣塔芭芭拉分校圣塔芭芭拉分校93106
和NBER olivier@econ.ucsb.edu

阿克沙娅·贾
卡内基梅隆大学汉堡厅办公室2218 4800 Forbes Avenue
宾夕法尼亚州匹兹堡15232
网站: <http://www.akshayajha.com> akshayaj@andrew.cmu.edu

第五届政府间气候变化专门委员会评估报告（IPCC，2013年）和第21届联合国气候变化大会（“COP21”）都建议，核电应成为全球解决气候变化解决方案的一部分。这是因为在正常运行条件下，核能发电产生的碳排放量最少（Markandya和Wilkinson，2007年）。相比之下，燃烧化石燃料发电可导致全球气候变化和对人类健康产生负面影响的局部污染物（NRC和NAS（2010）；Jaramillo和Muller（2016）；Deschenes, Greenstone和Shapiro（2017）；Holland等（2018））。尽管如此，许多国家还是大大减少了核能发电量的份额。例如，意大利，比利时，西班牙和瑞士都制定了完全淘汰核电的政策。这在很大程度上归因于对存储核废料的长期解决方案的担忧以及公众对灾难性核事故的担忧。在1979年的三哩岛，1986年的切尔诺贝利和2011年的福岛事件之后，这些担忧大大加剧了。

许多国家逐步淘汰核生产的决定似乎表明，核电的预期成本超出了收益。然而，由于缺乏大量的经验研究来量化大规模核部门关闭对整个经济和环境的影响，因此，其中一些成本和收益仍然存在相当大的不确定性。

本文通过记录德国逐步淘汰核电对多种市场和环境成果的影响，提出了填补这一重要空白的首次尝试。特别是，我们将重点放在在日本发生福岛事故后于2011年至2017年之间关闭的德国17座核反应堆中的10座。与先前研究核电厂关闭影响的研究相比，这种情况为我们提供了许多优势。首先，也是最重要的是，德国在2011年的几个月内关闭了超过8吉瓦的核生产能力，相当于总产能下降了5%。到2017年，这已增加到总计11吉瓦的封闭核生产能力。（2016）；Severnini（2017））。

其次，德国计划在2022年之前关闭所有剩余的核反应堆。因此，我们的研究提供了有关德国逐步淘汰核武器后果的及时与政策相关的信息。第三，在欧洲范围内研究电力市场使我们有机会研究一个国家对生产的巨大冲击对跨境贸易的影响。最后，德国的核淘汰是德国大规模反核运动后采取的政治行动的直接结果，以及福岛核事故后人们对核能的感知风险突然增加（Goebel等，2015）。重要的是，淘汰不是由与德国核生产有关的经济或环境条件变化引起的。这有助于根据比较核淘汰前后经济和环境结果的条件平均值得出的因果关系解释。

本文增加了相对较小的文献，这些文献探讨了核淘汰对德国电力部门的影响。例如，Traber和Kemfert（2012）以及Knopf等人。（2014年）使用电力部门的混合经济工程模型来预测容量投资，电价和碳排放的变化。最近，格罗西（Grossi），海姆（Heim）和沃特森（Waterson）（2017年）使用事件研究框架从经济角度估算了2009年至2012年三年间2011年最初关闭核电站对电价的影响。现有的小型文献中的广泛共识是，核电主要由化石燃料生产，导致更高的电价和更多的碳排放。但是，通过关注总体结果，先前的研究忽略了核淘汰的几个重要影响范围。具体而言，我们表明，从核燃料转换为化石燃料的大部分社会成本是由逐步淘汰前后各个电厂周围局部空气污染浓度水平的变化所驱动的。

本文通过使用丰富的工厂级数据和环境污染监测数据来估算德国核淘汰的经济和环境成本，从而超越了总的电力部门。我们以几种重要方式为现有文献做出贡献和扩展。首先，我们的经验分析同时考虑了2011年最初的核反应堆关闭以及随后直至2017年底的逐步关闭。第二，除了电价和碳排放量，我们估计淘汰在空间上对生产成本，净电力进口和当地空气污染的影响。这一点尤为重要，因为将生产从核能转移到煤炭导致当地空气污染增加，占核淘汰总成本的70%以上。

接下来，我们开发了一个新的机器学习框架，以在“无淘汰”情况下得出适当的反事实结果。具体来说，我们的机器学习方法可以预测哪些电厂响应核电厂关闭而增加了产量。为此，本文提供了一种基于Davis和Hausman的新方法（2016年）以实证评估一个地点的电力生产或消费变化如何在整个输电网络中传播。这种新方法在许多不同的经验背景下都是有用的。例如，最近的研究探索了不同化石燃料发电厂的生产如何响应给定位置的用电变化，无论是插电式电动汽车（Holland et al.，2018），还是安装更多的能源高效的设备，或安置新的风能和太阳能资源（Callaway, Fowlie和McCormick（2018））。最后，我们的论文还为将机器学习与因果推理技术相结合的能源和环境经济学方面的小而不断发展的文学做出了贡献（Burlig等人。（2017）；Cicala（2017））。

我们新颖的机器学习方法将2010-2017年期间每小时观测到的电厂运行数据与大量相关信息相结合，包括电力需求，当地天气状况，电价，燃料价格和各种电厂特性。使用这些数据，我们首先简单地证明，核源的生产在2011年3月之后急剧下降。核能生产的损失被德国燃煤和天然气源的电力生产以及

周边国家的电力进口所取代。然后，我们使用我们的机器学习算法来更正式地评估核淘汰对市场结果的影响。该算法可在以下两种情况下预测每个样本小时内德国每个发电厂的发电量：一种是逐步淘汰核武器，另一种是没有逐步淘汰核武器。与上述描述趋势一致，此估算程序的结果表明，由于淘汰而导致的核电生产损失主要由燃煤生产和净电力进口所取代。

最后，我们使用了由于核停工，以计算从核电转移的成本。我们首先表明，由于淘汰，德国电力生产的每兆瓦时平均运营成本有所增加。鉴于核电厂的边际成本低于化石燃料电厂，这并不奇怪。此外，我们发现，从核电转向以矿物燃料为燃料的生产导致全球和当地空气污染排放量大幅增加。总体而言，我们估计，逐步淘汰对德国生产者和消费者的社会成本为\$每年120亿美元（2017年美元）。这些成本的绝大部分落在消费者身上。具体而言，核淘汰成本的70%以上是由于燃烧化石燃料而不是利用核源发电而导致的局部空气污染致死风险增加。

核淘汰也有好处。特别是，关闭核电厂可减少发生核事故的风险，并降低与储存核废料相关的成本（Dhaeseleer（2013）；JECR（2019））。然而，即使核淘汰的好处最大的估算远远高于我们估计的成本较小\$一年可以有12十亿美元。此外，与以前的工作一致，我们发现由于逐步淘汰，德国的电价较高。电价的上涨导致大多数电力生产商获得的利润增加，但给德国用电者带来了额外的成本。¹

尽管德国公民付出了沉重的代价，但核淘汰仍得到广泛支持。具体来说，在2015年的一项调查中，超过81%的德国居民都赞成逐步淘汰（Goebel et al.，2015）。现有证据表明，就事故可能性和死亡人数而言，普通人大大高估了核事故的预期损失（Slovic，Fischhoff和Lichtenstein（1979）；Slovic和Weber（2002）；Slovic）。（2010）。此外，与当地空气污染暴露相关的健康成本可能根本没有发生核事故的风险那么重要，尤其是在日本发生福岛事故之后。不论潜在原因是什么，世界范围内广泛的反核情绪都使得仅基于公正的收益成本分析难以制定与核电有关的政策。

本文进行如下。下一节提供了德语的背景

¹ Neidell，Uchida和Veronesi（2019）同样发现，由于福岛核电站事故后日本逐步淘汰核电，导致电价上涨。逐步淘汰引起的价格上涨导致能源消耗减少，进而导致在极冷的温度下死亡率大幅上升。

电力部门。第3节列出了用于此分析的数据来源，并介绍了核淘汰之前和之后的电价，按燃料类型生产，成本，空气污染和其他结果的描述性趋势。在第4节中，我们使用简单的事件研究框架估算了淘汰对工厂级和市场级成果的影响。我们将在第5节中描述我们的机器学习方法如何改进此事件研究方法。第6节介绍了我们对该淘汰的经济和环境影响的估计。最后，我们将在第7节中讨论研究结果的政策含义。

2 德国核电的背景

1960年代在德国建造了第一座核电站。在接下来的三十年中，德国的核生产能力迅速扩大。最后一个核反应堆于1989年投入使用。尽管在1990年代和2000年代没有新的反应堆投入使用，但在2011年前，德国约有25%的电力生产来自核电站。

长期以来，核电在德国一直是有争议的。早在1970年代就在一些提议或正在建设核设施的地点发生了抗议活动。但是，1986年乌克兰的切尔诺贝利灾难为德国的核电政治创造了焦点。具体而言，放射性尘埃影响了该国大部分地区，并引起了越来越多的公众关注。1998年，施罗德政府通过社会民主党（SPD）和绿党之间的联盟掌权。在接下来的两年中，施罗德政府禁止建造新的反应堆，并商定了完全淘汰核电的政策。该计划要求到2022年关闭所有核反应堆。

中央右翼的默克尔政府于2009年上台。该政府通过承诺延长最新反应堆的寿命来与最初的逐步淘汰政策进行协商。修订后的政策将最后一个核反应堆的关闭推迟到2030年代。但是，由于2011年3月11日的福岛事件，核灾难的阴霾再次增加。作为回应，公众对核问题的反对再次加剧，估计在3月11日之后的几天和几周内，全国共有25万人上街抗议。，2011年。由此产生的政治压力迫使默克尔福岛事件发生后，日本政府立即宣布暂停对现有核电厂进行计划中的扩建。此外，八个较旧的反应器脱机进行测试。

到2011年5月，德国决策者决定恢复原计划的版本：到2022年逐步淘汰所有核电。特别是，在2011年运营的17个反应堆中，已经暂时离线的8个反应堆立即关闭（8.4吉瓦）容量），2015年关闭了第九座反应堆（1.3 GW），2017年关闭了第十座（1.3 GW），2019年关闭了第十一个（1.4 GW），最后六个反应堆（8.1 GW）将在2022年关闭。期限于2017年结束。因此，我们的经验分析着重于2011年，2015年和2017年关闭核反应堆，而不关注随后的2019年和2022年关闭。

逐步淘汰核能是德国能源领域大范围转型的一部分，该领域被称为*Energiewende*。这项政策的主要目标是到2050年将德国的碳排放量相对于1990年的水平至少减少80%（BMW，2018）。为了实现这一目标，德国在可再生电力生产，输电网基础设施和能效措施方面进行了重大投资。*Energiewende*政策的广泛范围凸显了在评估核淘汰的影响时考虑许多潜在的时变混杂因素的重要性。这激励了我们机器学习方法的发展。

3 数据描述和统计

本文收集了来自各种不同来源的有关德国电力部门的必要数据。首先，我们获取所有产能超过100MW的发电厂每小时单位级发电量的数据。这些数据来自欧洲输电系统运营商网络（ENTSOE），仅在2015-2017年期间可用。我们用来自欧洲能源交易所（EEX）的2010-2017年按来源（例如核能，煤炭，天然气，石油等）的每小时总产量来补充这些数据。

德国的输电电网由四个不同的输电系统运营商（TSO）拥有，它们分别负责电网上的不同地理区域：Amprion，TenneT，TransnetBW和50Hertz。每个TSO都会报告每小时的产量

2010-2017年的风能和太阳能资源。TSO还提供有关在边境点进出德国的每小时电力进出口水平的数据，以及其电网部分所需的每小时总电量。这些TSO数据使我们能够构建每小时的净电力需求（总负荷减去可再生生产），以及每小时的发电量以及每个电网边界点的净进口量。

我们使用从以下两个主要来源收集的输入燃料价格和碳排放价格数据来构建每个工厂随时间的边际成本。首先，Thomson Datastream提供有关德国和邻国每日天然气价格的数据。洲际交易所（ICE）列出了每月的煤炭和石油价格，以及由欧盟排放交易系统（EUETS）设定的二氧化碳排放的每月许可价格。

我们对燃烧化石燃料发电所造成的环境成本的分析还结合了多种来源的数据。欧洲环境署（EEA）报告了每个参与EUETS的工厂的二氧化碳排放量。EEA还报告了有关燃料输入和当地污染排放的年度工厂级数据。² 站级天气数据来自德国国家气象局（DWD），本地污染监测数据来自德国环境署（UBA）。

最后，我们从各种不同的来源汇编了其他电力部门数据和电厂级别特征（Open Power System Data（2018）；BNetzA（2018）；Egerer（2016））。最值得注意的是，我们利用Thomson Datastream在德国范围内的每小时批发电价。

总体而言，我们的主要估算样本涵盖2010-2017年期间，其中包含有关批发电价，每小时总和净电力需求，按可分派来源进行的每小时生产，各个电厂的特征（包括边际生产成本）和每小时电厂的每小时数据。级生成（仅适用于2015-2017年）。

[关于这里的表1。]

表 1提供了2010年（样本的第一年）和2017年（样本的最后一年）电力部门的摘要统计数据。顶部面板显示，尽管

² 这些数据是作为监视欧盟大型燃烧工厂指令的一部分而收集的。

在2010年至2017年间关闭超过10吉瓦的核电容量后，这段期间的总发电装机容量从172.2吉瓦增长到217.6吉瓦。这主要归功于可再生能源生产能力的快速增长，从2010年的52.1吉瓦增长到2017年的112.5吉瓦（参见下图）。在2010年至2017年期间，总电力产量增长了约40 TWh。平均批发电力价格也从2010年的70.70 美元急剧下降至2017年的41.80 美元（按2017年不变美元）。最后，在整个样本期间，德国是电力的净出口国；年度净电力出口

从2010年的3.5 TWh增加到2017年的33.5 TWh。

表的中间面板 1报告了德国主要电厂类型的摘要统计数据：核能，硬煤，褐煤，天然气和石油。2011年核淘汰的规模显而易见：核源的产量在2011年后大致减少了一半。与此同时，由于关闭了较旧的电厂，燃煤电厂（硬煤和褐煤）的数量也减少了和较小的植物。但是，在我们的采样期内，燃煤电厂的产量大致保持不变；硬煤产量的小幅下降基本上被褐煤产量的增加所抵消。在煤炭价格下跌的带动下，两种类型的燃煤电厂的边际生产成本在2010-2017年期间大幅下降。2010年代也是天然气行业的增长时期：新建了26家工厂，天然气年总产量从53.6 TWh增加到72.3 TWh。附录图A.1提供了2010-2017年德国不同类型的发电量的更详细细分。

[关于这里的图1。]

图 1显示了我们样本中2011年每个电厂的估计边际成本。我们假设生物质，废物，水力发电，风能和太阳能资源的边际运营成本为零。根据对德国电力部门的先前研究，我们还假设核电厂的边际运营成本约为10 美元/兆瓦时（2017年美元）（Egerer, 2016）。最后，化石燃料厂的边际成本计算为燃料成本的总和以及因燃料类型而异的可变操作和维护成本的假设量。³

³ 使用工厂的热效率将燃料成本转换为美元/MWh：工厂将输入热量的单位转换为电能输出的程度。

图1突出显示，核电单位的边际成本始终低于化石燃料单位。核电厂实际上也不会排放二氧化碳或本地污染物。因此，我们希望关闭核反应堆将导致生产成本和污染排放量的增加。我们将在下一节使用简单的事件研究框架并在第5节中使用我们的机器学习方法来检验该假设。

