arXiv:2305.02552v1 [econ.GN] 4 May 2023

# 理解交易费机制中的等待时间：跨学科视角

Luyao Zhang*†数据科学研究中心和社会科学部
昆山杜克大学 中国

Fan Zhang*耶鲁大学计算机科学系 美国

**摘要**

我宁愿发现一条因果定律，也不愿成为波斯国王。——德谟克利特，公元前460—378年 [56]

区块链使网络空间中的点对点交易成为可能，无需可信第三方。以太坊和智能合约区块链的迅速发展，普遍需要精心设计的交易费机制（TFM），以分配有限的存储和计算资源。然而，现有的交易费机制研究必须考虑交易的等待时间，这对计算机安全和经济效率至关重要。通过整合以太坊区块链和内存池的数据，我们探究了两类事件对交易延迟的影响。首先，我们应用回归不连续设计（RDD），研究以太坊近期一次重大升级——合并的因果效应。结果表明，合并显著缩短了长等待时间，并降低了网络负载和市场拥堵。此外，我们通过考察其他复合因素来验证结果的稳健性，例如审查，以及通过私有变更造成的交易未观测延迟。其次，通过考察合并期间的三项主要协议变更，我们发现区块间隔缩短最有可能解释我们的实证结果。此外，在一个数学模型中，我们表明，区块间隔是 EIP1559 交易费机制的一项独特机制设计选择，有助于实现更高的安全性和效率，并普遍适用于需求激增造成的市场拥堵。最后，我们使用 Facebook Prophet（一种用于生成时间序列模型的开源算法）进行时间序列分析，研究非同质化代币（NFT）空投与市场拥堵之间的相互作用。研究发现，NFT 空投是市场拥堵的一种独特来源，可产生节假日效应，超越趋势和季节效应。最后，我们展望了交易费机制的三个未来研究方向。本研究推动了计算机科学与经济科学交叉领域的跨学科研究，聚焦区块链技术的应用，包括计算机安全、分布式系统、市场设计、因果推断和时间序列分析。我们的发现揭示了交易费机制的一条新方向：通过结合实证研究与理论研究的混合方法，提升区块链安全性和效率。

*共同第一作者及通讯作者：Fan Zhang（电子邮箱：f.zhang@yale.edu；地址：美国康涅狄格州纽黑文市 Prospect 街 51 号，邮编 06520）和 Luyao Zhang（电子邮箱：lz183@duke.edu；地址：昆山杜克大学，江苏省昆山市 Duke 大道 8 号 D 座，邮编 215316，中国。）

†Luyao Zhang 在大学假期期间以独立项目的形式完成了这项研究，同时也是 SciEcon CIC 的成员，地址为英国伦敦科文特花园 Shelton 街 71–75 号，邮编 WC2H 9JQ

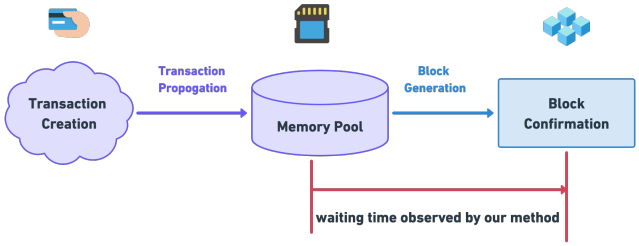



**图 1：以太坊交易经由公共内存池的生命周期及其等待时间的定义。**

## 1 引言

区块链使网络空间中的点对点交易无需可信第三方即可进行 [20, 54]。以太坊 [16] 及智能合约区块链整体的迅速发展 [51, 75]，促使人们设计完善的交易费机制（TFM）[18, 22, 29, 30, 37, 61, 63]，以分配有限的存储和计算资源 [17]。Ante 和 Saggu [5] 运用格兰杰因果关系的时间序列分析，记录了交易费用在影响以太坊区块链网络各类子系统的经济活动方面所发挥的重要作用，这些子系统包括跨链桥、中心化交易所（CEX）、去中心化交易所（DEX）、最大可提取价值（MEV）、非同质化代币（NFT）和稳定币。

在区块链应用中，交易等待时间——即用户必须等待其交易被挖出的时间——至关重要，通常也希望缩短等待时间。图 1展示了以太坊交易经由公共内存池的生命周期。在市场设计中，交易等待时间是衡量市场拥堵程度的重要指标 [4, 35, 50]——等待时间越长，表明市场越拥堵，流动性和配置效率也越低 [60]。更重要的是，早期关于交易费机制的理论研究强调，无市场拥堵条件对于实现其他理想结果至关重要，而这些结果也关系到区块链安全：Roughgarden [62, 63] 证明，在无市场拥堵条件下，或者用理论术语来说——当区块大小无限时，以太坊当前名为 EIP1559 的交易费机制近似于一种“销毁式报价拍卖”，能够同时实现用户激励相容性、矿工激励相容性和 c-侧合约稳健性这三项特性。然而，当市场拥堵，或者区块大小有限时，我们就会面临一般性的三难困境，难以同时满足这三项特性。Chung 和 Shi [22] 首次在常规设定下证明了有限区块不可能性定理。Shi 等人 [65] 致力于通过探索来规避这些不可能性

两个方向——一个允许采用较弱版本的激励相容性，另一个运用密码学为交易费机制配备多方计算辅助模型。然而，Shi 等人 [65] 的研究结果进一步印证了有限区块不可能性定理。如何化不可能为可能？Chung 和 Shi [22], Roughgarden [61, 63], Shi 等人[65] 的研究启示我们，理解等待时间并避免市场拥堵，对于在交易费机制中实现预期结果至关重要。

然而，在实际系统中，交易等待时间是多种相互交织因素共同作用的结果，包括系统参数（例如区块间隔和区块大小）[3, 78], 网络延迟 [69],拥堵程度 [47]等，这使得我们难以理解观测到的等待时间背后的确切机制。例如，近期一项实证研究 [44] 指出，伦敦硬分叉 [32], 是以太坊区块链的一次重大升级，于2021年8月5日实施了以太坊改进提案 1559（EIP-1559）[57]，并意外地显著缩短了等待时间。然而，现有的理论框架 [22, 61, 63, 65] 无法解释这些现象。

区块链上的政策冲击是否会影响交易等待时间，像盖梯尔案例 [12] 那样只是单次事件，还是值得理论研究的重复现象？此外，Reijsbergen 等人 [58] 指出，在市场拥堵期间需求激增时，EIP-1559 会缓慢调整基础费用，这很可能是 NFT 空投等冲击所致。 [53, 72, 76] 那么，考虑到 NFT 空投等社区活动，我们能否改进对需求激增的预测？如果我们能够有效预测需求激增，并设计交易费机制来更好地协调市场，就可以在市场拥堵发生之前加以防范。我们的研究旨在回答以下三个问题，探讨冲击对交易等待时间的影响：

(1) **其他条件不变：**[1] 合并——以太坊最近一次重大升级——如何影响 EIP-1559 交易费机制中的延迟？与此同时，不知法不免责，[2] 还有哪些其他不可观测因素和混杂因素可能影响 EIP-1559 交易费机制中的延迟？

(2) **无限地：**[3] 我们能否构建一个数学模型，解释合并对交易费机制的主要影响，并为未来的交易费机制设计提供总体指导？

(3) **作必要调整后：**[4] NFT 空投如何与 EIP-1559 交易费机制中的网络拥堵相互作用？

## 1.1 挑战与我们的方法

我们的研究面临的挑战在于，如何综合计算机科学和经济科学领域中适用于以太坊交易费机制（TFM）的研究见解。

区块链在研究问题、方法论和应用场景方面。

(1) **研究问题**：尽管彼此紧密关联，等待时间问题却与计算领域和经济科学中的不同术语交织在一起。要认识到这种跨学科联系，就必须从根本上理解这两个领域的文献。我们回顾并串联不同学科中的相关术语，并在附录A 中提供术语表，列举若干相关示例。

(2) **方法论**：目前尚无适用于区块链和内存池数据、能够同时对安全性和效率这两个方面进行推断的方法。我们分别针对其他条件不变和作必要调整后的情形，匹配适当的工具。首先，为了理解合并的因果效应，我们应用回归不连续设计（RDD）方法 [71]。RDD 广泛应用于经济学及其他社会科学领域，是一种准实验前测后测设计；当不存在通过随机对照试验生成的反事实时，它能够估计合并等自然实验的局部平均处理效应（ATE） [39]。其次，为了研究 NFT 空投与市场拥堵之间的相互作用，我们使用 Facebook Prophet [70], ——一种用于生成时间序列模型的开源算法，可将预测分解为趋势、季节性和节假日效应等组成部分。我们还使用 Python NetworkX [28]，比较可能影响结果的特定交易所涉及的网络。

(3) **应用场景**：由于区块链系统的复杂性以及影响等待时间的多个混杂因素，采用标准因果推断方法来估计合并的影响面临挑战。例如，回归不连续设计方法并不会自动排除潜在混杂变量造成的因果效应；这些变量可能恰好在合并发生时对等待时间产生处理效应 [38] 。Cunningham [25] 指出，目前不存在能够普遍排除混杂因素影响的检验，因此研究人员必须运用领域专业知识来评估因果推断。Yang 等人 [80] 表明，美国财政部外国资产控制办公室（OFAC） [6] 制裁的交易往往具有更长的等待时间。我们通过考察数据时间范围内的所有受制裁交易，考虑了潜在的混杂效应。

## 1.2 我们的发现

*1.2.1* 其他条件不变。我们发现，尽管交易到达率——即每秒提交到公共内存池的新交易平均数量——从每秒 12.1 笔增加到每秒 13.0 笔，但合并降低了以太坊上长等待时间、网络负载和市场拥堵的高风险。

• 等待时间。 合并显著降低了上分位数——例如，合并对 75% 分位数的局部平均处理效应为减少 13.4 秒（38%），从 35.0 秒降至 21.6 秒。此外，合并后，以四分位距（IQR）衡量的区块内等待时间也显著缩短——合并对 IQR 的局部平均处理效应为减少 26.1 秒（47.8%），从 54.5 秒降至 28.4 秒。结果的 p 值

[1]Ceteris paribus 是一个拉丁语短语，通常意为“其他条件相同”。在经济学中，它用来简要说明在其他变量保持不变的情况下，一个经济变量对另一个经济变量的影响 [59]。参见https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ceteris-paribus。[2]在法律中，ignorantia juris non excusat（拉丁语格言，意为“不知法不免责”）是一项法律原则，规定一个人不能仅仅因为不了解法律内容，就免于承担违反该法律的责任 [42]。[3]Ad Infinitum 用于表示数学证明中在所有情况下都成立的性质，也用于哲学语境，意为“在所有情况下重复” [81]。参见https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ad-infinitum。[4]Mutatis mutandis 是一个中世纪拉丁语短语，意为“对应该改变的事项作出相应改变”或“作必要调整后” [68]。参见https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/mutatis-mutandis。

——拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于 0.01。**我们的结果表明，在其他条件相同的情况下，合并后用户交易平均能够更快地纳入区块。这有助于改善用户体验，并降低在以太坊进行交易时长时间等待的风险。**

• 网络负载。 根据 Liu 等人的研究， [44],我们将网络负载定义为节点参与区块链协议所必须执行的计算、网络通信和存储工作量。例如，本文使用以太坊中每秒消耗的 Gas 来衡量网络负载。网络负载显著增加可能对区块链的安全性产生负面影响，因为这会使计算能力较弱的节点无法参与，从而导致中心化，同时还会增加区块处理时间，从而导致更高的分叉率 [33, 74]。 **我们的结果表明，合并显著降低了以太坊系统的网络负载，这对区块链安全具有积极影响。** 例如，合并对 1 个区块、5 个区块和 7200 个区块的网络负载移动平均值的平均处理效应分别为降低 28.55%、28.50% 和 22.31%。这些结果的 p值——即拒绝合并没有平均处理效应这一零假设的错误率——均低于 0.01。

• 市场拥堵。我们将市场拥堵定义为区块消耗的Gas超过区块Gas上限的95%。通过结合回归不连续设计的逻辑回归 [21]，我们发现，合并显著降低了市场拥堵的相对风险——即发生拥堵与未发生拥堵的概率之优势比——降幅为52.72%。此外，合并还显著降低了市场连续拥堵5个区块（ ~ 60 41 08 秒）的相对风险，降幅为 . %。这些结果的p值——即拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于0.01。**我们的结果表明，合并通过降低发生（持续性）拥堵的可能性，大幅提升了市场效率。**不知法不免责：我们认为，未观测延迟以及由OFAC制裁等因素导致的系统性交易偏好等其他因素，不太可能影响我们的结果。

*1.2.2* 无限地。 在考察合并带来的三项重大协议变更后，我们发现，我们的结果最有可能是区块间隔变化的直接后果。我们抽象出一个数学模型，阐明 EIP1559 中的基础费用调整对于合并至关重要，具体而言，区块间隔缩短能够同时对等待时间、网络负载和市场拥堵产生积极影响。**区块间隔缩短会促使 EIP1559 中的基础费用在任何需求激增期间更快地进行调整，从而为以太坊上的费用市场提供更及时的信号。** 因此，我们的结果为未来交易费机制的区块间隔设计提供了指导。

*1.2.3* 作必要调整后。 我们发现，考虑 NFT 空投带来的冲击，能显著提升对市场拥堵的预测效果，尤其是对持续性市场拥堵的预测。我们将拥堵比率定义为日内拥堵区块所占的百分比，并将持续拥堵比率定义为日内连续 5 个区块均处于拥堵状态的区块所占的百分比。**时间序列模型成功识别出 NFT 空投带来的假日效应，以及趋势和季节效应。此外，NFT 空投与（持续）拥堵比率的峰值成功吻合。**

本文其余部分的结构如下。第 2 节讨论相关文献。第 3 节介绍数据和方法。第4节展示合并的实证分析结果，并考察混杂因素。第 5 节将区块间隔建模为 EIP-1559 交易费机制的一项新设计特征。第 6 节以 NFT 作为需求激增的典型案例进行论证。在第 7节中，我们展望交易费机制设计的未来。我们的开放源代码数据和代码可在 GitHub 上获取：https://github.com/cs-econ-blockchain/waiting-time-eip1559。

## 2 相关文献

我们的研究为区块链技术应用中计算与经济科学交互作用方面的文献做出了贡献。

### 2.1 对经济学文献的贡献

• 区块链上的市场与机制设计。 机制设计理论 [51], 由 2007 年诺贝尔经济学奖得主莱昂尼德·赫维奇、埃里克·S·马斯金和罗杰·B·迈尔森开创，旨在设计实现预期目标的激励机制。2012 年诺贝尔奖得主阿尔文·E·罗斯和劳埃德·S·沙普利将机制理论应用于择校和就业等具体经济问题，并为市场设计奠定了基础 [49]。然而，现有机制与市场设计理论在执行时需要可信第三方，而这一点难以得到保证。相比之下，以太坊区块链能够在分布式系统中自动执行交易费机制。因此，要确保交易费机制在以太坊上如实执行，无需可信第三方，而是将其转化为一个计算机安全问题 [34]。早期开创性文献研究了区块链上交易费机制的机制设计与市场设计 [61], 包括 [63], [22], [44] 。

我们对交易费机制中等待时间的研究进一步探寻兼具经济与安全重要性的预期结果，从而推进了相关文献的发展。

• 区块链自然实验的因果推断。 2021 年诺贝尔经济学奖得主——David Card、Joshua D. Angrist 和 Guido W. Imbens——运用因果推断研究自然实验，以分析影响人类福祉的政策变化 [9]。然而，在区块链技术出现之前，自然实验中有意义的数据很少能用于研究。区块链技术使以太坊自然实验前后的宝贵数据得以自动记录且不可篡改。新兴文献运用因果推断方法研究 EIP-1559 这一自然实验，包括 Liu 等人 [44], 、Zhang 等人 [84], 和 Cong 等人 [24]。我们的研究将区块链数据与短暂存在的内存池数据相结合，拓展了相关文献，研究以太坊最近一次重大升级——合并——前后政策对计算机安全和经济效率的影响。

• 区块链上的时间序列分析预测。2013年诺贝尔经济学奖得主 Eugene F. Fama、Robert J. Shiller 和 Lars Peter Hansen 将时间序列分析应用于资产定价，从而成功预测股票和债券的价格变化 [66]。

新兴文献将时间序列分析扩展至区块链上加密资产的估值，包括 Liu 和 Zhang [46], Liu 和 Tsyvinski [45], 以及 Cong 等人。 [23]我们将时间序列分析进一步应用于预测以太坊交易费机制中的市场拥堵。

### 2.2 对计算机科学文献的贡献

**计算机科学文献结束**

• *EIP-1559*交易费机制 我们的研究为新兴的区块链交易费机制文献做出了贡献，具体而言，是关于以太坊上的 EIP-1559 交易费机制的研究 [22, 61, 63, 85]。在这方面，我们的研究与 Liu 等人 [44], 的工作最为相关；他们通过分叉率、网络负载和矿工收入构成，实证研究了 EIP-1559 如何影响以太坊的等待时间和共识安全性。本研究扩展了 [44] 的方法，以探讨合并的影响。

• 合并的实证分析。本文对合并的影响进行了实证测量。我们的研究与 Kapengut 和 Mizrach [41] 最为接近；他们比较了合并前后的各项指标，例如能源消耗、矿工奖励、代币供应量、交易费用等。然而，Kapengut 和 Mizrach [41] 并未像我们一样旨在理解合并的因果推断。他们也没有像我们一样研究交易等待时间或网络负载，尽管涉及了区块创建时间。

• 合并后以太坊的实证安全性。合并后的以太坊协议的共识安全性——或攻击——已得到广泛研究，参见 D'Amato 等人 [26], Pavloff 等人 [55] 及其中的参考文献。我们研究合并对网络负载的影响；其对安全性的影响与具体的共识机制无关。

## 3 数据与方法

### 3.1 数据

*3.1.1* 数据源。我们的数据源包括以太坊区块链和内存池数据，以及用于研究 Tornado Cash 审查的 OFAC制裁地址。 [5] 表 7 见附录 B 展示了所查询变量的数据字典。

• 以太坊区块链数据：我们使用 ethereum-etl [6]——一组用于以太坊抽取、转换和加载（ETL）任务的 Python 脚本，以查询区块链数据。我们通过付费订阅使用 QuickN- ode [7] 提供的端点，查询了区块数据和交易数据。

• 以太坊内存池数据：我们使用 Mempool Guru 服务提供的内存池数据[8] 。该服务利用多个全节点监控以太坊内存池，并记录交易首次出现在内存池中的时间戳。Mempool Guru 还会记录我们的全节点首次观察到区块的时间。给定交易的等待时间是这两个时间戳之差，在数据库中以 delay 作为变量名。区块链中的交易与内存池中的交易之差集，即为私有交易，它们未先进入公共内存池，便被纳入区块链。

• *OFAC*制裁地址：我们从 OFAC 计划网站获取了用于 Tornado Cash 审查的 OFAC制裁地址列表。 [9] 由于我们的数据范围截至 9 月 25 日，因此我们选择了 11 月 8 日更新之前的列表。

*3.1.2* 数据范围。我们的数据包含两个时间范围，分别用于研究合并和 NFT 空投。

• 合并：表1展示了合并前后的数据范围，共计 140,000 个区块。

• *NFT* 空投：表2 展示了涵盖三次 NFT 空投的数据范围，包括 2021 年 8 月 31 日的 Fatales、2021 年 9 月 9 日的 Pointilla 和 2021 年 9 月 14 日的 GalaxyEggs，共计 181,075 个区块。

**表1：合并前后的数据范围：区块总数=140,000，交易总数=23,871,253**

| type | from | to |
|---|---|---|
| 日期时间_ | 2022-09-03 20:10:39 | 2022-09-25 02:27:11 |
| unix_时间戳 | 1662235839.0 | 1664072831.0 |
| 区块编号 | 15467393 | 15607393 |

**表 2：数据范围涵盖三次 NFT 空投：区块总数=181075**

| type | from | to |
|---|---|---|
| 日期时间_ | 2021-08-24 00:00:00 | 2021-09-21 00:00:00 |
| unix_时间戳 | 1629763200.0 | 1632182400.0 |
| 区块编号 | 13084679 | 13265754 |

### 3.2 方法

*3.2.1* 回归不连续设计（*RDD*）。我们采用回归不连续设计 [71]来估计合并对等待时间、网络负载和市场拥堵的局部平均处理效应。我们通过公式（1）指定回归不连续设计：

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \mathbb{1}(\text{merge}) + \alpha_2 \mathbf{X} + \alpha_3 \mathbb{1}(\text{merge})\mathbf{X} + \epsilon. \quad (1)$$

这里， $\alpha_1$ 是表示合并发生情况的指标变量的系数（影响区块编号 $\geq 15537393$），用于刻画合并的平均处理效应。 $\alpha_2$ 是控制变量 X 的系数。我们在样本中控制区块编号，以考虑合并前可能存在的时间趋势，该趋势定义为

$$\text{blockn} = \begin{cases} \text{number} - 15537393 & \text{pre-merge period} \\ \text{number} - 15537393 & \text{post-merge period} \end{cases}.$$

$\alpha_3$ 是交互项 $\mathbb{1}$(合并)X的系数，反映了合并与时间趋势交互作用的平均处理效应。

[5] https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy
[6] https://github.com/blockchain-etl/ethereum-etl [7] https://www.quicknode.com/ [8] https://mempool.guru
[9] https://home.treasury.gov/policy-issues/office-of-foreign-assets-control-sanctions-programs-and-information