4 事件研究法回归

为响应福岛核事故，德国政府于2011年3月15 日突然意外关闭了8座核反应堆。因此，我们可以使用戴维斯和豪斯曼制定的事件研究框架来分析这些关闭对市场结果的影响（2016年），最近由Grossi, Heim和Waterson（2017）实施。具体而言，我们的事件研究框架估计了在每个样本小时 t 中每种燃料的总发电量如何响应2011年3月15日前后的电力需求变化。

感兴趣的独立变量是等量间隔的净电力需求与2011年3月15 日以后的观测指标相互作用。与本文的其余部分一样，“净电力需求”定义为电力需求减去可再生能源的产量资料来源。我们考虑净需求，因为来自可再生资源的生产的边际成本几乎为零，并且是“不可分配的”：风和太阳能仅在风吹或太阳熄灭时才产生。为了实施事件研究，我们将样本限制在2011年3月15 日之前或之后不到12个月的观测值中，并估算以下回归值：

b

$$\hat{g}_{i, T} = (\alpha_i, B \cdot \mathbf{1}\{\text{大号吨} \in \mathcal{B}_b\}) + (\beta_i, B \cdot \mathbf{1}\{\text{大号吨} \in \mathcal{B}_b\} \mathbf{1}\{\text{吨} \geq 3 / 15 / 2011\text{年}\}) + \gamma m + E_{i, t} \quad (1)$$
 其中， $G_{i, t}$ 是样本小时中由燃料类型 i 产生的总电量 \tilde{T} 在德国。大号吨是在小时的净需求吨，和 $\mathbf{1}\{\text{大号吨} \in \mathcal{B}_b\}$ 是一个指标是发生在如果 $L t$ 在bin $B b$ 中，则值为1，否则为零。接着，指示器 $\mathbf{1}\{\text{吨} \geq 3 / 15 / 2011\text{年}\}$ 如果观测值对应于一个采样小时或之后的一个小时的采样，则取值一2011年3月15 日，否则为零。最后，我们有一个月的年固定效应（即： γ 米）和集群标准误差由周的样本。

图 2绘制了感兴趣的系数估计值（即：

β^L b) 与它们95%的沿

置信区间。该图的面板 (a) 显示, 在所有净需求水平上, 核能的平均每小时发电量下降了约5 GWh。小组 (b) - (d) 表明, 核燃料生产的这种损失在很大程度上被化石燃料火源的电力生产增加所抵消。具体而言, 在净需求水平较低的情况下, 褐煤的产量平均增加了约1 GWh。在所有净需求水平上, 硬煤产量平均增加2-3 GWh。最后, 燃气发电量平均也增加了约2 GWh, 对于净需求非常高的采样小时, 燃气发电量也增加了6 GWh。

[关于这里的图2。]

虽然这些结果提供了对数据的简单检查, 但事件研究方法在我们的上下文中有一些局限性。首先, 在2015年之前无法获得每小时的工厂级发电量数据。因此, 事件研究框架无法用于探讨不同工厂如何应对2011年开始的核淘汰的异质性。这种异质性尤其重要, 因为在使用相同类型燃料的工厂之间, 每兆瓦时生产所产生的局部空气污染量可能有很大差异。此外, 当地空气污染排放造成的金钱损失也直接与遭受这种污染的人数有关。根据生活在这两家工厂附近的人口数量, 来自两个不同工厂的相同水平的污染物排放可能造成非常不同的损害。

其次, 事件研究框架所依据的假设是, 2011年3月15日前后电厂运行的变化是由核反应堆关闭引起的, 而不是决定生产行为的其他因素的变化。为确保这一假设成立, 我们在2011年最初的停工前后的相当狭窄的窗口中研究了逐步淘汰的影响。着眼于这个狭窄的窗口, 我们可以争辩说, 企业只能在短期内通过调整产出来应对核停工。但是, 随后的核电站停工逐步发生, 并已预先宣布。因此, 企业可能已经能够采取行动来预期这些以后的关闭。

最后, 如本节所述 3, 其他重要的经济因素在我们的2010-2017样本期内也发生了变化, 与2011年的核淘汰无关。例如, 煤炭和天然气工厂的边际成本在2011年相近。但是, 煤炭价格从2011-2015年急剧下降而在此期间天然气价格上涨。因此, 即使没有核电生产的任何变化, 从2011年至2015年, 燃煤电厂更有可能代替天然气电厂进行生产。此外, 2010年至2017年期间, 许多老旧的燃煤和天然气工厂都已退休, 在此期间也有许多新的化石燃料发电厂上线。综上所述, 2011年3月之前和之后的市场结果不太可能仅由逐步淘汰来驱动, 尤其是在2011年停产决定之后, 我们将进一步展望。

5 机器学习方法

5.1 方法

我们使用机器学习方法来更可靠地估计2011年至2017年间发生的一系列核电厂关闭事件对市场和环境的影响。与上一节中讨论的事件研究框架相比, 这种机器学习方法具有两个优势。首先, 2015年之前无法获得每小时的工厂级发电量数据; 因此, 我们使用按燃料类型划分的每小时总发电量数据来估计事件研究的回归。正如我们前面提到的, 工厂级别的异质性对于估算当地空气污染暴露造成的破坏尤为重要: 燃烧相同类型燃料的不同工厂可能具有不同的排放因子和附近居住的人口数量。

其次, 如前所述, 与电力生产决策相关的各种经济因素会随着时间的推移而独立于核淘汰而改变。事件研究框架为我们提供了控制这些因素的有限能力。相比之下, 机器学习方法使我们能够估计核淘汰对控制广泛范围内的工厂级经济和环境成果的影响观察到的市场因素的范围。

重要的是, 我们的机器学习框架的目标是针对不同输入变量值最佳预测市场结果。这与传统的经济学方法有两个不同之处。首先, 我们不试图确定一个变量对另一个变量的因果关系。其次, 尽管我们能够为我们的估计提供界限, 但事实证明, 在没有治疗和对照组随机分配的情况下, 无法从机器学习模型的预测中得出标准误差 (Wager和Athey, 2018年)。综上所述, 我们的机器学习算法为我们提供了比事件研究方法更为准确的结果, 但其代价是无法进行某些推断。

5.2 数据

我们使用大约450万个观测值的数据集训练机器学习算法，以预测电厂的运行情况。感兴趣的结果是样本中每个“可分派”工厂每小时产生的电量。我们从电力需求中减去“不可调度”的可再生能源输出，因为可再生能源的边际成本几乎为零，因此只要自然条件允许（例如，太阳熄灭或风在吹拂），便进行生产。自2015年以来，ENTSOE可提供所有欧盟成员国的每小时工厂级发电量数据。⁴ 通过将每个边境互连点都视为一个发电厂，我们将德国与邻国之间每个边境互连处的电力进出口都纳入了我们的框架。例如，考虑从法国到德国的每小时净电力进口。如果法国向德国出口100兆瓦时的电力，那么这个边界点将“生产” 100兆瓦时。相反，如果法国从德国进口100兆瓦时的电力，该边界点将“产生” -100兆瓦时。

我们的机器学习框架中考虑的因变量是样本中每个电厂的生产水平和边界点。在所有情况下，我们通过将输出除以每个发电厂的最大生产能力或边界点的最大传输能力来归一化相关因变量

⁴ 更具体地说，该数据可用于容量大于100 MW的电厂。这涵盖了核电厂100%的产量，褐煤厂95%的产量，硬煤厂的85%，天然气厂的50%和石油厂的45%。我们将这些电厂的运营行为视为容量小于100MW的其余电厂的代表。

适用时。我们的算法着重于0到1之间的因变量；当应用该算法时，我们将边界点的流量从其原始比例-1/1缩放为0/1。我们将此重新换算后的输出称为每个电厂的开工率。

这些独立变量包括电力需求，当地天气，每个电厂的边际成本，其他电厂的可用性以及各种电厂特征，例如燃料类型，效率，技术和位置。我们估计了一个预测模型，该模型将这些独立变量作为输入，并输出每个电厂每小时的预测运行率。重要的是，我们拥有2010-2017年间这些自变量的数据。这使我们可以使用我们的模型预测2010-2017年的每小时工厂级发电量，尽管仅观察2015年以后的每小时工厂级发电量。

我们还为电价批发建立了预测模型。但是，这些价格没有横截面变化。在德国，每小时的批发电价是相同的。在这种情况下，电价时间序列模型的自变量包括电力需求，全国平均天气以及与边际单位相关的边际成本（即：边际成本最大的单位，其产生正数）。采样小时）。

5.3 经验方法

我们使用随机森林回归算法（Breiman, 2001）预测结果。特别是，我们使用分位数回归森林算法（Meinshausen, 2006）。由于我们的经验，随机森林尤其适合我们。首先，每个工厂的生产都基于多种因素的潜在复杂组合，例如其他工厂的边际成本和可用性，不同地点的电力需求以及输电限制。因此，工厂级生产与上面列出的自变量之间的关系很可能是非线性的，并且包含多个相互作用。随机森林方法非常适合使用数据中的变化来发现这些相互作用，而不是像多项标准中那样使用多项式或样条预先指定独立变量和因变量之间的关系回归框架。⁵

此外，随机森林算法可确保对可能的结果预测的支持受限于训练数据集中结果值的支持。这可以防止无意义的预测，例如植物产生负电量或产生大于其能力的植物。最后，使用分位数回归森林算法使我们能够对结果的全部条件分布进行预测，而不仅仅是预期值。此属性既可以使我们更好地理解分析中的不确定性，也可以进行更正以确保我们的预测结果满足某些物理约束（例如，电力供应等于电力需求）。可以在附录B中找到更多详细信息。

我们使用分位数随机森林模型构建两个数据序列。首先，我们使用自变量在2010-2017年期间的观测值，预测每个可调度工厂（即每个化石工厂或边界点）的每小时工厂级发电量。这为我们提供了在有核淘汰的“工厂”情景下每个工厂的发电量。我们注意到，即使在实际上，机器

学习模型对于估计工厂级别的产量也是必要的，因为在2015年之前没有每小时的工厂级别的产量数据。

其次，在没有核淘汰的反事实情况下，我们使用该模型估算同一组可调度工厂的每小时产量。换句话说，我们假设假设在2011年，2015年和2017年关闭的核反应堆将一直运行到2017年，那么我们将预测电厂的生产水平。为此，我们首先计算这些核电厂的发电量如果他们仍然在线，则在每个采样小时内⁶ 我们从净电力需求中减去了这一反事实的核输出，从而减少了其余可调度工厂的产量。在我们的主要规格中，我们保留了所有其他独立变量，这些变量不取决于固定在其观察值上的净需求

⁵ Mullainathan和Spiess (2017) 在其预测住房价值的应用中报告说，在评估的各种方法（例如OLS，回归）中，随机森林方法得出的最准确的预测是通过样本外 R^2 测得的树，LASSO和合奏）。

⁶ 我们假设被关闭的核电厂平均将以其产能的80%运行。我们之所以选择这种相对保守的80%的开工率，是因为已关闭的核电站往往比较老。较新的核电厂通常可达到90-95%的开工率。我们根据观察到的2012年至2014年每月核总产量的波动来调整这种反事实的核产量，因为在此期间没有核停产。这种调整主要反映出这样一个事实，即核电厂往往在需求最低的夏季月份进行维护。

价值观。自然而然的担心是，淘汰导致其他自变量的变化，例如其他工厂的可用生产能力。我们将在第5.5 节中讨论为解决此问题而实施的各种敏感性分析。有关我们的机器学习算法实现的更多详细信息，请参见附录B。

最后，我们使用有核淘汰和无核淘汰的每个工厂的每小时预测发电量来计算不同的市场和环境结果。尽管我们的博览会主要关注每小时的工厂级生产，但我们采用了类似的方法来评估逐步淘汰对批发电价的影响。

5.4 模型验证

本小节提供了将观察到的结果与我们的机器学习算法预测的结果进行比较的图表。

[关于这里的图3。]

图 3报告了2017年每兆瓦时美元的每日平均观察价格与预测的批发价格以及两者之间的差异（即预测误差）。显然，机器学习模型提供了非常准确的预测；在整个时期内，观察到的价格与预期价格之间的差异几乎为零。但是，根据观察到的平均每日价格对预测平均每日价格的回归，调整后的 R^2 为0.98。

图 4 (a) 将观察到的每小时工厂级别的运转率（即，利用的产能百分比）与机器学习模型的预测值进行了比较。具体而言，将预测的发电量（在y轴上缩放）相对于观察到的发电量（x轴）作图，以便在45度线上的观察表明完美的预测精度。图中的每个像素代表以2%的增量表示的预测运行速度与实际运行速度之间的关系，而较暗的区域则表示更多的工厂小时（或工厂年）观测值。

我们检查了样本外交叉验证的性能，以避免过拟合，并公平评估模型用于做出预测时的表现。我们的反事实无淘汰方案。交叉验证的样本外 R^2 为0.61，均方误差（MSE）为0.061。⁷

但是，即使是很小的预测误差水平也低估了机器学习模型的相关预测精度。具体来说，我们将主要使用模型中的预测来比较在工厂月份和工厂年度水平上有或没有淘汰的结果。因此，我们还在这些聚合级别上评估了模型的预测性能。具体而言，图 4 (b) 绘制了预测与观察到的年平均开工率之间的关系。如图所示，性能显着提高，大多数观察结果都集中在45度线附近，系统误差区域在很大程度上消失了。交叉验证的样本外 R^2 上升到0.93，均方误差下降到0.006。⁸

[关于这里的图4。]

作为交叉验证的样本外 R^2 和MSE 的替代指标，我们还通过测试预测的每小时工厂级生产量的变化是否与附近附近环境空气污染的观测值相关来评估机器学习预测的准确性。显示器。为此，我们使用了德国空气污染监测仪在整个2010-2017年分析期间的数据；我们将每个发电厂与三个最接近的空气污染监测仪进行匹配。9具体而言，我们构建了工厂级空气污染浓度的日常测量，作为这三台显示器的读数的距离加权平均值的倒数。然后，我们估计每日平均环境污染浓度对每日总工厂级产量的面板回归。我们包括工厂固定效应，年度固定效应和年度固定效应，以控制空气污染和电力生产的季节性以及特定于工厂的排放强度。

[关于这里的表2。]

表 2报告了此分析的结果。每行报告系数估算值，

7

相比之下，具有相同自变量的简单OLS回归只能实现0.37的样本外 R^2 和0.091的均方误差。

8

具有线性协变量的简单OLS回归仍然明显不如 R^2 的样本外0.63，MSE为0.025。

9

电厂与最近的空气污染监测仪之间的平均距离为6.5公里，范围为0.25公里至31公里。

以及按工厂分类的标准误，来自5种空气污染物的单独回归： PM_{10} ， $PM_{2.5}$ ， SO_2 ， CO 和 NO_2 。为了便于解释，将因变量和工厂级别的生产变量标准化为均值0和标准偏差1。这些列对应于不同的估计样本。第（1）列来自模型，其中因变量是标准化的2015年至2017年观察到的每日工厂生产水平。在第（2）列中，因变量是在2015-2017年同期的标准化预测日产量，在第（3）列中，因变量是在2010-2017年整个时期的标准化预测产量。评估随机森林预测算法有效性的关键比较是在第（1）栏和第（2）栏之间。第（1）列中的估算值证实，除以下各项外，所有污染物的每日生产量增加与污染物浓度水平的增加相对应 SO_2 。例如，平均每日生产量的标准偏差增加导致 PM_{10} 的平均每日浓度增加0.13标准偏差，或使每日浓度大约增加1%。

第（2）列使用随机森林模型预测的每日植物水平产量作为因变量来重复分析。使用观察到的结果，得出的系数估计值在大小上相似，并且显示出与列（1）中的规格相同的模式和统计学意义。最后，第（3）列报告了估算值，该估算值评估了整个2010-17样本期内预测预测对污染水平的影响。第（3）栏中记录的这些估计与第（1）和（2）栏中的估计相似。两者合计，见表2提供的证据表明，额外的电力生产会导致更高浓度的环境空气污染物。更重要的是，该表还提供了证据，表明即使在我们没有工厂级生产数据的2015年样本期之前，我们预测的工厂级生产估算也是准确的。

5.5灵敏度分析

本小节描述并激发了我们进行的三种敏感性分析，这些敏感性分析与我们构造反事实的无核淘汰情景有关。这些分析的全部结果在6.4节中描述。在我们的主要规格中，我们假设淘汰的影响仅通过减少已关闭的核电厂的发电量来实现。换句话说，我们假设该模型中其他观察到的因素不会因淘汰而改变。这个假设对我们的许多预测指标都很有意义，例如工厂特征，温度和需求季节性。但是，其他因素可能会因淘汰而发生变化。例如，逐步淘汰可能导致零售价上涨，进而可能降低总电力需求。再例如，在更长的时间范围内，逐步淘汰可能加快了对新替代生产能力的投资。我们通过证明我们的结果对由于逐步淘汰而可能改变的各种因素的敏感性来解决这些问题。

我们的第一个敏感性分析重点在于核淘汰如何影响对化石燃料发电能力的投资。先前的研究表明，如果不进行淘汰，即使到德国的高峰时段，也要确保满足需求所必需的化石燃料发电量到2020年将减少4吉瓦（Traber和Kemfert，2012年）和到2030年降低8吉瓦（Knopf等人，2014）。产能下降的原因可能是由于正在建造的新化石工厂减少或早期关闭的现有旧工厂。为了捕捉到这一点，我们计算了到2020年（2030年）这一4GW（8GW）的减少将如何影响我们在2010-2017年采样期间的化石燃料发电容量。10然后，我们针对反事实的无淘汰方案重新运行分析，从而每年从系统中删除了相关的化石产能。

另一项敏感性分析解释了这样一个事实，即在无核淘汰的情况下，对可再生能源生产进行投资的动机可能不那么强烈。为此，我们针对无淘汰情景重新运行了机器学习预测模型，假设可再生能源产量到2017年将降低30 TWh。我们根据德国可再生能源目标的变化选择了30 TWh，以应对淘汰决定。具体来说，2010年，德国计划到2020年至少将其30%的电力来自可再生能源。但是，根据2011年的淘汰决定，该目标提高到了35%（Jacobs，2012年）。这两个目标之间的差异要求在2010年之间将可再生能源生产变化约30 TWh

10 假设从2011年到2030年，化石发电量每年下降0.4 GW，到2020年（2030年）将化石发电量减少到4GW（8GW）。对于我们的2010-2017年分析期，我们进行了以下修改：韦斯威勒（Issching）于2012年（而不是2011年）开业，D）在2011年而不是2012年关闭，Boxberg在2013年而不是2012年打开，KW Walsum在2014年而不是2013年打开，曼海姆（3和4街区）于2012年而不是2015年关闭，韦斯特法伦（E街区）在2015年关闭从2014年开始，韦斯特法伦（C座）在2015年而非2016年关闭，穆尔堡（A和B座）在2018年而非2015年开业，而KW Voerde（A和B座）在2016年而非2017年关闭。

和2017年。对于无法逐步淘汰的反事实，到2017年将可再生能源生产减少30 TWh，相当于净电力需求增加8%。我们认为，净电力需求增加8%是一个相对较大的反应。11 因此，此敏感性分析表明，考虑到逐步淘汰可再生能源投资的上限时，我们的结果将如何变化。

最后，人们可能会担心逐步淘汰会提高批发电价，进而降低消费者需求。我们认为，我们的第二敏感性分析应该可以缓解这种担忧。具体来说，如上所述，由于淘汰，净需求增加了8%，这是一个非常大的响应；由于逐步淘汰，消费者需求不可能超过8%。实际上，批发价格的变化完全不会对客户需求产生太大影响是合理的。这是因为占德国总需求约一半的商业和住宅客户具有高度的价格弹性。批发电价仅占整体零售价的四分之一，其余为网络费，可再生补贴费和税费（BNetzA，2018）。尽管较大的工业客户可能更具价格弹性，但其电力需求的变化极不可能导致总净需求的变化超过8%。因此，我们的第三次敏感性分析侧重于可再生能源变化引起的净需求变化，这也有助于解决人们担心逐步淘汰会通过批发价格变化影响消费者需求的担忧。

6 社会成本和核淘汰

本节介绍了核淘汰所产生的全部影响的主要结果。具体来说，我们使用机器学习模型的预测结果比较了有无核淘汰的市场和环境结果。

11 例如，以前的逐步淘汰工作假设由于核电厂关闭而导致可再生能源投资没有加速（Traber和Kemfert（2012）；Knopf等人（2014））。此外，由于淘汰而导致的批发电价上涨不太可能影响可再生能源发电投资的盈利能力。这是因为德国的所有可再生能源发电能力都是通过上网电价补贴的，上网电价可以保证所生产的电力高于市场价。

6.1 淘汰的私人成本和收益

本小节研究核淘汰对批发电价，电力生产，收入和运营成本的影响。所有货币单位都从名义欧元转换为固定的2017年美元。

[关于这里的图5。]

图5显示了我们对于核淘汰对电力生产和批发价格影响的估计。其中首先是图5（a），其中报告了在没有淘汰政策的情况下，预测产量和净进口量（单位为TWh）的月平均差异。我们报告化石燃料发电量（灰色菱形），净进口量（红色圆圈）和核能生产量（紫色正方形）的月平均差

异。垂直黑色虚线标志着2011年3月开始核淘汰；在此之前，“有”减去“无”的淘汰差异为零。通过建造，我们发现每月的总核生产量明显减少了3-5 TWh。这种影响的周期性主要是由于核反应堆通常在夏季安排其维护和加油中断的事实。

逐步淘汰还导致以化石燃料为燃料的电力生产大量增加，每月增加2-3 TWh，净电力进口量增加幅度较小。重要的是，这些增长的计算是考虑到我们样本期内可再生能源生产的增长。图 5 (a) 的另一个显著结果是，从2011年3月开始，化石生产的急剧增长在我们整个采样期间一直持续。

图5 (b) 的结构类似，并报告了核淘汰对2017年每兆瓦时美元电价的影响。估计清楚地表明，逐步淘汰的价格导致批发价格上涨，范围从每兆瓦时0.5美元到8美元不等。图5 (b) 的另一个关键结果是，批发价格的上涨一直持续到2017年底，这与化石燃料发电的情况类似。最后，该图还显示，逐步淘汰可能加剧了价格的暴涨，例如由于欧洲异常寒冷的天气导致2017年1月价格大幅上涨（欧洲委员会，2017年）。

[关于这里的表3。]

表3中的第 (1) 列通过报告在逐步淘汰的情况下的年平均预测批发电价和发电量来补充图 5中的信息。第 (2) 栏报告了在不逐步淘汰的情况下，这些预测结果。列 (3) 报告前两列之间的差异，列 (4) 通过将列 (3) 除以列 (1) 来提供此估计效果的百分比。该估算显示，淘汰造成的通胀调整后的批发电价通过增加\$ 1.80的相对增加3.9%，每兆瓦时的平均值，以在不发生逐步淘汰，将占了上风价格。与图一致如图5 (a) 所示，在淘汰期间，核能平均每年下降53.2 TWh，相当于下降38%。接下来的行分解了以前记录的按来源划分的化石产量增长。从绝对值和百分比来看，最大的增长来自硬煤和天然气生产。具体来说，硬煤的年平均产量增加了28.5 TWh (32%)，而燃气产量增加了8.3 TWh (26%)。最后，逐步淘汰导致净进口量平均每年增加10.2 TWh (37%)。总而言之，2011年的淘汰导致德国的发电结构发生了巨大变化。

[关于这里的表4。]

表4再次检查了核淘汰对发电厂财务结果的影响，并再次按植物燃料类型进行了分类。我们报告了预测的年度平均收入，运营成本和运营利润。收入以工厂级生产和批发电价的乘积计算；因此，我们忽略了工厂可能获得的任何其他收入，例如产能付款，辅助服务付款，补贴等。运营成本是每个工厂每小时生产量及其每小时边际成本的乘积。最后，营业利润就是营业收入减去营业成本。对于净进口，我们将收入和成本量化为电力净进口乘以相关邻国的批发价。12 表中的所有条目4是每年十亿美元（2017 USD）。

12 我们的分析隐含地假设逐步淘汰不会导致邻国的电价发生变化。对这些相互联系的国家中的每一个进行完全的电力市场建模将需要大量的额外数据收集。考虑到国内生产在满足德国电力需求方面的主导作用，这种额外的模型也不太可能显著改变总体结果。最后，由于逐步淘汰，互连电力市场的价格可能会上涨，因此我们的净进口成本估计可能会处于下限。

核淘汰对拥有被关闭核电站的公司的收入和营业利润有很大影响。具体而言，在所有核电厂年平均收入下降了\$ 2.2十亿每年。由核电厂获得的年平均营业利润下降了\$ 1.6十亿（减少35%）。这种下降是惊人的，特别是考虑到它保持开放的核电厂所赚取的收入增加，因此能够从批发电价上涨中受益。

先前关闭的核电站以前获得的收入主要重新分配给化石厂，最主要的是硬煤和天然气厂。由于核电厂每兆瓦时的运行成本比化石电厂低得多，因此发生这种变化的比例不到一比一。尽管如此，在植物化石年均营业利润增长了约\$ 0.4至\$ 0.3十亿由于分别淘汰在褐煤和煤电厂。这相当于分别增加了17%和64%。

电力生产商之间的利润再分配对围绕淘汰政策的政治经济产生了有趣的影响。特别是，在德国拥有核电厂的四家大型公司显然在私下和公开场合都反对该政策。但是，有两个重要因素可能削弱了他们的反对意见。首先，只有这些公司缴纳核燃料税，才被允许在2030年代之前运营其

核电站。核燃料税将使这些核电厂赚取的大部分超边际租金征税。其次，拥有核电厂的四家公司在德国和整个欧洲也拥有大量化石电厂。如我们所见，这些化石工厂因淘汰核武器而获得了更大的利润，

6.2 核淘汰的外部成本和收益

本小节对环境成本进行了两个单独的分析，这些环境成本与前一小节中记录的逐步淘汰化石燃料燃烧的生产引起的增长有关。具体而言，燃烧化石燃料既排放全球性污染物，例如导致气候变化的二氧化碳，又排放不利地影响裸露人群健康的局部污染物。

6.2.1 使用报告的排放率估算外部损害

首先，我们估算由于淘汰而导致的碳排放量变化。为了继续进行，我们计算了每家工厂燃烧的燃料量的变化，这与淘汰对每家工厂每小时的生产量产生了影响，并利用每家工厂的热效率（即：工厂将输入的热能转化为输出电能的程度如何）进行计算。然后，我们使用行业报告中记录的不同燃料的碳强度，将燃烧的燃料的变化转换为工厂级CO₂排放的变化。¹³

我们还估计了由于淘汰导致的工厂生产水平变化而导致的局部污染排放变化。与CO₂排放方法类似，我们使用欧盟大型燃烧设备指令（LCPD）中每种本地污染物的工厂级排放率，将燃料使用变化转化为排放变化。LCPD数据库提供有关燃料输入和二氧化硫（SO₂），氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM）排放的年度工厂级数据。LCPD数据涵盖了德国绝大多数的大型化石植物。¹⁴ 我们根据LCFP数据库中未包含燃料类型的工厂的平均排放因子为少量的排放因子分配排放因子。

接下来，我们将通过CO₂和当地空气污染排放造成的损害货币化。对于CO₂，我们假设碳的社会成本为\$ 50 / tCO₂，则可以通过货币化赔偿。为了评估当地空气污染增加对健康造成的损害，我们依靠两项评估欧洲当地污染对健康的影响的研究（EEA, 2014; Jones et al., 2018）。特别是，琼斯等。（2018）提供了对欧洲大约400家最大的燃煤电厂排放的当地空气污染造成的年度健康损害的估计。我们使用这些数据来转换我们预测的工厂级SO₂，NO_x吨增加量和PM排放转化为货币化的健康损害。¹⁵

¹³ 我们使用的碳强度，硬煤为93.6 tCO₂ / TJ，天然气为55.9 tCO₂ / TJ，石油为74.0 tCO₂ / TJ。我们考虑褐煤的三种不同强度，具体取决于工厂从中获取煤炭的采矿区域。它们分别是113.3 tCO₂ / TJ（莱茵河），111.2 tCO₂ / TJ（卢萨斯）和102.8 tCO₂ / TJ（中部）。

¹⁴ 具体来说，数据涵盖了99%的褐煤产能，98%的硬煤产能，90%的天然气产能和91%的石油产能。

¹⁵

具体来说，我们假设德国某家化石燃料发电厂的排放增加产生的健康损害与我们估计有健康损害的最近位置所产生的损害相同。我们数据集中每个发电厂与有损坏估计的400个地点之间最接近的平均距离为29公里。中位数是14公里。琼斯等。（2018年）提供了我们数据集中约10%的燃煤电厂的估计值，并指出这些电厂是欧洲400家最大的燃煤电厂之一。

[关于这里的表5。]

表 5给出了此分析的结果。具体而言，此表报告了CO₂的燃料特定年度排放量（兆吨，Mt）以及三种本地污染物的排放：SO₂，NO_x和PM（千吨，kt）。迄今为止，褐煤和硬煤是两个最大的污染源，占排放量的90%以上。就排放造成的金钱损失而言，褐煤和硬煤也贡献最大，据报道每年有数十亿美元。

总体而言，逐步淘汰导致每年的CO₂排放量增加了36.3Mt。与没有核淘汰的情况相比，这相当于增加了13%。CO₂排放量的增加主要归因于硬煤发电厂的排放量增加了25.8 Mt，其余部分为褐煤和天然气。在碳的社会成本估价碳排放\$ 50 /吨CO₂，在估计气候变化损害了淘汰结果\$ 1.8十亿。

逐步淘汰还导致我们考虑的三种本地空气污染物（SO₂，NO_x和PM）的总排放量增加了约12%。同样，这种增加主要是由于硬煤工厂的排放增加。表 5 的底部面板报告了所有三种本地空气污染物的年平均死亡率损失总和。从2010年至2017年，化石工厂造成的当地污染排放约占每年造成 650亿美元的死亡成本。\$ 8.7十亿该年死亡率成本可以归因于核淘汰，较损失增加了15%，相对于场景没有核淘汰。¹⁶换句话说，逐步淘汰会导致每年因增加SO₂，NO_x和PM的浓度而导致1100多例死亡。硬煤工厂产量的增加再次成为主要动力，占死亡率影响增加量的大约80%。

6.2.2 使用环境空气污染物监测仪估算外部损害

除了使用燃料输入量和报告的排放量来计算损害，我们还使用附近监测站的工厂级生产与记录的空气污染之间的估计关系来计算损害。我们已经证明了

16 我们使用德国的统计寿险价值790万美元，取自Viscusi和Masterman (2017)。

在较高浓度的PM的增加的化石燃料燃烧生产结果10, PM 2.5, CO和NO₂ 在表 2。在此subsubsection, 我们估计在预测的生产日常工厂级环境空气污染的每日监测级回归2010-2017年的样本期：

$$P = a + \beta \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}} + \mu \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{我}}} + \delta \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{米}}} + \delta \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\dot{y}}} + \ddot{u} \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{I, d, M, Y}} \quad (2)$$