*3.2.2* 时间序列预测。我们采用 Facebook Prophet [70], 这一开源算法 [10] 来生成可分解的时间序列模型 [36]。模型由公式（2）指定。

$$y(t)=g(t)+s(t)+h(t)+\epsilon(t). \quad (2)$$

这里， $g(t)$ 是用于模拟时间序列数值非周期性变化的趋势函数，$s(t)$ 表示每周周期性变化， $h(t)$ 表示节假日的影响，这些节假日可能在 NFT 空投日以不规则的时间间隔出现。误差项 $\epsilon(t)$ 表示模型未能涵盖的任何特异性变化，假定其服从正态分布。

*3.2.3* 网络分析。我们使用 Python NetworkX [28]，（一个开源网络分析软件包）绘制合并前后受 OFAC 制裁交易的无向图 [79]。

## 4 合并的实证分析

在本节中，我们介绍研究结果。然后在下一节讨论其含义。

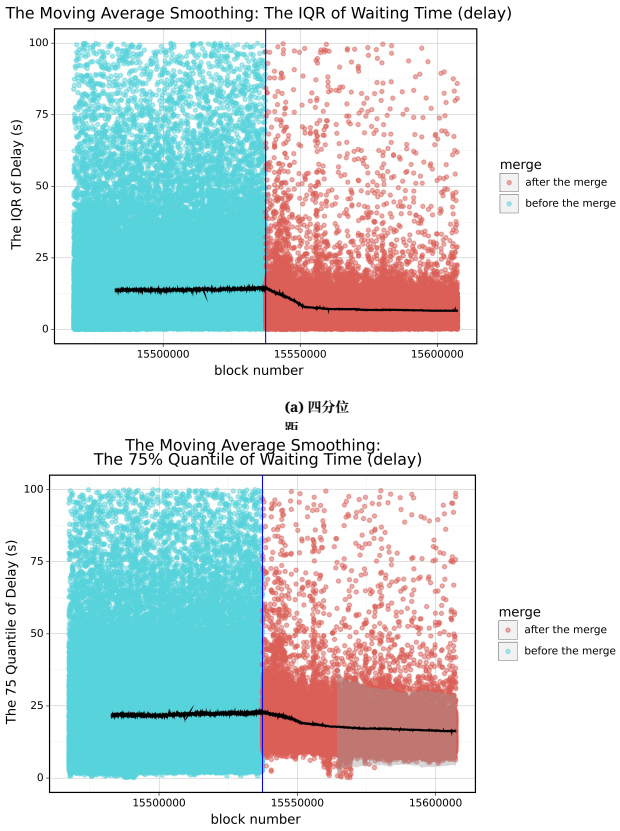
### 4.1 等待时间、网络负载和市场 Congestion 的结果

**在其他条件不变的情况下**：合并——以太坊最近一次重大升级——如何影响 EIP-1559 交易费机制中的延迟？我们发现，尽管交易到达率——即每秒提交至公共内存池的新交易平均数量——从 12.079 增至 12.997，合并仍显著降低了以太坊上时间机会成本过高、网络负载过重和市场拥堵的风险。

*4.1.1* 等待时间。我们将等待时间定义为首次观察到内存池中的交易到该交易被打包上链之间的时间差。图2 展示了合并前后，等待时间的区块内四分位距和 75% 分位数的移动平均平滑结果。附录D中的表13 和表14 给出了合并前后等待时间区块内 75% 分位数和四分位距的回归不连续设计结果。合并显著降低了上分位数——如表13 第（3）列所示，合并对 75% 分位数的局部平均处理效应为减少 13.4 秒，即从 35.0 秒降至 21.6 秒。结果的 p值——即拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于 0.01。此外，以四分位距（IQR）衡量的区块内等待时间在合并后也显著缩短——如表14第（3）列所示，合并对四分位距的局部平均处理效应为减少 26.1 秒，即从 54.5 秒降至 28.4 秒。结果的 p值——即拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于 0.01。我们的结果表明，合并显著改善了用户体验，降低了在以太坊区块链上进行交易时面临高时间机会成本的风险。

*4.1.2* 网络负载。 在合并之前，以太坊的区块生成是一个随机过程，区块间隔大致服从指数分布。当区块连续快速生成时，节点需要投入更多的计算资源和带宽来处理区块，从而经历负载突增。Liu 等人 [44] 量化了

[10]https://github.com/facebook/prophet




**(a) 四分位距**

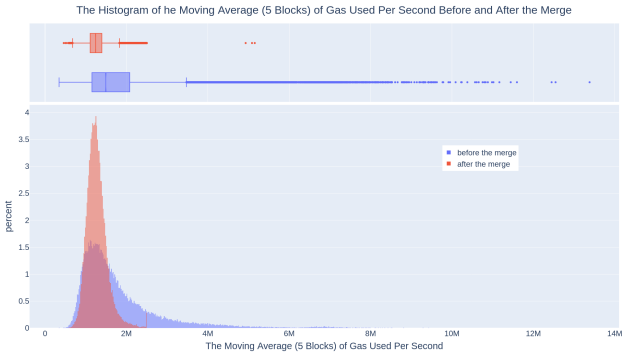
**(b) 75% 分位数**

**图 2：合并前后按区块统计的等待时间（延迟）移动平均平滑**

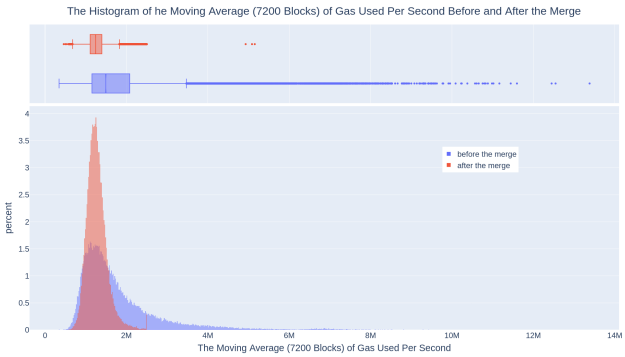
网络负载的分布，定义为给定时间段内平均每秒的 Gas。Liu 等人 [44] 表明，尽管其期望值约为每秒 115 万 Gas，但观测到的最高网络负载可能高得多（例如每秒 600 万 Gas）。然而，合并后，区块以恒定速率（每 12 秒）生成。一个自然的问题是，这会如何影响网络负载。

图 2 展示了合并前后每秒消耗的 Gas 的 5 区块和 7200 区块移动平均值直方图。附录8中的表格 9、表格 10 列出了合并前后每秒消耗的 Gas、每秒消耗的 Gas 的 5 区块移动平均值，以及每秒消耗的 Gas 的 7200 区块移动平均值的统计数据。附录 C 中的表格 16、表格 17和表格 18 分别给出了附录 D 中的回归不连续设计结果。合并对 1 区块、5 区块（通常略多于 60 秒）和 7200 区块（通常略多于 1 天）移动平均网络负载的平均处理效应分别为降低 28.55%、[11] 28.50%、 [12] 和 22.31% [13]，数据分别取自表格 16、表格 17和表格 18 第 (3) 列。结果的 p 值——即拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于 0.01。因此，我们得出结论

[11]起始值为 1777314.312，结束值为 1269919.127，每秒减少 507395.185 个单位 [12] 起始值为 1776803.682，结束值为 1270499.904，每秒减少 506303.778 个单位 [13] 起始值为 1771125.786，结束值为 1380930.813，每秒减少 390194.973 个单位

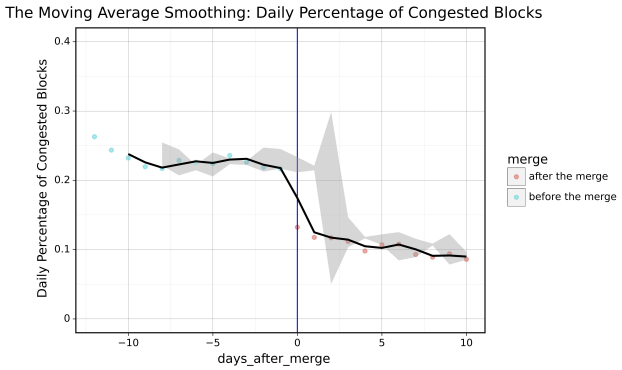



**(a) 5 区块移动平均值**

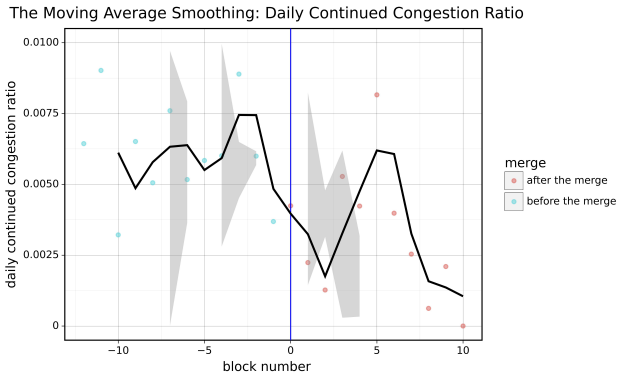



**(b) 7200 区块移动平均值**

**图 3：合并前后每秒消耗的 Gas 移动平均值的直方图**




**(a) 移动平均平滑：每日拥堵区块百分比**




**(b) 移动平均平滑：持续拥堵区块的每日百分比**

**图 4：合并前后的每日市场拥堵**

在控制其他混杂因素后，合并显著降低了区块内每秒消耗的 Gas。

*4.1.3* 市场拥堵。我们将市场拥堵定义为区块消耗超过区块 Gas上限 95% 的情况。图4a和图4b 展示了每日拥堵区块和持续拥堵区块百分比的移动平均值。附录D中，表11 和表12 给出了使用逻辑回归的回归不连续设计结果 [21]。根据表11 第（3）列的计算结果，我们发现，合并使市场拥堵的相对风险——即发生拥堵与未发生拥堵的概率之比（优势比）——显著降低了 52.72%。 [14] 此外，合并还显著降低了市场连续 5 个区块（~ 60 秒）发生拥堵的相对风险，降幅为 41.08%；该结果根据表12 第（3）列计算得出。 [15] 所有结果的 p 值——即拒绝“合并没有平均处理效应”这一零假设的错误率——均低于 0.01。

因此，我们得出结论：合并显著降低了市场拥堵的可能性。此外，合并还显著降低了市场连续 5 个区块处于拥堵状态的可能性（~ 60 秒）。我们的结果表明，合并通过降低市场持续拥堵的可能性，大幅提升了市场效率。为进一步检验该结果的稳健性，我们在图 5 中展示了合并前后采用不同切分标准（包括我们分析中选取的 95%）时的拥堵比率。可以看到，使用任何大于 50% 的切分标准定义的拥堵比率，在合并后均有所下降。