其中P

在第d天的第i个月记录到工厂附近的空气污染浓度

m和y年。17 “PO”上标表示在实际情景中核淘汰已对污染进行了测量。

\ddot{y}
 $\overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

表示每日电力生产在植物我, 搭载燃料小号, 在

实际淘汰方案。针对每种燃料类型s分别估算感兴趣的系数 β , 以说明褐煤, 硬煤, 天然气和石油工厂的不同污染强度。我们包括工厂固定效应 ($\mu \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{我}}}$), 以控制与工厂生产条件相关的局部空气污染相关的工厂特定因素, 例如是否存在污染消除技术。我们还包括一个月的年固定效应 ($\delta \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{米}}}$) 和一年的样本外固定效应 ($\delta \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\dot{y}}}$) 为空气污染和电力生产趋势和季节性的控制。

回归系数 β 小号捕获如何从燃料型生产一兆瓦时增加小号影响当地的空气污染浓度水平。估算由于淘汰而导致的当地空气污染变化 (通过其对电力生产的影响

在工厂i) 上的归纳, 我们将每个系数估计值相乘通过

β 淘汰驱动

在工厂的生产改变我, 燃料燃烧小号。形式上, 我们计算 $\Delta P O L L \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

$\beta \times (Y s$

=

$\overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

$\overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}} - \overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

- $\overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

$\overset{PO}{\underset{i, s, d, m, y}{\text{小号 } \ddot{y}}}$

) , 这是由于

逐步淘汰导致工厂使用化石燃料的产量增加（使用s）。

我们使用ESCAPE项目（Lancet 2014）的剂量响应估算值来计算由于空气污染浓度增加而导致的过早死亡率增加。18 具体来说，ESCAPE项目报告了PM 2.5 暴露为X 时的死亡率

当PM 2.5暴露量为X微克每立方米时，每立方米+ 5微克除以死亡率。对应的危险比为10微克

17 和以前一样，我们将每个工厂的污染计算为距离该工厂最近的三个污染监测仪的测量值的距离加权平均倒数。
18

欧洲空气污染影响研究队列（ESCAPE）是为数不多的有关空气污染的研究之一
欧洲空气污染对健康的影响。它基于22项欧洲队列研究，研究人群总数超过350,000。
每立方米NO 2的增加为1.01。19

(

\ × × × -

基于这些危险比，我们可以使用以下公式计算由于淘汰而导致的额外空气污染导致的死亡率增加：

$$VSL \cdot POP \cdot MR \cdot 11 \quad (3)$$

实验值 ($\rho \hat{J} \Delta P OLL \hat{J}$)

对于j = PM 2.5或NO 2。与上一小节相同，用于逐步淘汰因逐步淘汰导致的空气污染增加而导致的过早死亡的货币化统计生命（VSL）的价值为790万美元（Viscusi和Masterman, 2017年）。POP和MR是暴露人群的人口和死亡率。参数 $\rho \hat{J}$ 相当于危险比上面描述的和 $\Delta P OLL \hat{J}$ 是由淘汰为空气污染物在环境空气污染的变化 \hat{J} 。最后，我们假设由于逐步淘汰（仅占德国总人口的7.5%），仅化石电厂20公里以内的居民会遭受额外的空气污染。该人口测算使用来自NASA社会经济数据和应用中心（SEDAC）的基于卫星的数据来计算的。

[关于这里的表6。]

货币化死亡率损失的估计值在表 6中进行了报告。具体而言，我们介绍了逐步淘汰对污染浓度，成熟前死亡率和该过早死亡的货币化损失的年度平均影响。出现了一些关键结果。首先，再次有明确的证据表明，逐步淘汰会导致当地污染的显著增加，进而导致过早死亡率的大幅增加和代价高昂的增加。其次，由于淘汰而导致的PM 2.5和PM 10浓度水平的变化对健康的影响远大于NO 2的变化。空气污染（大约十倍）。最后，超额死亡率的主要驱动因素是硬煤和褐煤发电厂。第（3）栏的估算表明，由于淘汰而导致的燃烧硬煤的额外产量导致每年 30亿美元的死亡损失。逐步淘汰引起的褐煤产量增加导致

\$ 1.2十亿每年死亡赔偿金。总体而言，该分析指出了逐步淘汰造成每年43亿美元的年度过早死亡损失。

19

为了计算出危险比PM 2.5，我们转换PM 10至PM 2.5通过使简单假设PM 10 =下午12点05分 2.5。ESCAPE项目中没有CO和SO 2的剂量反应功能。

两者合计，表5和表6 的结果描绘了由核淘汰引起的货币化死亡率损失的显著一致性。话虽如此，我们的首选估算是根据报告的排放量计算每年造成的损失87亿美元（表5）。这是因为使用报告的排放进行的分析考虑了更完整的污染物，并且隐含地使用了对污染物传输和暴露的更复杂的分析。表6中的结果是根据我们估算的污染浓度与发电量之间的关系得出的（表6）是有价值的补充验证活动，尤其是考虑到它是使用完全不同的方法得出的。最后，我们要强调的是，逐步淘汰的空气污染成本在经济上相当可观，由于德国电力部门排放的空气污染导致过早死亡，造成的损失增加了大约10%至15%。

6.2.3 估计核事故和废物储存的风险

核电厂几乎不排放全球或本地空气污染。但是，核能确实会带来灾难性的事故风险，并且需要存储由核生产产生的废物，这也具有重要的成本。例如，JECR（2019）估计，福岛事故在未来四十年，成本为35-80万亿日元之间（\$ 330-750十亿）。大部分费用将不会由拥有福岛核电站的公司承担；福岛事故的损失在很大程度上由整个日本社会承担。

更普遍的是，根据文献估计，由于废物存储和事故风险而导致的核电外部成本在每兆瓦时e 1-4之间（Dhaeseleer, 2013年）。该范围之大是由于事故概率和严重性的估计不同，以及折现率的假设也不同。如果我们在重视核电的外部成本\$每兆瓦时3，从核淘汰的预期收益是\$ 0.2十亿每年。即使我们将核电的外部成本的价值定为每兆瓦时30美元，远高于文献中通常的水平，核淘汰的预期收益仍然相对适中，为每兆瓦时30 美元。每年20亿。这明显小于我们对与核淘汰相关的外部成本的估计。

6.3 核淘汰的总成本和收益

本小节通过总结核淘汰的所有私人成本和外部成本与收益，将分析汇总在一起。淘汰的私人成本包括我们样本中电厂的运营成本的变化以及进出口变化带来的任何净成本。逐步淘汰的外部成本包括：因碳排放而货币化的气候变化损害，因死亡而造成的损害，以及由于电力生产结构变化而导致的空气污染所致的发病率。最后，逐步淘汰的好处包括减少与核废料和事故风险相关的成本。

[关于这里的表7。]

表 7报告了淘汰的总成本和收益。逐步淘汰后，化石燃料和净进口等成本较高的来源取代了低成本核生产；这增加了在德国的平均经营成本\$ 1.6十亿每年。这些私人成本虽然不小，但相对于与淘汰相关的外部成本而言却很小。具体而言，燃烧化石燃料发电而不是使用核电厂会排放全球污染物（例如CO₂）以及局部污染物（例如PM_{2.5}，SO₂和NO₂）。

仅因逐步淘汰导致的CO₂排放量增加而对气候造成的损害每年就达 18亿美元。但是，迄今为止，最大的淘汰影响是当地空气污染排放的外部成本。具体而言，由于空气质量差，暴露于当地空气污染的增加导致额外的1100多例死亡。我们估计，使用报告的排放量后，货币化的死亡率影响每年为 87亿美元，此外，每年还有2亿美元的发病率成本。从核废料和事故风险的外部成本的平均降幅很小通过比较\$每年2亿。总体而言，我们估计核淘汰的年度持续成本约为每年 122亿美元。

6.4 淘汰对投资有何影响？

开普勒（2012）认为，延长德国核反应堆的寿命将需要的投资大约E 5亿每堆，或e 8.5十亿在总计（约100 亿美元）。由于核淘汰，避免了这些投资成本。但是，Knopf等。（2014）认为，被要求在2030年淘汰导致的额外化石燃料发电装机容量8GW如果我们假设燃煤发电能力有资本成本\$ 3500 /千瓦，而燃气能力有资本成本\$ 1000 /千瓦，在总的额外投资成本化石燃料发电装机容量从核淘汰范围的结果\$ 8- \$ 28日十亿。从该范围减去可避免的核电投资成本，淘汰的净投资成本在- \$ 20亿至\$180亿。如此说来，我们的中心估计每年在密集的保证成本为核淘汰的结果净增大约是\$ 12个十亿。因此，在没有淘汰的情况下与没有淘汰的情况下，投资成本的合理比较不能推翻得出结论，即淘汰在很大程度上没有通过简单的收益成本测试。

但是，有人可能会说，核逐步淘汰加速了对可再生能源的投资。对可再生能源的投资增加，降低了生产成本，并降低了从核电转向所带来的空气污染损害。为了探讨这一论点，我们估计了一种逐步淘汰会刺激可再生能源投资稳定增长的情况。我们设定了每年在可再生能源上的投资水平，以使德

国实现到2020年每年再增加30 TWh可再生能源发电的目标。在这种“可再生能源”情景中，化石燃料发电厂的任务是每年减少5 TWh的电力。因此，由于淘汰年均私人经营成本的增加是\$ 1.4十亿，而不是\$基线分析中有16亿。在气候损害成本的逐步淘汰诱导增加\$ 1.3十亿（与\$ 1.8十亿在基线分析），而在空气污染损害淘汰诱导增加\$ 7.6十亿（与\$ 8.7十亿基线ANALY -sis）。相结合，允许在可再生能源生产的一个相当大的增长作为淘汰的结果下降仅淘汰的总净费用\$ 1.8十亿每年（从\$ 12.2十亿在我们的基线到\$ 10.4十亿增加可再生能源）。

6.5 稳健性检查

两个外部估计的参数在我们的估计中起关键作用：（a）统计生命的价值（VSL），用于通过逐步淘汰引起的局部空气污染将附加道德货币化，以及（b）核废料的外部成本和事故风险。我们的

核淘汰成本的中央估算是基于Viscusi和Masterman（2017）的790万美元的VSL。我们认为，该特定于德国的VSL是最可靠/最新的。尽管如此，经济合作与发展组织（OECD）估计，针对德国的VSL约为300万美元，这是我们在文献中看到的对德国而言最低的VSL估计之一。20即使使用这种极低的VSL \$亿3，我们发现，空气污染成本淘汰是\$ 3.3十亿（与\$在基线分析中为87亿）。对VSL的这种明显更为保守的假设将淘汰的总成本降低到了每年64亿美元（相比之下，基线分析为122亿美元）。

同样，我们可以重视核废料和核事故的风险在相关的外部成本\$ 每兆瓦时30。这大约比先前研究估计的核电外部成本大10倍（Dhaeseleer, 2013年）。这种极其CON组保守疗法（即：高）的估计增加淘汰的收益\$ 0.2十亿每年以\$ 2十亿每年。但是，用极为保守的估计数来代替VSL和核电的外部成本仍然不足以推翻核淘汰彻底失败的简单收益成本测试的结论。

7 结论和政策讨论

在2011年深岛事故之后，德国当局做出了前所未有的决定：（1）立即关闭该国几乎一半的核电厂，（2）到2022年关闭所有剩余的核电厂。决定的经济和环境成本。我们的分析表明，淘汰核电给德国带来的年度成本约为每年120亿美元。其中超过70%的成本是由于每年燃煤电厂代替停产的核电厂造成的局部空气污染造成1,100多人死亡。由于减少了核事故风险和废物处置费用，我们的核淘汰估计费用远远超过了从逐步淘汰收益中得出的正确估算。

此外，我们发现淘汰逐步导致消费者支付的电价大幅上涨。因此，人们可能会期望德国公民强烈反对。

20 Viscusi和Masterman（2017）讨论了OECD对VSL估算的缺点。

由于空气污染成本而逐步淘汰政策，以及由于该政策而强加给他们的电价上涨。相反，核淘汰仍得到广泛支持，2015年的调查中有81%以上支持核淘汰（Goebel等，2015）。这种支持不能归因于对气候变化缺乏关注。事实上，德国公民广泛支持过渡到可再生能源作为Energiewende计划的一部分，尽管这种转变的成本是€ 26十亿在2017年单独。德国公民也高度意识到与向可再生能源过渡相关的成本，目前可再生能源补贴的费用约占居民家庭电价的四分之一。

这就提出了一个问题：尽管与这项政策相关的巨大经济和环境成本，是什么促使全球转向核电？我们讨论了两种潜在的机制。首先，核淘汰可能是风险规避者进行理性决策的结果。具体来说，我们将淘汰的社会成本与预期值进行了比较此政策的好处。但是，核事故风险给公民带来了不确定性，与核废料处置相关的成本也可以说是相对不确定的。因此，即使与淘汰相关的空气污染成本预期较高，也有足够的规避风险的政策制定者可以逐步淘汰核武器，以避免与核事故和废物处置相关的尾部风险。

为了了解逐步淘汰所需的风险规避程度，我们计算了一次重大核事故的可能性，该事故将导致逐步淘汰的预期收益等于成本。对于此包络计算，假设没有逐步淘汰，核电厂将以相同的顺序关闭，但到2032年而不是2022年。这给出了2032-2011年= 21年逐步淘汰将减少核生产。我们估计的逐步淘汰成本为每年 120亿美元；这意味着在2011-2032年间累计淘汰费用为 2500亿美元。福岛事故的成本的上限估算大致\$ 750十亿（JECR, 2019）。为简单起见，假设在这21年的时间里可能没有事故，也可能只有一次福岛县级事故。的概率

发生这种福岛事故的规模必须是 $0.33 \approx 250$ 十亿

为了

淘汰的预期收益应等于淘汰的成本。这甚至远远超过了最保守的事故概率估计值。

这种程度的凹痕发生在德国。²¹ 这反过来表明，决策者必须表现出极高的风险规避水平，才能使仅基于风险规避的逐步淘汰合理化。

话虽如此，公民也可能是反核的，因为与化石燃料生产相关的空气污染成本比与核能相关的风险更为突出。具体而言，有关空气污染的有害影响的文献越来越多。但是，公众对当地空气污染暴露对健康的不利影响的规模了解仍然相对有限。这可能是很难将任何单个死亡完全归因于单个电厂的污染暴露。相反，污染浓度水平是多种不同排放源的结果，空气污染略有增加，但持续增加了大量裸露人群的死亡风险。同样，气候变化的成本将主要由后代承担，而且，将未来的气候事件与发电厂烟囱中的碳排放联系起来就更加简单了。相比之下，核事故是高度可见但概率很小的事件，可以清楚地与有问题的核反应堆联系起来。这可能导致决策者和公众都高估了核事故将要发生的事前可能性以及这些事故的代价（斯洛伐克，菲施霍夫和利希滕斯坦（1979）；Slovic（2010））。

不管潜在原因是什么，很明显，德国公民都非常关心气候变化，但显然是反核的。因此，世界各地的决策者都面临着艰难的权衡。一方面，许多气候变化专家认为，核电是摆脱碳密集型化石燃料转变的必要部分。此外，许多选民愿意为降低气候变化的风险付出巨额费用。但是，由于担心核事故和核废料处置，许多这些相同的选民也不愿支持核电。面对这一政治压力，尽管与该政策相关的运营成本和空气污染成本大幅增加，但世界各国仍在放弃核能生产。

²¹ 例如，Wheatley, Sovacool和Sornette（2017）估计，在整个全球核反应堆舰队中，每60-150年发生一次福岛事件（或更严重）的可能性为50%。2011年，德国的核反应堆不到全球的4%。此外，德国的核反应堆几乎可以肯定比世界其他地方具有更少事故风险。

参考文献

Beelen, Rob, Ole Raaschou-Nielsen, Massimo Stafoggia, Zorana Jovanovic Andersen, Gudrun Weinmayr, Barbara Hoffmann, Kathrin Wolf, Evangelia Samoli, Paul Fischer, Mark Nieuwenhuijsen等。2014年。“长期暴露于空气污染对自然原因死亡率的影响：多中心ESCAPE项目中22个欧洲队列的分析。”《柳叶刀》，383（9919）：785–795。

宝马 2018年。“第六次能源过渡监测报告：未来的能源。”联邦经济事务和能源部（BMWi）报告。

BNetzA。2018年。“监控报告”。

布雷曼, 狮子座。2001。“随机森林”。机器学习, 45（1）：5–32。

Burlig, Fiona, Christopher Knittel, David Rapson, Mar Reguant和Catherine Wolfram。2017年。“向学校学习有关能源效率的机器。”国家经济研究局工作论文23908。

Callaway, Duncan S, Meredith Fowlie和Gavin McCormick。2018。“位置，位置，位置：可再生能源和需求方效率资源的可变价值。”环境与资源经济学家协会学报, 5（1）：39-75。

克里卡·史蒂夫。2017年。“美国发电市场不完善与监管不完善”，国家经济研究局工作论文23053。

戴维斯, 卢卡斯和凯瑟琳·豪斯曼。2016。“核电厂关闭的市场影响”，《美国经济杂志：应用经济学》，8（2）：92–122。

Deschenes, Olivier, Michael Greenstone和Joseph S.Shapiro。2017年。“国防投资和空气质量需求：来自NO_x预算计划的证据。”《美国经济评论》，107（10）：2958–89。

戴瑟勒, 威廉。2013。“核能学合”。DG能源告。

欧洲经济区。2014年。“欧洲工业设施造成的空气污染成本2008-2012年。”欧洲环境署EEA技术报告20/2014。

埃纳 (Egerer) , 乔纳斯 (Jonas) 。2016年。“德国的开源电力模型 (ELMOD-DE) 。” DIW柏林, 德国经济研究所数据文献83。

欧盟委员会。2017年。“欧洲电力市场季度报告”。

Goebel, Jan, Christian Krekel, Tim Tiefenbach和Nicolas R Ziebarth。2015。“自然灾害如何影响环境, 风险规避甚至政治: 来自福岛和三个欧洲国家的证据。”《人口经济学》, 28 (4) : 1137-1180。

Grossi, Luigi, Sven Heim和Michael Waterson。2017年。“德国人对福岛地震的的反应的影响。”《能源经济学》66 : 450 – 465。

Holland, Stephen P, Erin T Mansur, Nicholas Muller和Andrew J Yates。2018年。“电力产生的空气污染异常下降的分解和政策后果”, 国家经济研究局工作论文25339。

大卫·雅各布斯 2012年。“德国Energiewende的历史, 目标, 政策和挑战。”《可再生能源法律与政策评论》, 第3 (4) 期 : 223–233。

Jaramillo, Paulina和Nicholas Muller。2016年。“美国能源生产中的空气污染排放和损害 : 2002-2011。”《能源政策》, 90 (C) : 202–211。

JECR。2019年。“《福岛核事故公共财政负担的后续报告》。”日本经济研究中心报告。

琼斯, 戴夫, 查尔斯·摩尔, 威尔·理查德, 罗莎·吉伦斯, 劳里·迈尔维尔塔, 萨拉·普里梅克, 格雷格·麦克内文, 凯瑟琳·古特曼, 安东·拉撒路斯, 克里斯蒂安·舍伯和乔安娜·弗里索卡。2018。“最后的喘息: 煤炭公司使欧洲感到恶心。”欧洲超越煤炭。

开普勒 (Jan Horst) 。2012年。“德国核淘汰的经济成本。”

诺夫 (Knopf) , 布里吉特 (Brigitte) , 迈克尔·帕尔 (Michael Pahle) , 亨德里克·孔德泽拉 (Hendrik Kondziella) , 法比安·乔亚斯 (Fabian Joas) , 奥特玛·埃登霍夫 (Ottmar Edenhofer) 和托马斯·布鲁克纳 (Thomas Bruckner) 。2014年。“德国的核淘汰: 对电价和二氧化碳排放的敏感性及其影响”, 《能源与环境政策经济学》, 第0期 (第1号) 。

Markandya, Anil和Paul Wilkinson。2007年。“发电与健康”。
柳叶刀, 370 (9591) : 979–990。

尼古拉·梅因斯豪森。2006年。“分位数回归森林”。*J. Mach. 学习. Res.* , 7 : 983–999。

Mullainathan, Sendhil和Jann Spiess。2017。“机器学习: 一种应用的计量经济学方法”, 《经济观点杂志》, 31 (2) : 87–106。

Neidell, Matthew J, 内田伸介和Marcella Veronesi。2019年。“谨慎原则: 福岛第一核电站核事故的证据”, 国家经济研究局。

NRC和NAS。2010年。“能源的隐性成本: 能源生产和使用的无价后果。”国家研究委员会 (美国) 。能源生产和消费的健康, 环境和其他外部成本与收益委员会。国家科学院出版社。

打开电源系统数据。2018年。“数据包常规电厂”。

塞弗尼尼, 埃德森。2017年。“1980年代田纳西河谷核电站停工对燃煤发电和婴儿健康的影响。” *Nature Energy* , 2 (4) : 17051。

保罗·斯洛维奇。2010。“风险心理学”。*Sade e Sociedade* , 19 (4) : 737–747。

Slovic, Paul和Elke U Weber。2002年。“感知极端事件带来的风险。”有毒物质和危险废物法规 (第2版) (*Applegate, Gabba, Laitos和Sachs*, 编辑) , 基金会出版社, 即将出版。

Slovic, Paul, Baruch Fischhoff和Sarah。利希滕斯坦。1979年。“评估风险”。

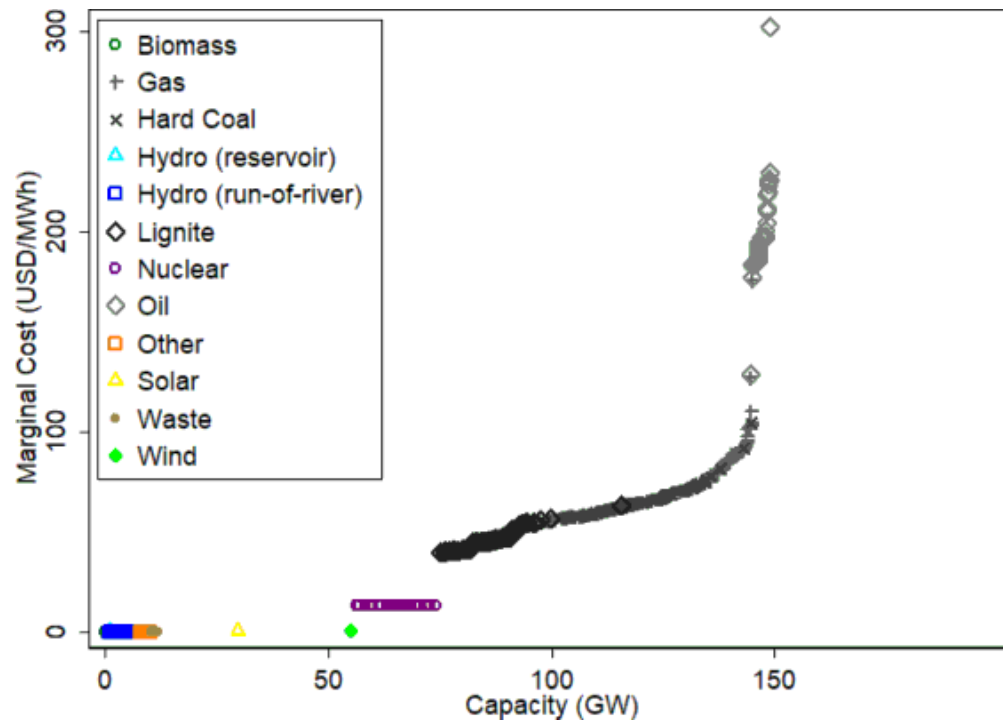
Traber, Thure和Claudia Kemfert。2012年。“德国的核淘汰政策：对欧洲电力批发价格，排放价格，常规电厂投资和电力贸易的影响。” DIW柏林，德国经济研究所1219年DIW柏林的讨论文件。

Viscusi, W. Kip和Clayton J. Masterman。2017年。“统计生命的收入弹性和全球价值。”《成本效益分析杂志》，8 (2) : 226250。

Wager, Stefan和Susan Athey。2018。“使用随机森林估算和推断异构处理效果”，《美国统计协会杂志》，113 (523) : 1228-1242。

惠特利, 斯宾塞, 本杰明·索瓦库尔和迪迪埃·索内特。2017。“灾难与龙王：核电事故和事故的统计分析。”风险分析, 37 (1) : 99-115。

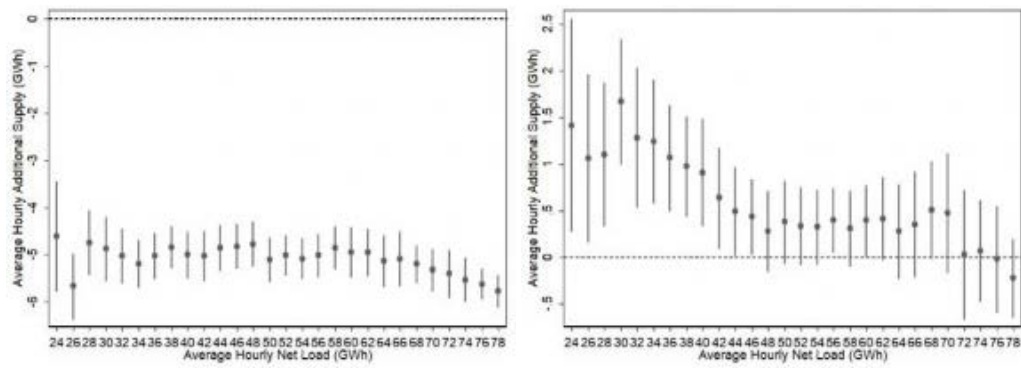
图1：2011年边际成本曲线



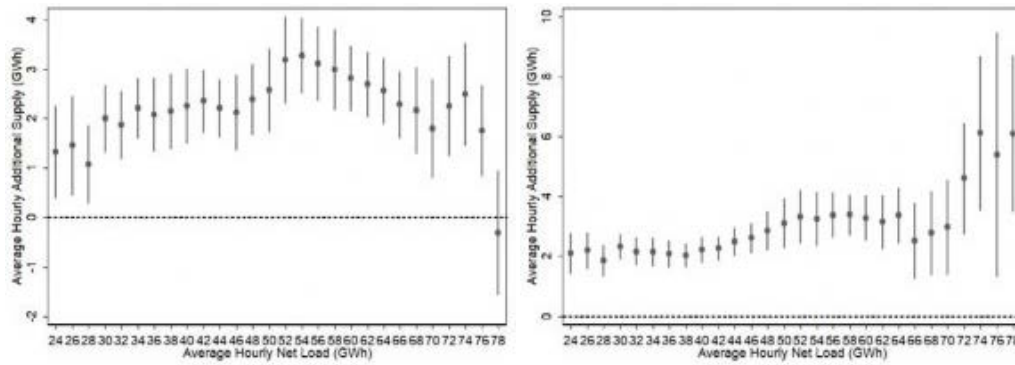
注：此图绘制了德国2011年电厂的边际成本估算。具体而言，根据边际成本订购了电厂，以创建总供应曲线。对于给定的边际成本 c （在y轴上绘制），x轴提供边际成本小于或等于 c 的所有工厂的生产能力总和（以GW为单位）。边际成本以2011年美元为单位。对于燃煤、天然气和石油工厂，边际成本计算为燃料成本与假定的可变运行和维护成本之和。该成本因燃料类型而异。使用工厂的热效率将燃料成本转换为美元/MWh；工厂将输入热量的单位转换为电能输出的程度。对于此数字，我们考虑2011年2月1日的燃料成本。核电站的边际成本为10美元/兆瓦时，与埃格利尔一样（2016）。水电、风能和太阳能的边际成本为零。为简单起见，还将少量剩余资源的边际成本分配为零（即，生物质，废物等）。为了便于表述，该图未显示电力进出口如何影响总供给曲线；重要的是，我们在分析中考虑了进出口。

图2：事件研究估计：2011年核关闭对生产的影响

的 (a) 核 (b) 中褐煤

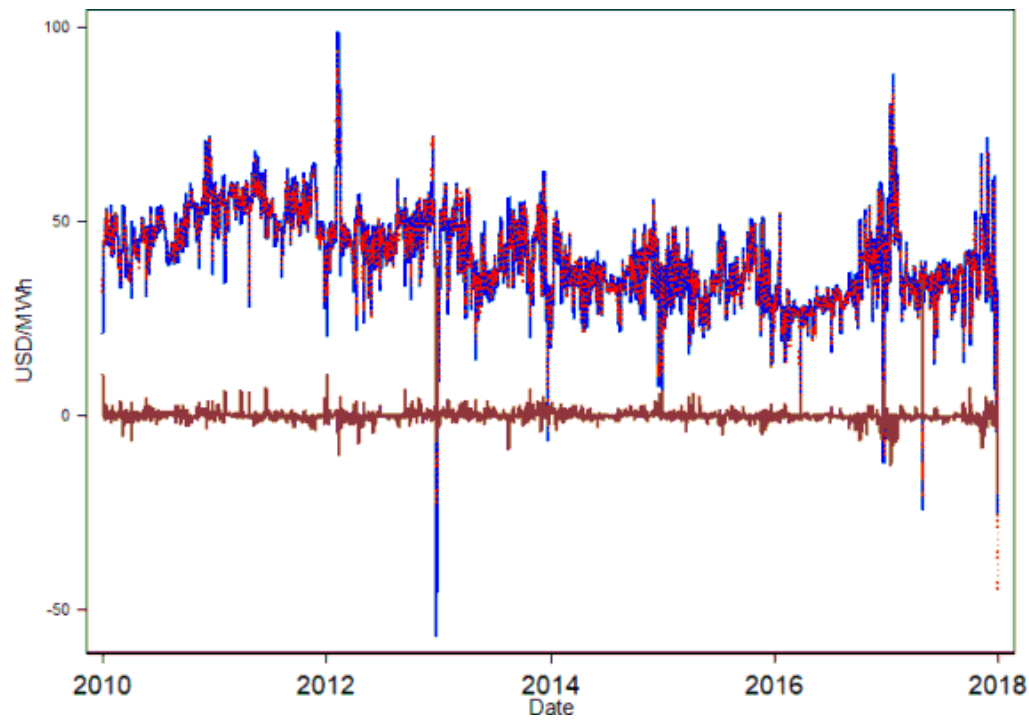


(c) 硬煤 (d) 天然气



注：此图绘制了对2011年德国核淘汰的影响进行的事件研究分析的结果。该估计值对应于相对于2011年3月15日之前的按来源的电力生产变化。图(a)显示分别按28个大小相等的净需求箱(即，电力需求减去可再生能源的生产)中的每一个进行的核生产估算。(b) - (d)面板分别给出了褐煤，硬煤和天然气产量的相应估算。面板还包括每个估计效果周围的逐点95%置信区间；用于构建这些置信区间的标准误差按抽样周进行聚类。