## 4.2 考察混杂因素

**不知法律不免责**：还有哪些其他不可观测因素和混杂因素可能影响 EIP-1559 交易费机制中的延迟?

*4.2.1* 结果。首先，并非所有交易等待时间都可以测量。主要原因是存在各种最大可提取价值（MEV）拍卖平台 [80]，这些平台实际上为交易创建了私有通道，使其无需经过公共内存池即可直接发送给矿工（或提议者）。因此，其等待时间是最大可提取价值拍卖平台的私有信息。表3显示，合并之后，未观测延迟的数量增加，而可观测延迟的数量减少。我们有充分理由假设，通过私有通道发送且付费以获得优先处理的交易，其延迟较低。在这种情况下，如果考虑未观测延迟，我们预计合并降低等待时间中位数和 75% 分位数的结果会更显著。然而，目前尚

[14] $1-e^{-0.749}=52.72\%$
[15] $1-e^{-0.529}=41.08\%$

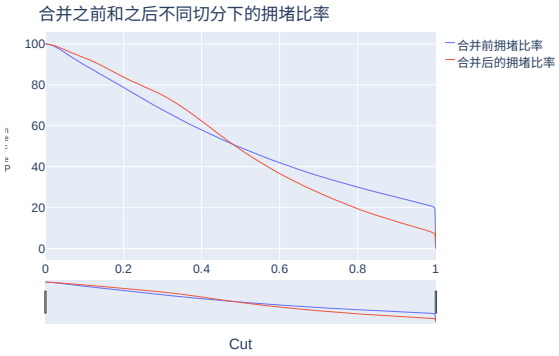



**图5：合并前后不同切分下的拥堵比率**

**表 3：合并前后的已观测和未观测延迟**

| 延迟合并 | 已观察到 | 未观察到 |
|---|---|---|
| 之前 | 11947760 | 326561 |
| 之后 | 11058935 | 537997 |

**表 4：合并之前和之后的获准和未获准交易**

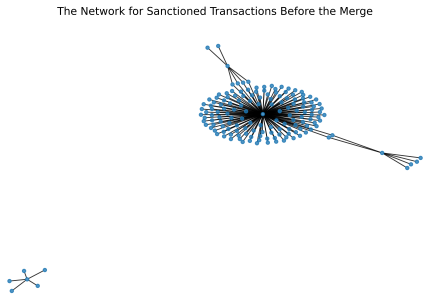
| 合并受制裁 | 之前 | 之后 |
|---|---|---|
| no | 9712821 | 9120233 |
| yes | 1007 | 466 |

没有办法测量未观测延迟，从而验证或证伪我们的假设。通过私有通道的交易等待时间可能更长，因为中继会在交易到达提议者之前增加额外的处理时间。我们将验证工作留待未来研究。

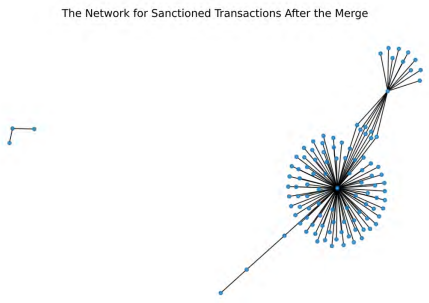
可能导致等待时间的另一个因素，是交易存在某些系统性偏好。例如，近期对 Tornado Cash 的制裁造成了这种偏好，符合 OFAC 规定的实体（如中继、构建者）会拒绝处理违规交易 [80]。因此，这些交易的等待时间会增加。不过，我们首先注意到，表 4 显示，受制裁交易的数量远少于未受制裁交易。因此，它们对所有交易等待时间的均值和分位数的影响应该很小。附录20 中的表E显示，合并后，受制裁和未受制裁交易的延迟中位数和 75% 分位数均有所下降。图6a、图6b和图6c 进一步以无向图展示了合并前后受 OFAC 制裁交易的网络结构。[16] 边表示受制裁交易，边的顶点则是




**(a) 合并前后受 OFAC 制裁交易的网络**




**（b）合并前 OFAC 受制裁交易网络**




**（c）合并后 OFAC 受制裁交易网络**

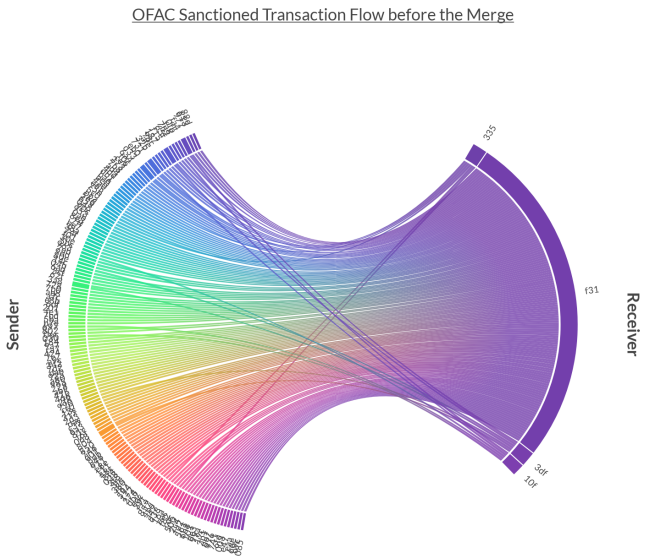
**图 6：OFAC 受制裁交易网络**

受制裁交易的发送方或接收方。这些图表表明，在无向图中，OFAC 制裁交易的网络结构在合并前后没有显著变化。因此，我们得出结论：考虑 OFAC 制裁交易这一混杂因素，不太可能改变关于合并对等待时间统计数据影响的因果推断。

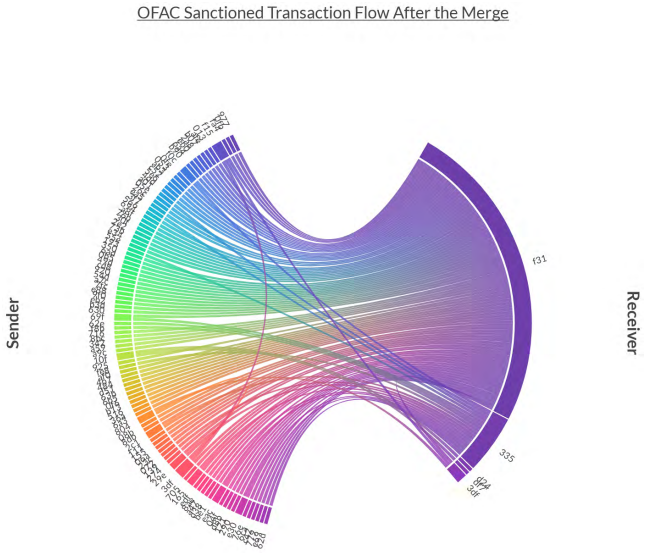
[16] https://networkx.org/documentation/stable/reference/classes/generated/networkx.Graph.结束_undirected.html

因为它既不会改变结构，也不会影响合并前后一定比例的交易。

我们还发现了一个有趣的附带结果。首先，图7 比较了分叉弦图中合并之前（图7a）和合并之后（图7b）的 OFAC制裁交易流。在二部弦图中，受 OFAC 制裁的交易中的发送方和接收方以弧或节点的形式沿径向排列在左右两侧，交易则通过连接双方的弦线或连线进行可视化。无论是在合并前还是合并后，大多数受 OFAC 制裁的交易的接收方都拥有一个受制裁地址，其末三位为 $f31$。此外，附录E 中的表19显示，合并后受制裁交易中有 9 笔存在未观测延迟，这些交易都与末三位为 $31b$的受制裁地址有关。在合并前没有发现存在未观测延迟的受制裁交易。为什么？Yang 等人的图 2 [80] 显示，Flashbots 是合并前私有交易的主要竞价平台。Flashbots 符合 OFAC 规定。相比之下，Yang 等人的表 7 [80] 显示，合并后出现了更多不受审查的中继，包括 bloXroute（Max profit 和 Ethical）、Manifold 以及 Relayooor，为受 OFAC 制裁的交易通过私有通道进行提供了机会。




**（a）合并前的 OFAC交易流**




**(b) 合并后的 OFAC制裁交易流**

**图7：合并前后 OFAC制裁交易流**

*4.2.2 启示。* 我们的结果表明，其他混杂因素，例如 OFAC 制裁和私有通道交易，目前并未对等待时间产生显著或明确的影响。与 EIP 升级和 NFT 空投相比，在未来交易费机制的设计中，这些因素属于次要考虑因素。然而，OFAC 制裁对区块链治理所承诺的抗审查性提出了挑战 [43, 52]。我们仍需关注未来可能对区块链交易产生重大影响的制裁。另一方面，通过私有通道进行的交易等待时间虽然目前无法观测，但在私有通道和公共通道之间进行选择时，这是一个重要的权衡因素。未来研究应探索相关方法，以研究私有通道平台的变化如何影响区块链上的交易延迟。

## 5 为交易费机制设计区块间隔

**无限延续**：我们能否建立一个抽象的数学模型，解释合并对交易费机制（TFM）的重大影响，并为未来的交易费机制设计提供总体指导?

### 5.1 合并的三项重大协议变更

由于交易到达率——每秒提交至公共内存池的新交易平均数量——从 12.079 上升至 12.997[17]，因此结果必然源于协议方面。合并有哪些具体的协议变更，使高交易等待时间、网络负载和市场拥堵得以降低？合并 [2] 包含三项重大协议变更：

• 共识算法。以太坊将共识算法从工作量证明 [77] 改为一种结合了

[17]这些数字根据以太坊内存池数据计算得出。Kapengut 和 Mizrach [41] 通过简单统计和 t检验表明，合并后以太坊记录的每日交易量也显著增加。

**表 5：符号说明**

| 符号 | 定义 |
|---|---|
| $b$ | EIP1559 交易费机制中的基础费用 |
| $D(b)$ | 总需求或交易到达率**每秒** 以燃气使用量计量具有高于基础费用的价值、支付意愿或出价 $b$ |
| $I$ | 区块间隔 |

权益证明和最终性组件 [19]。这也改变了矿工获得奖励的方式。

• 区块构建过程。 合并后的区块构建 [67]允许验证者通过称为 MEV-Boost 的构建者市场，将区块构建外包给构建者网络 [1]。构建者生成完整的区块，而不仅仅是交易捆——这样一来，构建者可以通过先生成区块头并让提议者签名，而不先发布区块体，来避免 MEV 被窃取的风险。值得注意的是，验证者通常不会直接从构建者那里获得区块，而是通过 MEV 中继获得；MEV 中继是那些通过相互竞争来证明自身值得信任的可信方。

• 区块时间或区块间隔。合并还将随机区块时间——期望值约为 14 秒的泊松过程——改变为固定区块时间，即每 12 秒产生一个区块；在共识层术语中，这被称为“slot”。 [31] 显示，区块间隔为 24 秒或 36 秒的区块不到 1%，这是由于空 slot 所致。大多数区块的固定区块间隔为 12 秒。