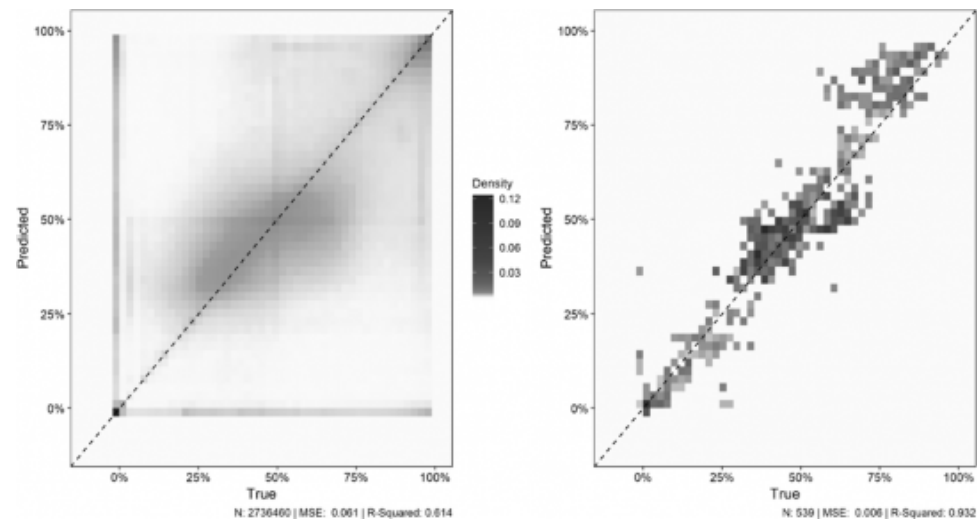
图3：机器学习模型的性能：电力批发价格



注意：此图说明了第5节中提供的机器学习模型进行的总预测的准确性。该模型预测了2010-2017年每个样本小时的批发电价。该图描述了观察到的批发电价（蓝色实线）、我们的模型预测（红色虚线）以及这两者之间的差异（沿x轴的褐红色实线）。尽管该模型以小时为单位预测价格，但是为了便于展示，该图中的数据已平均为每日分辨率。

图4：机器学习模型的性能：工厂级电力生产

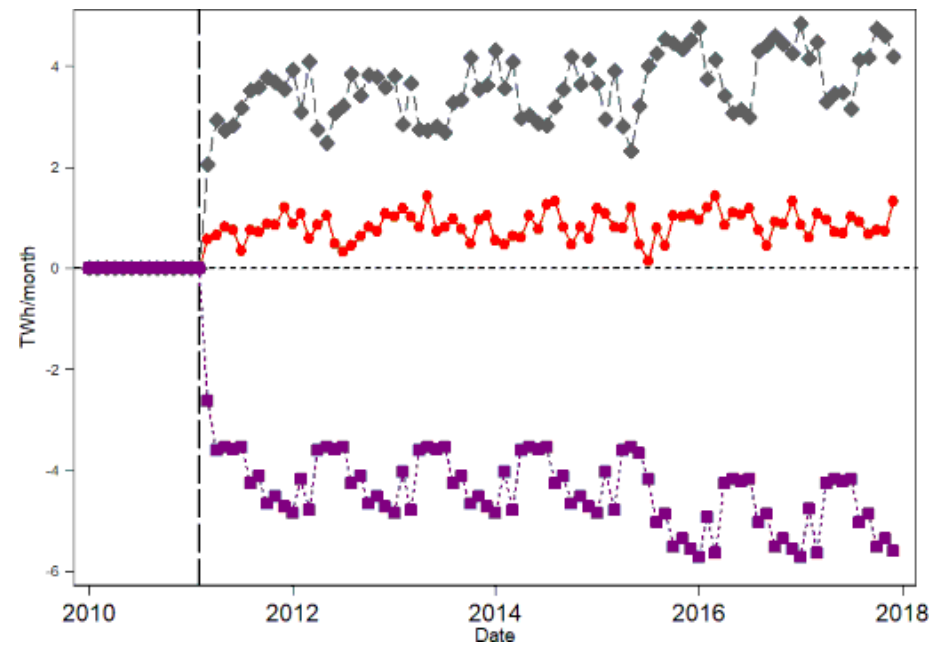
(a) 每小时 (二) 年度



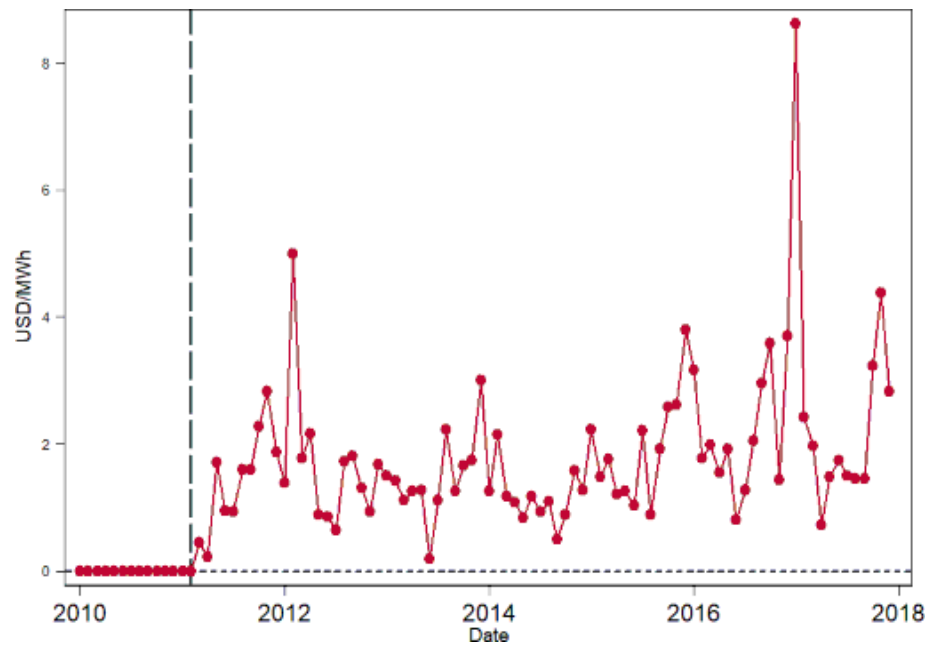
笔记：该图说明了第5节中介绍的机器学习模型对工厂级别的预测的准确性。该模型预测每个电厂每小时的运行率，其中0%的值表示工厂处于脱机状态，值表示100%表示工厂正在以最大产能运行。45度线上的值表示完美的精度，我们在视觉上并通过计算均方差和R平方的度量来总结此精度。我们使用样本外交叉验证来计算这些指标，以避免过度拟合，并公平评估当用于对我们的反事实场景进行预测时模型的性能。我们使用五重交叉验证：我们将2015-2017年训练数据集分为五个随机生成的子集或“折叠”。然后，我们使用五分之四的数据估计我们的预测模型，并检查该模型在预测剩余五分之一数据的结果方面的表现。我们对五折中的每一个都重复一次，然后平均得出的绩效指标。面板 (a) 显示了每小时时间尺度的预测准确性。(b) 面板显示了每小时预测的年度平均值后的预测准确性。较暗的区域表示较高的植物小时（或植物年）观测值。每个像素以2%的增量表示预测的运行速率与实际的运行速率。(b) 面板显示了每小时预测的年度平均值后的预测准确性。较暗的区域表示较高的植物小时（或植物年）观测值。每个像素以2%的增量表示预测的运行速率与实际的运行速率。

图5：淘汰对电力生产和价格的影响

(a) 电力生产



(b) 批发电价



注意：此图绘制了我们的机器学习算法的预测值与逐步淘汰量减去不逐步淘汰量之间的每月差异。垂直黑色虚线标志着2011年3月开始淘汰。（a）小组报告了所有使用化石燃料的估计费用

电力生产（灰色钻石），净imp 赌注（红色圆圈）和核能生产（紫色方块）。(b) 面板显示了批发电价的变化。

表1 汇总统计

所有电力部门	2010年	2017年
总容量 (GW)	172.4	217.6
发电量 (TWh)	551.4	591.2
美元		
批发电价 (/ 兆瓦时) TWh	70.68	41.81
净电力进口 (/ 年)	-3.5	-33.5
按来源核电站		
植物数量 兆瓦	16	7
平均产能 (/ 工厂)	1,196.9	1,359.4
年发电量 (TWh)	134.7	70.5
硬煤厂		
植物数量 兆瓦	109	87
平均产能 (/ 工厂)	236.5	288.0
年发电量 (TWh)	93.9	83.5
美元		
边际成本 (/ 兆瓦时)	64.9	41.8
褐煤厂		
植物数量 兆瓦	74	61
平均产能 (/ 工厂)	274.0	344.1
年发电量 (TWh)	130.9	137.9
美元		
边际成本 (/ 兆瓦时)	54.2	28.9
煤气厂		
植物数量 兆瓦	242	268

平均产能 (/ 工厂)	96.9	98.6
年发电量 (TWh)	53.6	72.3
美元		
边际成本 (/ 兆瓦时)	77.6	41.8
石油厂		
植物数量	53	50
兆瓦		
平均产能 (/ 工厂)	79.0	80.6
年发电量 (TWh)	1.9	3.8
美元		
边际成本 (/ 兆瓦时)	197.5	125.8
可再生能源 (水电, 太阳能和风电)		
总容量 (GW)	52.1	112.5
年发电量 (TWh)	60.6	157.1

注意：此表报告了2010年与2017年德国发电部门的摘要统计数据。电价和边际成本以2017年不变价美元计算。尽管未在表1中进行报告，但根据对德国电力部门的先前研究（Egerer, 2016），我们的核电厂的边际运营成本约为10美元/兆瓦时（2017年美元）。

表2 环境空气污染与发电量之间的估计关系

	(1) 实际, 2015-17年	(2) 预计于2015-17年	(3) 预计, 2010-17年
下午10点	0.132 ^{***} (0.013)	0.140 ^{***} (0.009)	0.186 ^{***} (0.014)
下午 2号 .5	0.152 ^{***} (0.009)	0.138 ^{***} (0.008)	0.169 ^{***} (0.015)
SO 2	-0.005 (0.013)	-0.008 (0.013)	0.021 (0.012)
一氧化碳	0.172 ^{***} (0.019)	0.152 ^{***} (0.019)	0.197 ^{***} (0.024)
NO 2	0.167 ^{***} (0.014)	0.184 ^{***} (0.010)	0.251 ^{***} (0.017)
年月FE	X	X	X
植物有限元	X	X	X

注意：此表报告了根据每日空气污染浓度对工厂日发电量的面板回归得出的系数估算值。对因变量和自变量均进行了标准化，以使其平均值为0，标准差为1。回归包括植物固定效应，年月固定效应，样本年固定效应和标准误差。聚集在工厂级别。***, **和*分别代表0.1%, 1%和5%的统计学显著性。

表3 核淘汰对批发电价，按来源的电力生产和净进口的估计影响

	平均 逐步淘汰 (1)	平均 w /淘汰淘汰 (2)	更改 (3)	变化 (%) (4)
TWh				
产量 (/年)	574.4	574.2	0.2	0.0%
核	86.2	139.4	-53.2	-38.2%
褐煤	160.4	154.3	6.1	3.9%
硬煤	118.3	89.8	28.5	31.7%
加油站	39.8	31.6	8.3	26.2%
油	11.1	10.7	0.4	3.7%
净电力进口	-17.2	-27.4	10.2	37.1%
可再生能源及其他	175.8	175.8	0.0	0.0%
\$				
批发价 (/MWh)	47.3	45.5	1.8	3.9%

注意：下表报告了使用我们的机器学习算法估算的有核淘汰和无核淘汰的按类型和批发电价得出的年平均电力产量。这些年度平均值是使用从2011年3月淘汰后立即到2017年底的数据计算得出的。在我们的基准规格中，“可再生能源及其他”生产类别的建造不会发生变化。这在我们的敏感性分析之一中有所放松（请参见第6.4节）。

表4 核淘汰对收入，运营成本和运营利润的估计影响

	平均 逐步淘汰 (1)	平均 w /淘汰淘汰 (2)	更改 (3)	变化 (%) (4)
十亿				
收入 (美元/年)	19.3	18.6	0.7	3.9%
核	4.1	6.4	-2.2	-35.0%
褐煤	7.6	7.1	0.6	8.0%
硬煤	5.8	4.3	1.5	34.4%
加油站	2.0	1.5	0.5	30.9%
油	0.5	0.5	0.0	7.0%
净电力进口	-0.7	-1.1	0.4	36.6%
可再生能源及其他	-	-	0.0	0.0%
十亿				
成本 (美元/年)	14.2	12.6	1.6	12.7%
核	1.0	1.7	-0.6	-37.9%
褐煤	5.1	4.9	0.2	4.0%
硬煤	4.9	3.7	1.1	30.1%
加油站	2.3	1.9	0.4	23.2%
油	1.9	1.8	0.0	2.5%
净电力进口	-0.9	-1.4	0.4	31.4%
可再生能源及其他	-	-	0.0	0.0%
十亿				

利润 (美元/ 年)	5.2	6.0	-0.9	-14.4%
核	3.1	4.7	-1.6	-33.9%
褐煤	2.6	2.2	0.4	17.0%
硬煤	0.9	0.5	0.3	63.6%
加油站	-0.3	-0.4	0.0	8.1%
油	-1.3	-1.3	0.0	-0.8%
净电力进口	0.2	0.2	0.0	-5.9%
可再生能源及其他	-	-	0.0	0.0%

笔记： 该表报告了使用我们的机器学习算法估算出的有无核淘汰的平均年营业收入，成本和利润。所有值都是根据2011年3月核电站关闭后至2017年底的预测得出的年度平均值。营业收入是每个工厂每小时生产量与每小时批发电价的乘积。我们忽略了工厂可能获得的任何其他收入，例如产能付款，辅助服务付款，补贴等。运营成本是每个工厂每小时生产与每小时边际成本的乘积。营业利润是营业收入减去运营成本。由于我们避免对它们的边际成本或收入（例如，

表5核淘汰对CO 2排放和当地空气污染死亡率损害的估计影响

	平均 逐步淘汰 (1)	平均 w /淘汰淘汰 (2)	更改 (3)	变化 (%) (4)
百万吨				
CO 2排放量 (/ 年)	316.6	280.3	36.3	13.0%
褐煤	182.8	175.9	6.9	3.9%
硬煤	108.0	82.2	25.8	31.4%
加油站	17.0	13.6	3.3	24.5%
油	8.9	8.6	0.3	3.6%
Kt				
SO 2排放量 (/ 年)	151.7	135.8	15.9	11.7%
褐煤	94.7	91.4	3.2	3.5%
硬煤	49.5	37.2	12.3	33.0%
加油站	1.2	1.0	0.2	18.4%
油	6.3	6.2	0.2	2.5%
千吨				
NO x排放量 (/ 年)	213.4	189.7	23.7	12.5%
褐煤	121.5	116.8	4.7	4.0%
硬煤	69.0	52.5	16.5	31.5%
加油站	12.1	10.0	2.2	21.8%
油	10.7	10.4	0.3	2.9%
千吨				
下午排放量 (/ 年)	5.5	4.9	0.6	12.2%
褐煤	3.3	3.2	0.1	3.9%
硬煤	2.0	1.5	0.5	30.3%
加油站	0.1	0.1	0.0	24.6%
油	0.2	0.1	0.0	3.3%

死亡人数				
死亡率 (/年)	8,549.7	7,407.2	1,142.4	15.4%
褐煤	4,142.9	3,988.1	154.9	3.9%
硬煤	3,776.2	2,870.9	905.3	31.5%
加油站	366.1	293.0	73.1	25.0%
油	264.4	255.3	9.2	3.6%
§				
污染损害 (亿/年)	65.3	56.6	8.7	15.4%
褐煤	31.6	30.5	1.2	3.9%
硬煤	28.8	21.9	6.9	31.5%
加油站	2.8	2.2	0.6	25.0%
油	2.0	1.9	0.1	3.6%

46

注意：此表报告了对CO₂以及三种当地污染物：SO₂、NO_x的排放量的估算和PM。最后一行提供了所有这三种本地空气污染物造成的死亡损失的估计值。所有值都是基于从2011年3月之后到2017年底的预测得出的年度平均值。排放量是每家工厂每小时发电量与我们估算其排放率的乘积。排放率是(a)产生一单位电力所需的燃料量和(b)燃料排放强度的乘积。排放估算仅限于德国的化石燃料发电厂。我们忽略了电力部门的其他潜在排放源，例如较小的生物质，垃圾填埋气或废物处理厂的排放。我们还关注德国的排放量和损失，因此不估算由于净进口量变化而导致的邻国排放量变化。