## 5.2 数学模型

三个协议变更中的哪一个促成了我们的结果？我们认为，我们的结果最有可能直接源于区块间隔的变化。Alharby [3] 系统分析了影响交易延迟的因素；在本研究中，交易延迟与交易等待时间可互换使用。[18] 在基于排队模型的仿真实验中，Alharby [3] 的证据表明，交易费用、区块上限、区块间隔、交易到达率（以 TPS 衡量）以及网络节点的行为都会影响交易延迟。然而，Alharby [3] 并非基于 EIP-1559 交易费机制。我们进一步说明，EIP1559 交易费机制中的基础费用调整对于合并至关重要；更准确地说，区块间隔的缩短能够同时对等待时间、网络负载和市场拥堵产生积极影响。

表5列出了相关符号。[19] EIP-1559 交易费机制按照以下调整函数逐区块更新：

$$\mathrm{b}_{n+1}=\mathrm{b}_n\left(1+\frac{1}{8}\frac{\mathrm{GasUsed}_n-\mathrm{GasTarget}}{\mathrm{GasTarget}}\right). \tag{3}$$

在基础费用停止调整的稳定均衡状态下，我们有：

$$D^e(b^e)\times I=\mathrm{GasUsed}_n=\mathrm{GasTarget},\forall n \tag{4}$$

[18]Alharby 对交易延迟或等待时间的定义与我们的略有不同，它还包括交易传播所需的时长，这通常称为网络延迟，如图 1 所示。[19]$D(b)$ 随 $b$ 单调递减。

因此，

$$D^e(b^e)\times I=\mathrm{GasTarget},\forall n \tag{5}$$

*5.2.1* 洞见 *1*：区块间隔变更。 对于合并这类会缩短区块间隔的协议变更，EIP1559 交易费机制建议通过降低基础费用来调整至新的均衡状态。未来的 EIP 提案可以同时缩短区块间隔并降低基础费用，以加快这一过程。例如，假设区块间隔在区块编号 $n$ 处从 $I\downarrow$ 缩短至 $I'$，即 $I'<I$，当 $b_n=b^e$ 时，我们有

$$\mathrm{GasUsed}_n=D^e(b^e)\times I'<D^e(b)\times I=\mathrm{GasTarget} \tag{6}$$

那么，方程（3）和方程（6）意味着：

$$\mathrm{b}_{n+1}<\mathrm{b}^e \tag{7}$$

我们可以直接将基础费用$b^e\downarrow$降低至 $b^{e'}$，从而使需求从 $D^e(b^e)\uparrow$ 增加至 $D^e(b^{e'})$，因此

$$\mathrm{GasUsed}_n=D^e(b^{e'})\times I'=D^e(b^e)\times I=\mathrm{GasTarget} \tag{8}$$

*5.2.2* 洞见 *2*：需求激增。对于社区活动引发的需求激增，EIP1559 交易费机制建议提高基础费用，以适应新的均衡。未来的 EIP 提案可以通过更频繁地提高基础费用、采用更大的增幅，甚至在事前预测到会引发需求激增的社区活动时就提高基础费用，来加速这一过程，例如我们的实证结果所记录的 NFT 空投。

例如，当 $D^e(\cdot)\uparrow$在区块编号 $n$处从 $D'(\cdot)$ 大幅增加时，无论基础费用处于何种水平，即对于某个 $b$，$D'(b)\le D^e(b)\ \forall\, b$且 $D'(b)>D^e(b)$，当 $b_n=b^e$ 时，我们有：

$$\mathrm{GasUsed}_n=D'(b^e)\times I>D^e(b^e)\times I=\mathrm{GasTarget} \tag{9}$$

那么，方程（3）和方程（9）意味着：

$$\mathrm{b}_{n+1}>\mathrm{b}^e \tag{10}$$

我们可以通过将基础费用直接从 $b^e\uparrow$提高到 $b^{e'}$ 来加速这一过程，从而将超额需求从 $D^e(b^e)\downarrow$ 协调至 $D'(b^{e'})$，使得：

$$\mathrm{GasUsed}_n=D'(b^{e'})\times I=D^e(b^e)\times I=\mathrm{GasTarget} \tag{11}$$

*5.2.3* 洞见 *3*：

区块间隔变化如何影响需求激增期间的基础费用调整。对于合并等会缩短区块间隔的协议变更，EIP1559 交易费机制随后会在需求激增期间更频繁地将基础费用调整至稳定均衡状态，从而减少调整期间的市场拥堵、交易等待时间和网络负载，正如我们的实证结果所记录的那样。我们在图 8 中展示了因果图。在需求激增的情况下，如方程（11）所示，新的稳定均衡价格 $b^{e'}>b^e$，其中$D'(b^{e'})\times I=D^e(b^e)\times I$与区块间隔 $I$ 无关。通过

方程式(3)和方程式(9)，我们有

$$\begin{aligned}\frac{(b_{n+1}-b_n)}{b_n} &= \frac{1}{8}\frac{\text{GasUsed}_n-\text{GasTarget}}{\text{GasTarget}} \\ &= \frac{1}{8}\frac{(D'(b^e)\times I - D^e(b^e)\times I)}{D^e(b^e)\times I} \\ &= \frac{1}{8}\frac{(D'(b^e)-D^e(b^e))}{D^e(b^e)}.\end{aligned} \tag{12}$$

等式（12）表明，从区块$n$到区块$n+1$的基础费用调整百分比与区块间隔无关。然而，区块间隔越短，调整就越频繁。因此，合并后基础费用的调整速度远快于合并前，这更能体现此时在以太坊区块链上进行交易的时间机会成本很高，因而价值低于当前机会成本的用户交易请求未被记录。

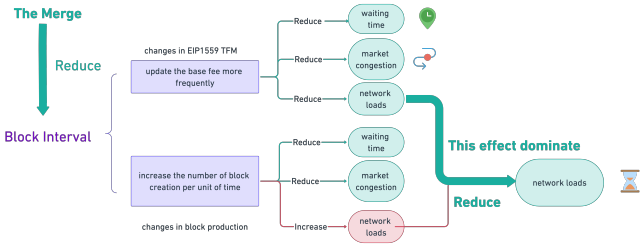



**图 8：合并导致区块间隔缩短的因果图**

关于为实现预期结果而设计连续拍卖之间的时间间隔，频繁批量拍卖（FBA）文献 [14, 15, 40] [20] 在高频交易的市场设计问题中已有讨论。然而，我们的分析在拍卖形式和设计目标这两个方面存在本质差异：首先，Budish 等人 [14] 将 FBA 定义为在频繁但离散的时间间隔内进行的统一价格密封投标双向拍卖。相比之下，我们的分析适用于 EIP1559 交易费机制——尽管它在离散时间间隔内进行，但既不是统一价格拍卖，也不是密封投标双向拍卖。其次，提出 FBA 是为了消除速度竞赛，以及由连续限价订单簿造成的流动性和社会福利损害。Budish 等人 [14] 和 Jagan-nathan [40] 都建议延长区块间隔，以防止时间间隔内的价格操纵。相比之下，我们建议缩短 EIP1559 交易费机制中的时间间隔，以便在需求激增时更灵活地调整价格，从而缓解市场拥堵。

## 6 NFT 空投：需求激增的一个案例

**根据 MutatisMutandis**：NFT 空投如何与 EIP-1559 交易费机制中的市场拥堵相互作用？

### 6.1 研究结果

我们将拥堵比率定义为日内拥堵区块的百分比，并将持续拥堵比率定义为日内持续处于拥堵状态达 5 个区块的区块百分比。图9 比较了默认 Prophet 以及考虑 NFT 空投的节假日效应时间序列模型对拥堵比率及其组成部分的预测：Fatales 于2021年8月31日，Pointilla 于2021年9月9日，以及 GalaxyEggs 于2021年9月14日进行的 NFT 空投。如果 NFT 空投对市场拥堵没有影响，那么两种估计的预测结果、置信区间、趋势、每周效应以及图10 （c）中的节假日效应应当均完全一致，且该节假日效应应为零常数。然而，拥堵比率预测的组成部分在三次 NFT 空投日期显示出明显的正向节假日效应。此外，NFT 空投成功对应了拥堵比率的峰值。图10 比较了默认 Prophet 以及考虑 NFT 空投节假日效应的时间序列模型对持续拥堵比率及其组成部分的预测。除趋势和季节效应外，该时间序列模型再次成功识别出三次 NFT 空投所产生的节假日效应。此外，NFT 空投成功对应了持续拥堵比率的峰值。

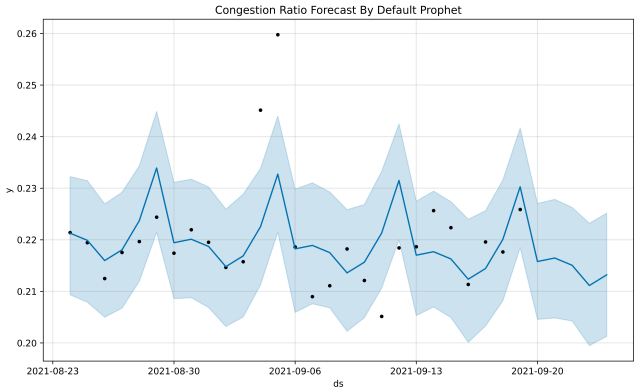
### 6.2 启示

我们的研究结果表明，NFT 空投是市场拥堵的重要来源。因此，我们的研究也加入了现有文献的行列，探讨 NFT 对区块链效率和安全性的重要影响。NFT生态系统正在迅速发展，其市场价值截至 2021[53, 76] 已超过20亿美元。Das 等人 [27] 首次研究了NFT生态系统的安全问题。在考察了排名前八的 NFT 交易市场后，Das 等人 [27] 发现了严重的欺诈性用户行为，包括创建假冒 NFT 以及不正当交易行为（例如，对敲交易、哄抬竞价和竞价屏蔽）。我们的研究结果表明，Das 等人 [27] 所揭示的欺诈性用户行为不仅会直接损害区块链的完整性或安全性，还可能通过造成市场拥堵，进一步削弱区块链的安全性和效率。

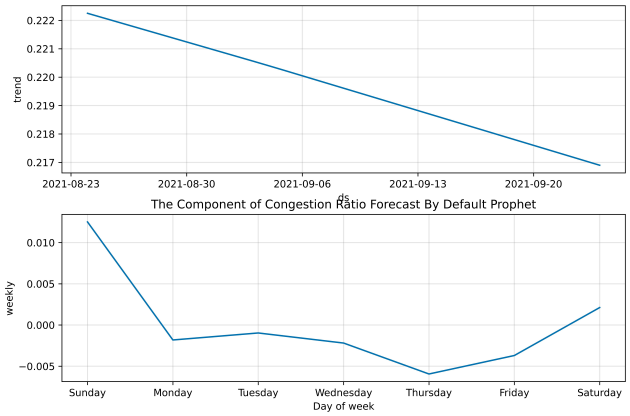
## 7 交易费用机制设计的未来

我们的研究为交易费机制设计揭示了一些新的方向。研究确定了两类可能显著影响交易等待时间及其他相互交织因素（如网络负载和市场拥堵）的事件：EIP 部署，以及 NFT 空投等全社区事件。最重要的是，我们发现，合并降低了以太坊上长时间等待、网络负载和市场拥堵的风险。在考察合并期间的三项重大协议变更后，我们认为，区块间隔缩短是最有可能解释实证结果的原因。此外，在一个数学模型中，我们表明，改变区块间隔是 EIP1559 交易费机制中一种独特的机制设计选择。缩短区块间隔能够加快 EIP1559 交易费机制中的基础费用调整，使费用市场更及时地协调并达到均衡，从而使利益相关者在以太坊交易的效率和安全性方面均获益。我们的理论见解普遍适用于任何类型的需求激增。以太坊交易中的需求峰值出现得有多频繁？此外，我们发现，除趋势和季节效应之外，NFT 空投也是市场拥堵的一个独特来源。通过为 EIP1559 交易费机制设计区块间隔，通常可以缓解包括 NFT 空投在内的全社区事件所引发的市场拥堵。

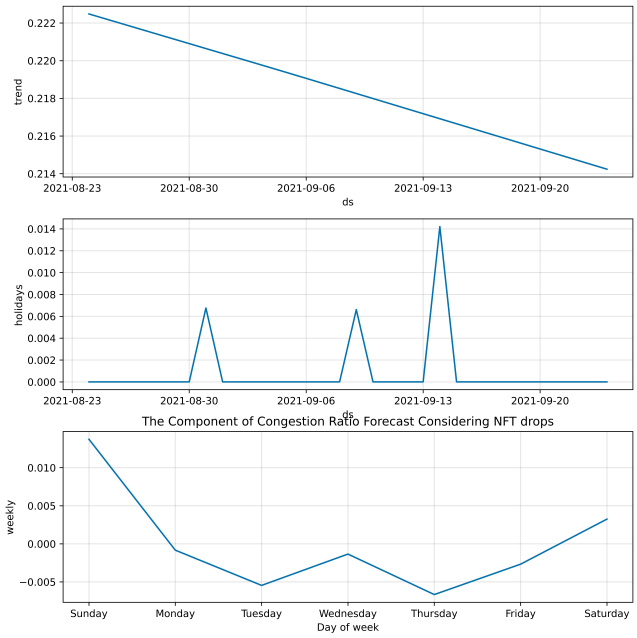
[20]在以太坊生态系统中，Cow 协议使用 FBA 作为解决最大可提取价值（MEV）问题的一种方案：https://docs.cow.fi/overview/batch-auctions。




**(a) 默认 Prophet 预测的拥堵比率**

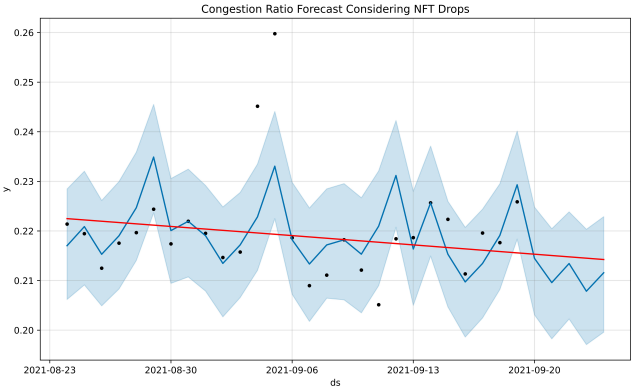



**(b) 默认 Prophet 预测的拥堵比率组成部分**




**(c) 考虑 NFT 空投时拥堵比率预测的组成部分**

图 *(a)* 和图 *(d)* 对比了默认 *Facebook Prophet* 预测的市场拥堵率，以及将三次 *NFT* 空投——*Fatales*（*2021*年*8*月*31*日）、*Pointilla*（*2021*年*9*月*9*日）和 *GalaxyEggs*（*2021*年*9*月*14*日）——作为假日效应纳入考量的 *Prophet* 预测结果。图 *(b)* 将默认 *Facebook Prophet* 预测的拥堵比率分解为趋势和每周效应。图 *(c)* 将拥堵比率预测分解为趋势、每周效应和 *NFT* 空投的节假日效应。若 *NFT* 空投对市场拥堵没有影响，那么两种估算的预测结果、置信区间、趋势和每周效应应完全相同，且图 *(c)* 中的节假日效应应为恒定的零值。




**(d) 考虑 NFT 空投时的拥堵比率预测**

**图 9：拥堵比率预测**

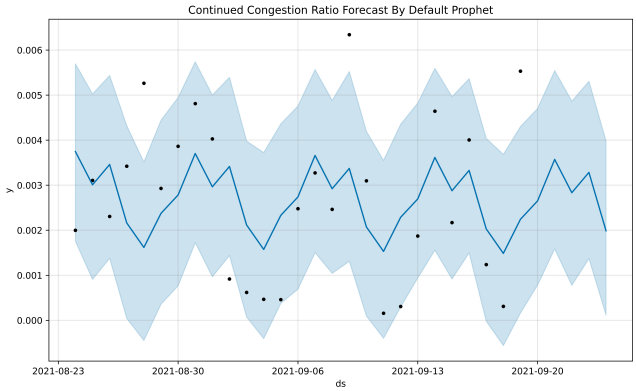
我们如何进一步改进协议设计，以便在需求激增发生前更好地协调交易费市场？下面我们将阐述三个未来的研究方向。

## 7.1 EIP 部署的因果推断研究

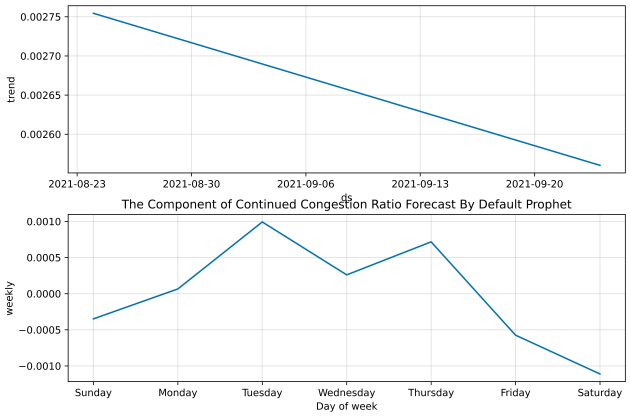
未来研究可以将我们的方法扩展到研究其他 EIP 升级。例如，[73] 相关文章通过可视化和简单统计展示了合并期间发生的各种其他变化，包括区块构建外包增加、区块纳入时间增加、执行奖励减少等，未来可以进一步扩展这些研究，以得出因果推断。未来研究还可以应用因果机器学习方法，例如表征学习 [11]，从各种较难解释的因素中识别因果因素。

## 7.2 全社区事件与交易费机制

全社区事件（例如热门 NFT 空投）可能导致市场拥堵。一方面，如 Das 等人所示，[27],NFT 空投期间的部分需求激增是由倒卖机器人造成的，可以通过采用抗女巫攻击




**(a) 默认 Prophet 的持续拥堵率预测**

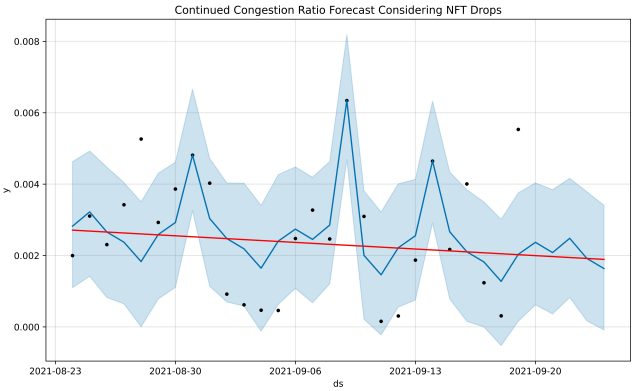



**(b) 默认 Prophet 的持续拥堵率预测组成部分**




**(c) 考虑 NFT 空投的持续拥堵率预测组成部分**

图 *(a)* 和 *(d)* 对比了默认 *Facebook Prophet* 预测的持续市场拥堵率，以及将三次 *NFT* 空投——*Fatales*（*2021*年*8*月*31*日）、*Pointilla*（*2021*年*9*月*9*日）和 *GalaxyEggs*（*2021*年*9*月*14*日）——视为假日效应后，*Prophet* 预测的持续市场拥堵率。图 *(b)* 将默认 *Facebook Prophet* 预测的持续拥堵率分解为趋势和每周效应。图 *(c)* 则将持续拥堵率分解为趋势、每周效应以及 *NFT* 空投的假日效应。如果 *NFT* 空投对市场拥堵没有影响，那么两种估算的预测值、置信区间、趋势和每周效应都应相同，且图 *(c)* 中的假日效应应为零常数。




**(d) 考虑 NFT 空投的持续拥堵率预测**

**图 10：持续拥堵率预测**

去中心化身份协议 [48]。 [21] 一方面，NFT 空投期间的需求激增类似于高峰时段的交通拥堵。探索拥堵定价 [4, 35, 50] 在交易费机制市场设计中的应用，因此是一个有趣的未来研究方向。

## 7.3 将链下数据纳入交易费机制

尽管 NFT 空投等事件通常会提前安排，但现有的交易费机制并未利用此类信息来进行调整。结合通过预言机 [13, 82, 83] 访问链下数据的能力与链上机制，设计能够主动响应链下事件的动态策略（例如交易费机制），是一个值得探索的未来研究方向。