表6 淘汰对当地空气污染死亡率造成的影响

	平均 逐步淘汰 (1)	平均 w /淘汰淘汰 (2)	更改 (3)	变化 (%) (4)
ug NO ₂ 排放量 (/ m ³)	28.3	27.7	0.6	2.2%
褐煤	24.9	24.4	0.5	2.1%
硬煤	29.6	27.9	1.6	5.9%
加油站	29.3	29.2	0.1	0.3%
油	29.5	29.3	0.2	0.6%
ug PM ₁₀ 排放量 (/ m ³)	21.0	20.6	0.4	1.9%
褐煤	21.7	21.3	0.4	1.7%
硬煤	21.3	20.2	1.0	5.2%
加油站	20.7	20.6	0.1	0.3%
油	20.4	20.3	0.1	0.5%
ug 2号下午。5排放量 (/ m ³)	14.1	13.8	0.3	2.2%
褐煤	15.1	14.8	0.3	2.3%
硬煤	13.6	12.8	0.8	5.9%
加油站	13.8	13.8	0.1	0.4%
油	13.9	13.8	0.1	0.6%

死亡率 (/年)	-	-	493.0	-
褐煤	-	-	124.9	-
硬煤	-	-	315.7	-
加油站	-	-	20.2	-
油	-	-	32.3	-
\$	-	-	4.7	-
污染损害 (亿/年)	-	-	4.7	-
褐煤	-	-	1.2	-
硬煤	-	-	3.0	-
加油站	-	-	0.2	-
油	-	-	0.3	-

注：该表报告了与核淘汰相关的额外空气污染暴露所导致的与过早死亡率相关的金钱损失的估计。每日PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的浓度变化通过每天监测工厂级电力生产的监测级空气污染的面板回归获得；这些回归包括植物固定效应、年月固定效应和样本年固定效应。这些回归的系数为我们提供了每种污染物和每种燃料类型的发电量和污染浓度水平之间的估计关系。我们将相关的估计关系乘以每家工厂因淘汰而导致的产量预测变化。使用ESCAPE项目（Lancet, 2014年）的剂量响应估算，将由此产生的空气污染浓度变化转化为过早死亡率的变化。我们使用\$的统计生命值将这些额外的过早死亡货币化来自德国的790万来自Viscusi和Masterman（2017）。我们假设只有居住在德国化石发电厂20公里以内的人口才受到这些发电厂的空气污染的影响（约占总人口的7.5%）。我们没有报告死亡或破坏的绝对水平，仅报告了逐步淘汰所导致的变化，因为监测器记录的基准污染水平并非完全归因于电厂活动；例如，工业设施，汽车和卡车也排放这些污染物。

表7 核淘汰对总费用的总体估计影响

	平均 逐步淘汰 (1)	平均 w /淘汰淘汰 (2)	更改 (3)	变化 (%) (4)
\$				
总成本 (亿/年)	97.4	85.2	12.2	14.3%
	私人费用			
营运成本	14.2	12.6	1.6	12.7%
	外部成本			
CO ₂ 气候损害	15.8	14.0	1.8	13.0%
局部污染造成的死亡率				
方法1：报告的排放	65.3	56.6	8.7	15.4%
方法2：污染监视器	-	-	4.7	-
当地污染发病率	1.9	1.6	0.2	14.1%
核废料和事故	0.3	0.4	-0.2	-38.2%

注意：此表报告了在该逐步淘汰和未逐步淘汰的情况下不同集约化保证金成本的估计。私人成本是我们分析中发电厂的运营成本，加上净进口额的任何变化（以电价计）。在计算这些运营成本时，我们假设可再生能源和其他资源的生产成本等于零。外部成本包括碳排放造成的气候损害，空气污染排放造成的死亡率和发病率成本，以及与核事故风险和核废料处置相关的成本。对于以粗体显示的总成本行，当加上当地污染对死亡率的外部成本时，我们使用报告的排放法得出的估算值。

表清单

- 1 统计摘要42
- 2 周围空气污染与发电之间的估计关系 43
- 3 核淘汰对批发电价，按来源的电力生产和净进口的估计影响 44
- 4 核淘汰对收入，运营成本和运营利润的估计影响 45
- 5 核淘汰对CO₂ 排放和当地的估计影响
 空气污染死亡率损害46
- 6 淘汰对当地空气污染死亡率的影响。。。 47
- 7 核淘汰对总成本的总体估计影响。。。 48

图清单

- 1 2011年边际成本曲线37
- 2 事件研究估计：2011年核关闭对生产的影响38
- 3 机器学习模型的性能：批发电价。。。 39
- 4 机器学习模型的性能：工厂级电力生产 40
- 5 淘汰对电力生产和价格的影响41

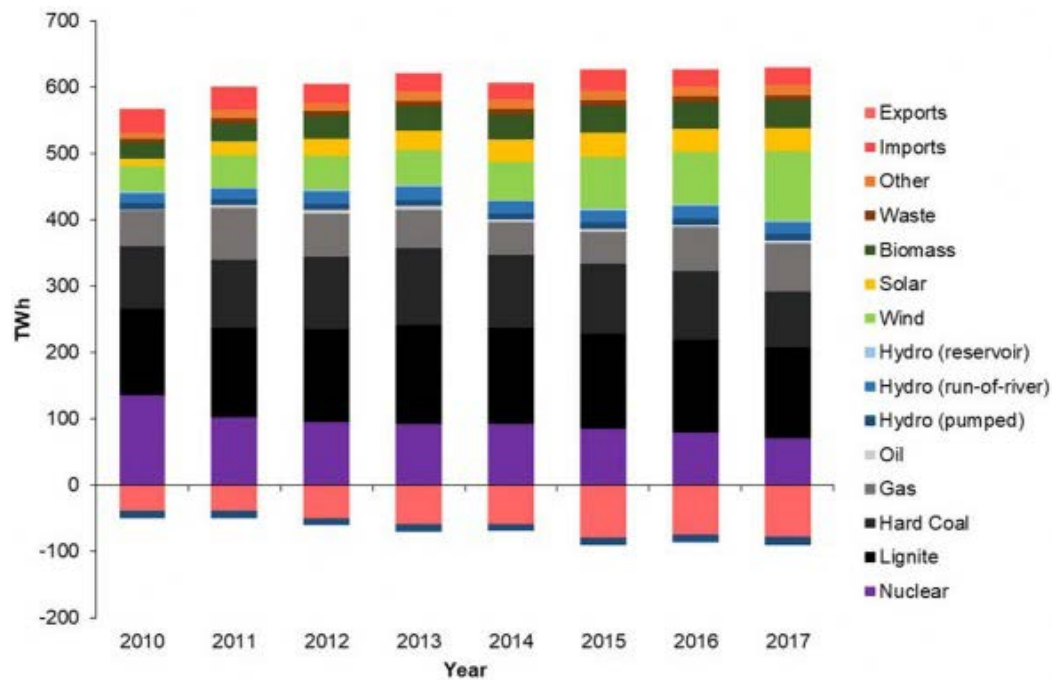
附录

A 附录表和图

附录图 A.1列出了德国每年的总发电量（按来源以及进出口总额）。该图记录了2011年关闭9个反应堆后核生产的急剧下降，以及在我们2010-2017年采样期间风能和太阳能资源的生产快速增长。

[关于这里的图A.1。]

图A.1：按来源分列的电力产量：2010-2017



注意：此图显示了2010-2017年德国不同类型的能源年发电总量。我们还绘制了同一采样期间的年度电力进出口总数量。该图所依据的数据来自BNetzA监视报告。

B 在预测调度模型

电力部门的研究传统上采用某种形式的电力调度模型，该模型结合了工程和经济建模工具来模拟电网的运行。这些模型必须明确规定企业的激励机制（例如：企业是否/如何行使市场支配力）以及运营约束，例如输电拥堵和工厂的启动/提升成本。

我们选择采用经验方法。具体而言，我们的方法旨在根据与工厂运营，需求和电力传输相关的许多不同变量来恢复工厂的调度方式。这种经验方法的主要好处是，它需要更少的关于企业激励或运营约束的假设。我们允许数据告诉我们这些因素如何影响工厂运营。

话虽如此，这种经验方法也有局限性。首先，我们只能检查与观察到的结果足够相似的情况。这就是为什么其他批发电力市场的经验模型倾向于集中于事后政策评估或确定电力需求的边际变化如何影响电厂运营的原因。实际上，我们的论文集中于对德国核淘汰的事后评估，以评估总体市场成果。

我们想强调的是，像我们这样的经验方法通常无法在给定的小时内针对给定的工厂提供可靠的见解。因此，我们的经验模型应被视为对电力市场更明确的模拟模型的补充而不是替代。当关注单个工厂的行为或短期物理限制而不是总体市场结果时，尤其如此。

我们的论文利用了随机森林算法。该算法具有许多有用的属性。首先，我们的预测变量与总体市场结果之间的关系很可能是非线性的，包括许多复杂的相互作用。随机森林非常适合让数据告知这些复杂的交互作用所在，而不必事先做出强有力的假设（例如，无需在线性回归框架内预先指定多项式，样条和交互作用）。其次，Random Forest回归算法的结构意味着可能的结果预测的支持受训练数据集中结果值的支持的限制。这意味着我们模型的预测将具有自然界限为0-1，从而避免了做出错误预测的风险（例如，开工率高于100%或低于0%）。

第三，使用分位数回归森林可以使我们对结果的全部条件分布进行预测，而不仅仅是对这些结果的条件期望。这很重要，因为根据给定工厂小时的协变量，对于给定工厂是否将在给定小时内运行显然存在不确定性。但是，能够表征潜在结果的分布意味着我们可以

(a) 检查结果不确定性，并 (b) 调整最终估计值，以计算仍满足实际需求（即需求等于供应）的工厂级生产中最可能发生的变化。例如，尽管我们的主要指标报告了预测结果的条件平均值，但我们发现，我们的模型所产生的潜在预测的均值和中位数表现都相当不错（见图4）。

我们的随机森林模型是使用约450万个观测值的训练数据集估算的。我们分析中最重要的自变量是：

- **净负荷**。净负荷定义为总电力需求减来自低边际成本或不可分派来源的产量。具体来说，我们从可再生能源（风能，太阳能，水力，生物质，废物）和核能中减去产量。因此，该净负荷变量衡量“灵活”（通常是化石燃料燃烧）源所需的产量。²²
- **边际成本**。一家工厂主要根据其边际成本是否低于为其产出支付的电价来决定是否进行生产。在诸如德国这样的电力市场中，电价通常由满足需求所需的最髙边际成本工厂（即处于边界的清算工厂）确定。因此，我们首先构建每个工厂随时间推移的边际成本的估算值。然后，我们估算清除厂的边际成本：在给定的时间内满足净负荷所需的最后一个化石厂（或边界点）。最后，我们为每个工厂构造一个“标准化”边际成本，即工厂的边际成本减去该小时清算工厂的边际成本。植物

²² 我们还包括净负载的滞后和超前，以捕捉许多发电厂具有动态生产约束的事实（例如，它们可以“加速”其输出的速度，或者在脱机之前必须脱机的最短时间）可以重新启动）。

如果此标准边际成本为负（正），则通常会生产（不生产）。

- **可用容量**。如果“边际成本”变量以价格表示工厂在供应曲线中的位置，则“可用容量”变量以数量表示工厂在供应曲线中的位置。对于每家工厂，我们计算边际成本较低的其他化石工厂（或边界点）的总产能。然后，将我们的“可用容量”变量计算为边际成本比工厂减去该小时的净负荷低的边际成本的总容量。再次，可用产能为负的植物很可能生产，而可用产能为正的植物不太可能生产。

数字 B.1a说明了我們每个协变量的相对重要性。正如预期的那样，净需求，边际成本和可用容量都是特别重要的协变量。但是，值得注意的是，两个最重要的协变量是源的类型（即褐煤，硬煤，天然气，石油或边界点）以及化石燃料发电厂是否为热电联产。这反映出以下事实：不同类型的发电机面临不同的运行约束。例如，德国的许多天然气厂都是热电联产的。因此，尽管它们的边际成本可能比燃煤电厂高，但它们从电力输出和提供供热服务中都获得了收益。所以，

[关于这里的图B.1。]

我们使用的机器学习应用程序旨在预测可调度的灵活来源（例如化石燃料工厂和边境流量）如何增加或减少其产量，以满足在考虑可再生能源和核能的产量后剩余的剩余需求。净负载，每个工厂的相对边际成本以及可供选择的可用容量的数量是分析中的关键预测因素，不仅因为它们在解释工厂运营决策中起着重要作用，而且因为它们是我们为了进行修改而要修改的变量构建反事实情景。对于方案在逐步淘汰的情况下，如图B.2a所示，在逐步淘汰的情况下，净负载变量是观察到的净负载。如图B.2b所示，对于没有逐步淘汰的反事实情况，核电生产会更高，因此净负荷会更低。净负载的减少也改变了边际成本和可用容量变量。具体而言，如果净负荷较低，则清算厂的边际成本也将较低。而且，对于较低的净负载，净负载以下的容量也较低。这在图B.2c和B.2d中进行了说明。

[关于这里的图B.2。]

使用此类预测模型进行样本外预测时，重要的是要确保训练数据集在各个预测变量之间提供足够的支持。这是因为我们的算法不适合推断超出训练数据中常见的经济条件。我们有信心评估核淘汰的影响是一种内插法，而不是外推法，部分原因是我们的2010-2017年样本期内，化石燃料发电厂和基础输电网络的投资组合变化不大。

重新缩放某些变量还可以帮助确保我们的样本外预测不会在训练数据的支持范围之外推断太多。²³ 我们用来估计供需之间相互作用的三个主要变量是净负荷，工

厂边际成本和可用容量。几乎按照定义，反事实的无淘汰方案将包含一些时期，其中这些变量不在训练数据集中。即便如此，电力需求，可再生能源的生产和边际成本之间的差异如此之大，以至于事实和反事实中这些变量之间的支持重叠非常好。这可以在图B.1b, B.1c和B.1d中看到。

图 B.3显示了中位数模型预测值，显示了核淘汰将如何影响德国的工厂级总发电量。正如预期的那样，该图上的点往往位于水平轴上方；核淘汰逐步减少了核发电，化石燃料生产填补了这一空白。淘汰的最大反应来自硬煤电厂。

23 例如，我们用清除市场所需的最后一家工厂的边际成本来调整每个工厂的边际成本。例如，即使燃料成本从2010-2017年翻了一番，重新调整比例也可以确保在我们的采样期间，重新调整比例的边际成本可以输入到我们的算法中。

[关于这里的图B.3。]