[21] https://nft.candid.id/

## 致谢

我们感谢 Barnabé Monnot 在整个研究过程中给予的宝贵支持和富有洞见的评论。本研究是一个独立项目，由以太坊学术资助轮次提供支持。

# 参考文献


[1] 2022. Flashbots MEV-Boost。https://docs.flashbots.net/flashbots-mev- boost/introduction[2] 2023。合并。https://ethereum.org/en/upgrades/merge/ [3] Maher Alharby。2023。《无需许可的区块链中的交易延迟：分析、改进与安全考量》。Journal of Network and Systems Management 31, 1 (2023), 22. [4] Michael L Anderson。2014。《地铁、罢工与减速：公共交通对交通拥堵的影响》。《美国经济评论》104, 9 (2014), 2763–96. [5] Lennart Ante 和 Aman Saggu。2023。《以太坊区块链网络中交易费用与子系统经济活动之间的时变双向因果关系》。可见 SSRN 4400040 (2023). [6] Aaron Arnold。2022。《鼠标误点导致数十亿美元被盗：加密货币需要打击洗钱的新方法》。《原子科学家公报》78, 4 (2022), 191–197. [7] Mehdi Attar、Sami Repo 和 Pierre Mann。2022。《拥堵管理市场设计——北欧地区和中欧的方案》。《应用能源》313 (2022), 118905. [8] Julie Baker 和 Michaelle Cameron。1996。《服务环境对情感及消费者等待时间感知的影响：整合性综述与研究命题》。《营销科学学会期刊》24, 4 (1996), 338–349.[9] Abhijit Vinayak Banerjee。2020。《田野实验与经济学实践》。《美国经济评论》110, 7 (2020), 1937–51. [10] Matthew Baron、Jonathan Brogaard、Björn Hagströmer 和 Andrei Kirilenko。2019。《高频交易中的风险与收益》。《金融与定量分析期刊》54, 3 (2019), 993–1024. [11] Yoshua Bengio、Aaron Courville 和 Pascal Vincent。2013。《表征学习：综述与新视角》。《IEEE模式分析与机器智能汇刊》35, 8 (2013), 1798–1828. [12] Peter Blouw、Wesley Buckwalter 和 John Turri。2018。《盖梯尔案例：分类法》。载于《解释知识：关于盖梯尔问题的新论文》。牛津大学出版社，242–252.[13] Lorenz Breidenbach、Christian Cachin、Benedict Chan、Alex Coventry、Steve Ellis、Ari Juels、Farinaz Koushanfar、Andrew Miller、Brendan Magauran、Daniel Moroz 等。2021。《Chainlink 2.0：去中心化预言机网络演进的下一步》。Chainlink Labs (2021). [14] Eric Budish、Peter Cramton 和 John Shim。2014。《频繁批量拍卖的实施细节：将市场减速至眨眼之间》。《美国经济评论》104, 5 (2014), 418–424. [15] Eric Budish、Peter Cramton 和 John Shim。2015。《高频交易军备竞赛：作为市场设计应对方案的频繁批量拍卖》。《经济学季刊》130, 4 (2015), 1547–1621. [16] Vitalik Buterin。2013。《以太坊白皮书》。https://ethereum.org/en/whitepaper/ [17] Vitalik Buterin。2018。《区块链资源定价》。https://ethresear.ch/t/draft- position-paper-on-resource-pricing/2838[18] Vitalik Buterin、Eric Conner、Rick Dudley、Matthew Slipper、Ian Norden 和 Abdelhamid Bakhta。2019。《EIP-1559：ETH 1.0 链的费用市场变更》。https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1559[19] Vitalik Buterin、Diego Hernandez、Thor Kamphefner、Khiem Pham、Zhi Qiao、Danny Ryan、Juhyeok Sin、Ying Wang 和 Yan X Zhang。2020。《结合 GHOST 与 Casper》。arXiv 预印本 arXiv:2003.03052 (2020). [20] Michael J Casey 和 Paul Vigna。2018。《我们信任区块链》。《麻省理工科技评论》121, 3 (2018), 10–16.[21] Evangelia Christodoulou、Jie Ma、Gary S Collins、Ewout W Steyerberg、Jan Y Verbakel 和 Ben Van Calster。2019。《系统综述表明，机器学习在临床预测模型中的表现并不优于逻辑回归》。《临床流行病学期刊》110 (2019), 12–22. [22] Hao Chung 和 Elaine Shi。2022。《交易费机制设计基础》。https://ideas.repec.org/p/arx/papers/2111.03151.html [23] Lin William Cong、George Andrew Karolyi、Ke Tang 和 Weiyi Zhao。2021。《加密资产的价值溢价、网络采用与因子定价》。网络采用与加密资产因子定价（2021年12月）（2021）。[24] Lin William Cong、Ke Tang、Yanxin Wang 和 Xi Zhao。2022。《通过 Web3 和去中心化金融实现包容与民主化？来自以太坊生态系统的初步证据》。来自以太坊生态系统的初步证据（2022年7月29日）（2022）。[25] Scott Cunningham。2021。《因果推断：《混音带》》。耶鲁大学出版社。[26] Francesco D'Amato、Joachim Neu、Ertem Nusret Tas 和 David Tse。2022。《不再攻击权益证明以太坊？》arXiv 预印本 arXiv:2209.03255 (2022).[27] Dipanjan Das、Priyanka Bose、Nicola Ruaro、Christopher Kruegel 和 Giovanni Vigna。2021。《理解 NFT 生态系统中的安全问题》。arXiv 预印本 arXiv:2111.08893 (2021). [28] NetworkX 开发者。2014。《NetworkX文档》。https://networkx.org/ [29] David Easley、Maureen O'Hara 和 Soumya Basu。2019。《从挖矿到市场：比特币交易费用的演变》。《金融经济学期刊》134 ( 10 2019 91 109 10 1016 2019 03 004 ), – . [30] https://doi.org/ . /j.jfineco. . . Matheus Ferreira、Daniel Moroz、David Parkes 和 Mitchell Stern。2021。《区块链交易费用市场的动态明码标价机制》*。https://arxiv.org/pdf/2103.14144.pdf [31] fmrmf。2022。趋近目标。https://hackmd.io/@fmrmf/HyFXVQdVo [32] 以太坊基金会。2021。伦敦主网公告。https://blog.ethereum.org/2021/07/15/london-mainnet-announcement/ [33] Juan Garay、Aggelos Kiayias 和 Nikos Leonardos。2015。比特币骨干协议：分析与应用。载于《密码技术理论与应用国际年会》。Springer，281–310。[34] Dieter Gollmann。2010。计算机安全。《Wiley 跨学科评论：计算统计学》2，5（2010），544–554。[35] Jonathan D Hall。2018。雷克萨斯车道带来的帕累托改进：对拥堵高速公路部分车道实行收费的影响。《公共经济学杂志》158（2018），113–125。[36] Andrew C Harvey 和 Simon Peters。1990。结构时间序列模型的估计程序。《预测学杂志》9，2（1990），89–108。[37] Campbell R Harvey、Ashwin Ramachandran 和 Joey Santoro。2021。《去中心化金融与金融的未来》。John Wiley。[38] Guido W Imbens。2022。计量经济学中的因果关系：选择还是机遇。《计量经济学》90，6（2022），2541–2566。[39] Guido W Imbens 和 Thomas Lemieux。2008。回归不连续设计：实践指南。《计量经济学杂志》142，2（2008），615–635。[40] Ravi Jagannathan。2022。论股票的频繁批量拍卖。《金融计量经济学杂志》20，1（2022），1–17。[41] Elie Kapengut 和 Bruce Mizrach。2023。以太坊转向权益证明的事件研究。《大宗商品》2，2（2023），96–110。[42] Edwin R Keedy。1908。刑法中的无知与错误。《哈佛法律评论》22，2（1908），75–96。[43] Yue Liu、Qinghua Lu、Liming Zhu、Hye-Young Paik 和 Mark Staples。2022。关于区块链治理的系统性文献综述。《系统与软件杂志》（2022），111576。[44] Yulin Liu、Yuxuan Lu、Kartik Nayak、Fan Zhang、Luyao Zhang 和 Yinhong Zhao。2022。EIP-1559的实证分析：交易费用、等待时间与共识安全性。arXiv预印本 arXiv:2201.05574（2022）。[45] Yukun Liu 和 Aleh Tsyvinski。2021。加密货币的风险与回报。《金融研究评论》34，6（2021），2689–2727。[46] Yulin Liu 和 Luyao Zhang。2022。加密货币估值：一种可解释的人工智能方法。arXiv预印本 arXiv:2201.12893（2022）。[47] Ayelet Lotem、Sarah Azouvi、Patrick McCorry 和 Aviv Zohar。2022。用于拥堵检测的滑动窗口挑战流程。载于《金融密码学与数据安全：第26届国际会议，FC Grenada，2022年5月——修订精选论文》。Springer，–。[48] Deepak Maram、Harjasleen Malvai、Fan Zhang、Nerla Jean-Louis、Alexander Frolov、Tyler Kell、Tyrone Lobban、Christine Moy、Ari Juels 和 Andrew Miller。2021。Candid：兼容传统系统、抗女巫攻击且具问责性的可行去中心化身份方案。载于《2021年IEEE安全与隐私研讨会（SP）》。IEEE，1348–1366。[49] Jordi Massó。2015。稳定分配理论与市场设计实践。载于《2012年阿尔弗雷德·诺贝尔经济学纪念奖：授予Alvin E. Roth和Lloyd S. Shapley》。《科学贡献》11，1（2015），103–112。[50] Christopher Mayer 和 Todd Sinai。2003。网络效应、拥堵外部性与航空延误：或者，为什么并非所有延误都是坏事。《美国经济评论》93，4（2003），1194–1215。[51] Bhabendu Kumar Mohanta、Soumyashree S Panda 和 Debasish Jena。2018。智能合约及其在区块链技术中的应用概述。载于《2018年第9届计算、通信与网络技术国际会议（ICCCNT）》。IEEE，1–4。[52] Hossein Nabilou。2020。作为去中心化金融市场基础设施的比特币治理。《斯坦福区块链法律与政策杂志》4（2020），26–51。[53] Matthieu Nadini、Laura Alessandretti、Flavio Di Giacinto、Mauro Martino、Luca Maria Aiello 和 Andrea Baronchelli。2021。描绘NFT革命：市场趋势、交易网络与视觉特征。《科学报告》11，1（2021），1–11。[54] Satoshi Nakamoto。2008。比特币白皮书。网址：https://bitcoin.org/bitcoin. pdf-(: 17.07. 2019)（2008）。[55] Ulysse Pavloff、Yackolley Amoussou-Guenou 和 Sara Tucci-Piergiovanni。2022。对以太坊权益证明的审视。arXiv预印本 arXiv:2210.16070（2022）。[56] Judea Pearl。2002。因果推理。《AI杂志》23，1（2002），95–95。[57] 以太坊改进提案。2021。以太坊改进提案。https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1559[58] Daniël Reijsbergen、Shyam Sridhar、Barnabé Monnot、Stefanos Leonardos、Stratis Skoulakis 和 Georgios Piliouras。2021。蜜月期的交易费用：EIP-1559 实施一个月后。载于《2021年IEEE国际区块链会议（Blockchain）》。IEEE，196–204。[59] Alexander Reutlinger、Gerhard Schurz 和 Andreas Hüttemann。2011。其他条件不变定律。《斯坦福哲学百科全书》（2011）。