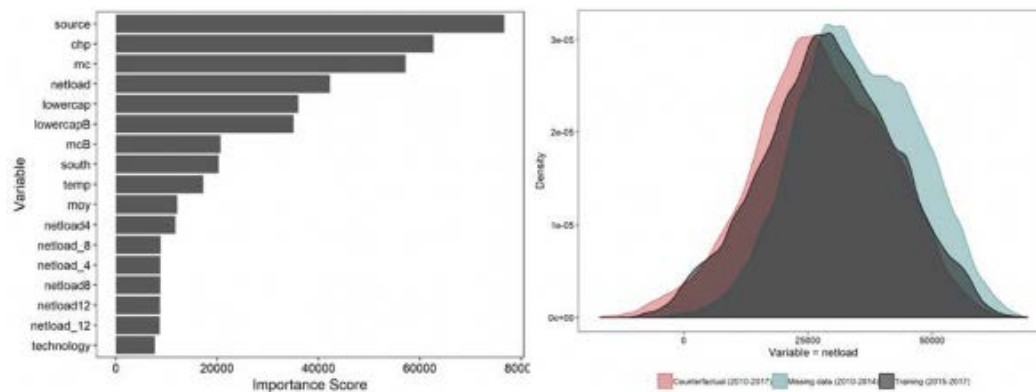
使用图中显示的中位数预测 B.3我们发现，每年约40 TWh来自高级化石燃料工厂和净进口的额外供应。但是，重要的是要注意，在我们的估算过程中没有任何约束条件，即估算的替代生产总量应与损失的核能产量匹配。实际上，每年损失的核生产量约为50 TWh，因此使用中位数预测实际上会使我们低估了替代发电量。为了解决这个问题，我们利用分位数回归模型为我们提供的有关潜在产出变化的完整条件分布的信息。具体来说，我们为每个结果的第10、25、50、75和90%生成预测。然后，我们发现这些百分位数的组合可以用最可能的一组工厂级变化（即最接近中位数）完全替代失去的核能发电。换句话说，我们发现最接近中位数的百分位数会导致年度总发电量的变化等于年度核发电量的损失。确保额外的供应完全能够满足核能损失，只需要从中位数增加几个百分点即可。

最后，图 B.4说明了哪些工厂和边境点增加了产量，以满足因淘汰而导致的核产量下降。化石燃料的绝大部分来自该国西部和南部的工业区。净进口的变化主要发生在与丹麦，法国和捷克共和国的边界。

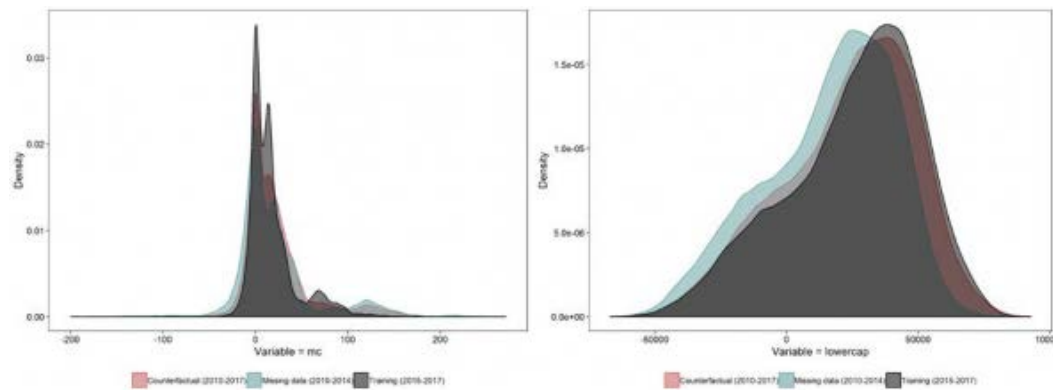
[关于这里的图B.4。]

图B.1：机器学习模型诊断

(一) 变量重要性得分 (二) 净需求



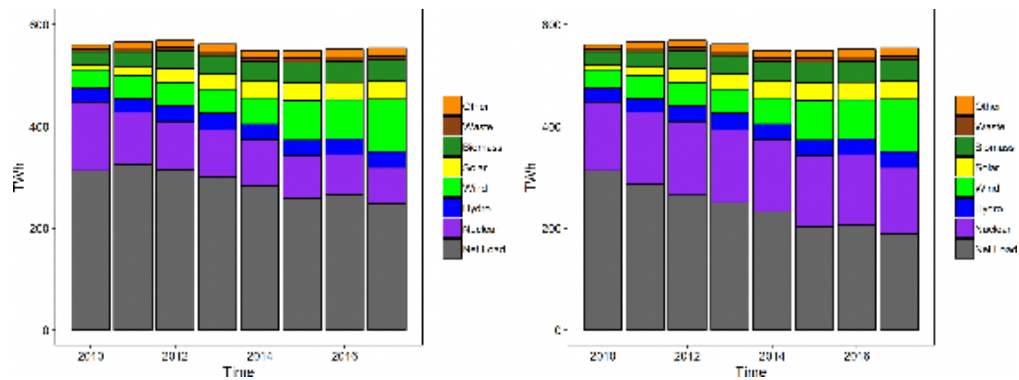
(c) 中边际成本的支持 (d) 可用容量



笔记：该图说明了与机器学习估计有关的一系列关键模型诊断。面板 (a) 显示了估算中包含的每个变量的重要性得分。重要性分数表明每个变量在预测感兴趣结果中的相对重要性。图中的缩写名称如下：来源=来源类型（例如褐煤、硬煤、天然气、石油或边界）；mc = 相对于清算单位的边际成本；mcB = 相对于清算单位的边际成本，包括边界容量；Lowercap = 具有较低边际成本的容量；lowercapB = 具有较低边际成本（包括边界容量）的容量；chp = 热电联产能力的存在和规模；技术=技术类型（例如蒸汽轮机、联合循环涡轮机或转移）；temp = 当地温度；南部=用于指示植物或边界点位于该国南部的指示器；moy = 一年中的月份；dow = 星期几；hod = 一天中的小时；净负荷=电力负荷减去风能、太阳能、水力和核能源的产量；netloadX = 当前净负载与X个小时前的净负载之间的差；净负载X = 当前净负载与未来X个小时净负载之间的差。面板 (bd) 显示了三个关键变量的支持：净需求、标准化边际成本和可用容量。灰色区域显示了2015-2017年培训数据集中的观察值分布（即：每小时都有工厂级生产数据的位置）。蓝色区域显示了缺失的2010-2015年数据中的观测值分布（即：我们仅具有按燃料类型划分的每小时生产数据）。

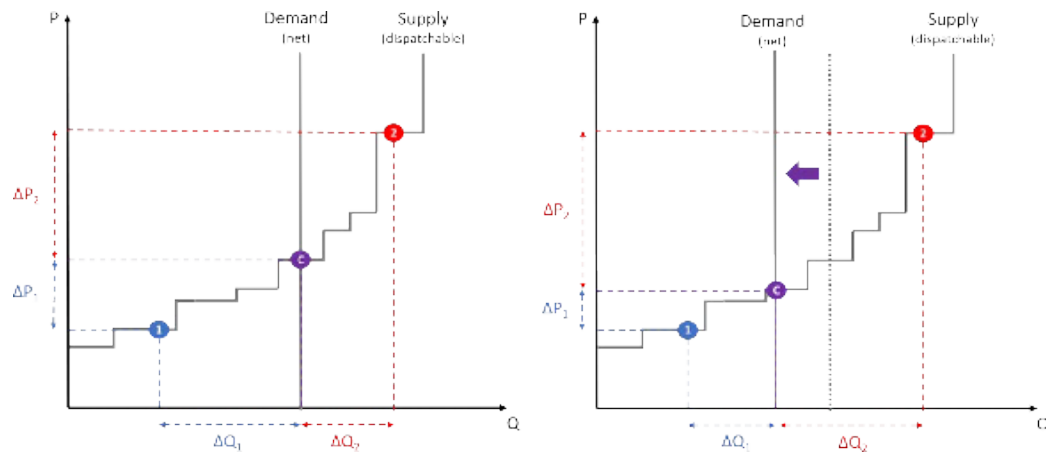
图B.2：净需求和方案实施

(一) 预计净需求（随着淘汰） (B) 估计净需求（如果没有淘汰）



(c) 净需求图（逐步淘汰）

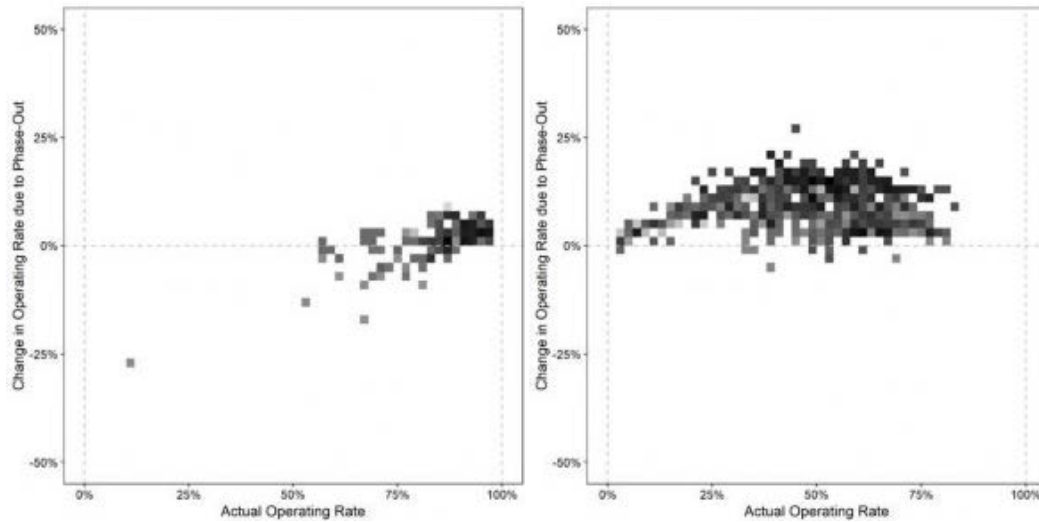
(d) 净需求图（无逐步淘汰）



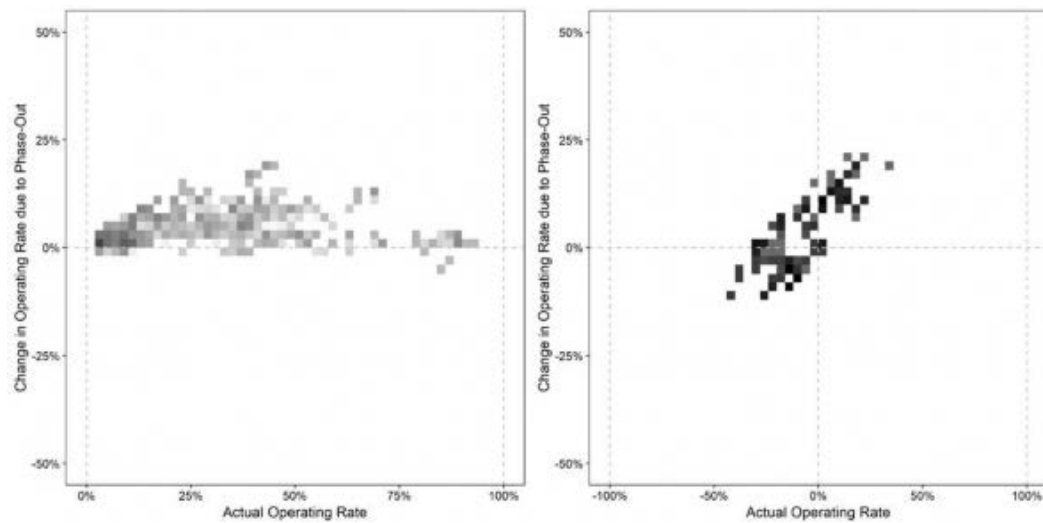
笔记：该图说明了净电力需求变量在分析中的作用。净需求定义为总电力需求减去低边际成本或不可调度来源的生产。具体来说，我们从可再生能源（风能，太阳能，水力，生物质，废物）和核能中减去产量。(a)和(b)面板分别显示了有和没有淘汰的净需求水平。请注意，可再生能源的产量随着时间的推移而增长，这导致通过化石燃料发电厂等灵活来源满足的净需求减少。比较面板(a)和面板(b)表明，在不发生核淘汰的情况下，更多的核生产会导致在这种情况下满足的净需求减少。(c)和(d)面板说明了变化的净需求如何影响估计过程。发生这种情况是因为改变净需求会改变净需求与可调度产能的供应曲线相交的位置。该交叉点由“边际”(紫色)的化石燃料工厂(或边界点)指示。改变清除化石植物(或边界点)会影响相对边际成本(ΔP)和所有可调度供应的可用容量(ΔQ)值。对于高边际成本工厂(红色)和低边际成本工厂(蓝色)，说明了这两个变量。

图B.3：淘汰导致工厂级生产变化

(a) 褐煤 (b) 硬煤

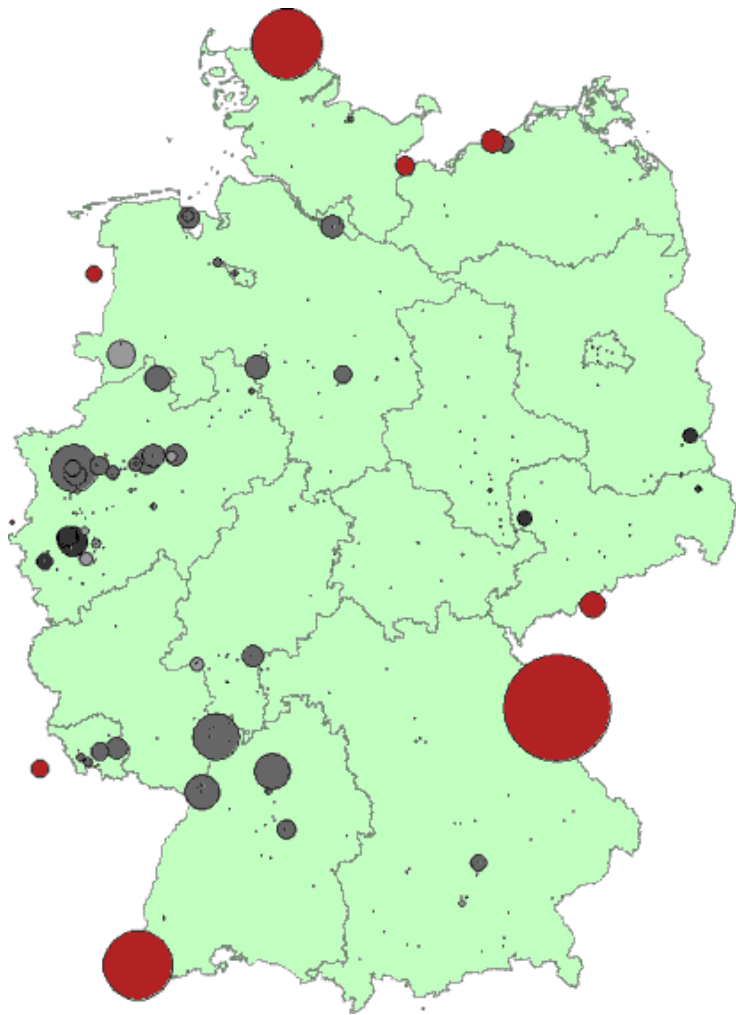


(c) 天然气 (d) 边界



笔记：该图说明了机器学习预测模型结果的工厂级别分解。该模型预测每个发电厂每小时的运转率，其中0%的值表示电厂离线，而100%的值表示电厂以最大容量运行。这些数字绘制了工厂级别的年平均开工率。x轴对应于基准情景中逐步淘汰的每个工厂的开工率。y轴对应于淘汰对工厂级运营的影响。这由有淘汰情景与无淘汰情景的预测之间的差异决定。较暗的区域表示较高的植物年观测值。每个面板都涉及不同类型的可调度电源。(a) 面板涵盖褐煤厂，面板 (b) 涵盖了硬煤电厂，面板 (c) 涵盖了燃气电厂，面板 (d) 涵盖了边界点。未显示油厂，因为它们仅占总产能的很小一部分，并且在逐步淘汰方面基本不变。

图B.4：由于淘汰而导致的工厂级生产变化图



注意：此地图显示了由于核淘汰政策而增加了电力生产的化石燃料发电厂或边境点的位置。圆圈的大小反映了化石燃料工厂或边境点提供的额外产量。红色的点是边境点，灰色的点是化石燃料工厂。褐煤厂用最深的灰色表示，其次是硬煤，然后是天然气，最后是石油厂用最浅的灰色表示。