[60] Alvin E Roth。2008。我们从市场设计中学到了什么？《经济学杂志》118，527（2008），285–310。[61] Tim Roughgarden。2020。以太坊区块链的交易费机制设计：EIP-1559的经济分析。http: // timroughgarden.org/papers/eip1559.pdf [62] Tim Roughgarden。2020。以太坊区块链的交易费机制设计：EIP-1559的经济分析。arXiv预印本 arXiv:2012.00854（2020）。[63] Tim Roughgarden。2021。交易费机制设计。载于第22届ACM经济学与计算会议论文集（匈牙利布达佩斯）（EC '21）。计算机协会，纽约，美国，792。https://doi.org/ 10 1145 3465456 3467591 . / . Ariel Rubinstein。 . 响应时间与决策：一项实验研究。《判断与决策》8，5（2013），540–551。[65] Elaine Shi、Hao Chung 和 Ke Wu。2022。密码学能为去中心化机制设计做些什么？arXiv预印本 arXiv:2209.14462（2022）。[66] Robert J Shiller。2014 104，6 2014 1486 1517 . 投机性资产价格。《美国经济评论》（），–。[67] Alex Stokes。2022。合并后的区块构建。https: // archive.devcon.org/archive/watch/6/block-building-after-the-merge/ [68] Gareth Stoyle、Michael Hicks、Gavin Bierman、Peter Sewell 和 Iulian Neamtiu。2005。作必要调整后：安全且可预测的动态软件更新。《ACM SIGPLAN 通讯》40，1（2005），183–194。[69] Weizhao Tang、Lucianna Kiffer、Giulia Fanti 和 Ari Juels。2022。区块链点对点网络中的策略性延迟降低。arXiv:2205.*06837 [cs]* ( 05 2022 2205 06837 )。https://arxiv.org/abs/ 。[70] Sean J Taylor 和 Benjamin Letham。2018。. 大规模预测。《美国统计学家》72，1（2018），37–45。[71] Donald L Thistlethwaite 和 Donald T Campbell。1960。回归不连续分析：一种替代事后实验的方法。《教育心理学杂志》51，6（1960），309。[72] Kishore Vasan、Milán Janosov 和 Albert-László Barabási。2022。量化加密艺术中的NFT驱动网络。《科学报告》12，1（2022），1–11。[73] Rodrigo Vasquez。2022。合并数据挑战赛结果。https: //blog.ethereum.org/2022/12/05/merge-data-challenge-results

[74] Vitalik vbuterin. 2023. 我认为 EIP 1559 区块方差无需担忧的原因——HackMD。https://notes.ethereum.org/@vbuterin/eip_1559_spikes [75] Dejan Vujičić、Dijana Jagodić 和 Siniša Ranđić。2018。区块链技术、比特币和以太坊：简要概述。载于《2018年第17届国际信息技术与电子技术研讨会（INFOTEH-JAHORINA）》论文集。IEEE，1–6。[76] Qin Wang、Rujia Li、Qi Wang 和 Shiping Chen。2021。非同质化代币（NFT）：概述、评估、机遇与挑战。arXiv 预印本 arXiv:2105.07447（2021）。[77] Gavin Wood 等。2014。以太坊：安全、去中心化的通用交易账本。《以太坊项目黄皮书》151，2014（2014），1–32。[78] Aviv Yaish、Saar Tochner 和 Aviv Zohar。2022。区块链拉伸与压缩：为自身利益操纵时间。载于《第23届ACM经济学与计算会议论文集》（美国科罗拉多州博尔德）（EC '22）。计算机协会，纽约，纽约州，美国，65–88。https://doi.org/ 10 1145 3490486 3538250 。 / 。Sen Yang、Lei Yuan、Ying-Cheng Lai、Xiaotong Shen、Peter Wonka 和 Jieping Ye。2012。无向图上的特征分组与选择。载于《第18届ACM SIGKDD知识发现与数据挖掘国际会议论文集》。922–930。[80] Sen Yang、Fan Zhang、Ken Huang、Xi Chen、Youwei Yang 和 Feng Zhu。2022。SoK：最大可提取价值的应对措施：理论与实践。arXiv 预印本 arXiv:2212.05111（2022）。[81] Wako Yoshida、Ray J Dolan 和 Karl J Friston。2008。心智博弈论。《PLoS Computational Biology》4，12（2008），e1000254。[82] Fan Zhang、Ethan Cecchetti、Kyle Croman、Ari Juels 和 Elaine Shi。2016。Town Crier：面向智能合约的经认证数据馈送。载于 CCS。ACM，270–282。[83] Fan Zhang、Deepak Maram、Harjasleen Malvai、Steven Goldfeder 和 Ari Juels。2020。DECO：利用去中心化的 TLS 预言机释放 Web 数据。载于 CCS。ACM，1919–1938。[84] Luyao Zhang、Xinshi Ma 和 Yulin Liu。2022。SoK：区块链去中心化。arXiv 预印本 arXiv:2205.04256（2022）。[85] Zishuo Zhao、Xi Chen 和 Yuan Zhou。2022。用于区块链交易费用分配的贝叶斯-纳什激励相容机制。arXiv 预印本 arXiv:2209.13099（2022）。

# 术语表

| 术语 | 定义 | 来源 | 领域 |
|---|---|---|---|
| **术语 1：延迟** | | | |
| 直接延迟 | 消息从一个或多个观测点到达监听节点所需的延迟——换句话说，源延迟。 | Tang 等人 [69] | 分布式系统 |
| 交易延迟 | 从交易创建到交易被纳入已确认区块所需的时长 | Alharby [3] | 分布式系统 |
| 决策延迟 | 指某个节点能够插入一对相互通信的节点之间时所对应的延迟。起点是高频交易（HFT）公司的休眠限价单被一笔新到达的市价单执行。撮合引擎处理交易并为其加上时间戳。随后，一条确认消息被发送给该高频交易公司。公司处理确认信息并作出如何应对的决定，可能采取激进订单的形式。延迟测量的结束时间以处理市价单消息时由撮合引擎分配的时间戳为标记由撮合引擎完成。 | Baron 等人 [10] | 高频交易，金融 |
| **术语 2：等待时间** | | | |
| 等待时间 | 从请求服务到提供服务之间的时长 | 贝克和卡梅伦 [8] | 营销 |
| 响应时间 | 响应时间是从问题发送给受试者的时刻起到结束的时长。服务器收到此响应 | 鲁宾斯坦 [64] | 决策理论 |
| 区块间隔/时间 | 连续区块之间的时间 | Yaish 等人 [78] | 分布式系统 |
| **术语 3：市场拥堵** | | | |
| 拥塞状态 | 分布式网络中的过载和电压越限 | Attar 等人 [7] | 分布式系统 |
| 市场拥堵 | 市场出清所需的时间，即从市场参与者进入到交易所结算完成之间的时间。 | Roth [60] | 市场设计 |
| 交通拥堵 | 高峰时段期望出行时间与实际出行时间之间的差异 | Hall [35] | 市场设计 |

**表6：术语表**

## B 数据字典

| 列名 | 来源 | Type | 注释 |
|---|---|---|---|
| **数据源 1：以太坊区块链数据（区块链）** | | | |
| 数字 | 以太坊 | 整数 | 区块链上的区块编号 |
| Gas_限制 | 以太坊 | 整数 | 此区块允许的最大 Gas |
| Gas_used | 以太坊 | 整数 | 此区块中所有交易使用的 Gas 总量 |
| 交易数量_ | 以太坊 | 整数 | 此区块中包含的所有交易数量 |
| 时间戳 | 以太坊 | 整数 | Unix 时间戳 |
| 基础费用_Gas_每单位_ | 以太坊 | 整数 | 协议每单位燃料基础费用 |
| **数据源 1：以太坊区块链数据（交易）** | | | |
| 区块编号_ | 以太坊 | 整数 | 区块链上的区块编号 |
| hash | 以太坊 | 可变长字符串（80） | 区块链上的交易哈希（键） |
| 起始地址_ | 以太坊 | 可变长字符串（42） | 交易发送方的公开地址（键） |
| 结束 地址_ | 以太坊 | varchar(42) | 交易接收方的公开地址（键） |
| **数据源 2：MemopoolGuru** | | | |
| 已包含_在_区块_编号 | MemopoolGuru | 整数 | 包含该交易的区块链上的区块编号 |
| 延迟 | MemopoolGuru | 双精度 | 交易等待时间（延迟），单位为秒 |
| hash | MemopoolGuru | 可变长字符串（80） | 区块链上的交易哈希（键） |
| **数据源 3：OFAC 制裁计划** | | | |
| 地址 | OFAC | varchar(42) | 受制裁地址的公开地址（键） |

**表 7：数据字典**

## C 统计数据

**表 8：合并前后每个区块每秒消耗的 Gas 统计数据**

| 每秒消耗的 Gas | 中位数 | 25% 分位数 | 75% 分位数 | mean | std |
|---|---|---|---|---|---|
| 合并前 | 1.111929e+06 | 761741.537500 | 1.851871e+06 | 1.815617e+06 | 2.523168e+06 |
| 合并后 | 1.204980e+06 | 730119.229167 | 1.805011e+06 | 1.270889e+06 | 7.034426e+05 |

**表 9：统计数据　　合并前后每个区块每秒消耗的 Gas 的移动平均值（5 个区块）**

| 每秒消耗的 Gas 的 5 区块移动平均 | 中位数 | 25% 分位数 | 75% 分位数 | mean | std |
|---|---|---|---|---|---|
| 合并前 | 1.493161e+06 | 1.152283e+06 | 2.081531e+06 | 1.815480e+06 | 1.083907e+06 |
| 合并后 | 1.243960e+06 | 1.108872e+06 | 1.396571e+06 | 1.271037e+06 | 2.493085e+05 |

**表 10：合并前后每个区块每秒消耗的 Gas 移动平均值（7200 个区块）的统计数据**

| 每秒消耗的 Gas MA7200 | 中位数 | 25% 分位数 | 75% 分位数 | mean | std |
|---|---|---|---|---|---|
| 合并前 | 1.493161e+06 | 1.152283e+06 | 2.081531e+06 | 1.815480e+06 | 1.083907e+06 |
| 合并后 | 1.243960e+06 | 1.108872e+06 | 1.396571e+06 | 1.271037e+06 | 2.493085e+05 |

# D 回归表

**表 11：合并前后市场拥堵（>95% 燃气使用量）的逻辑回归**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -0.934*** (0.016) | -0.778*** (0.030) | -0.749*** (0.031) |
| blockn | | -0.000*** (0.000) | -0.000*** (0.000) |
| 合并区块数量 | | | -0.000*** (0.000) |
| 截距 | -1.226*** (0.009) | -1.304*** (0.016) | -1.268*** (0.019) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | | | |
| 已调整 $R^2$ | | | |
| 残差标准误 | 1.000(df = 134829) | 1.000(df = 134828) | 1.000(df = 134827) |
| F 统计量 | (df = 1.0；134829.0) | (df = 2.0；134828.0) | (df = 3.0；134827.0) |

注： *p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

**表12：Lo git 对市场持续拥堵的回归分析（燃气使用量为 >95%），合并前后 e**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -0.633*** (0.083) | -0.556*** (0.160) | -0.529*** (0.164) |
| blockn | | -0.000 (0.000) | -0.000 (0.000) |
| 合并区块数量 | | | -0.000 (0.000) |
| 截距 | -5.078*** (0.049) | -5.117*** (0.085) | -5.083*** (0.098) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | | | |
| 调整后 $R^2$ | | | |
| 残差标准误 | 1.000(df = 134829) | 1.000(df = 134828) | 1.000(df = 134827) |
| F 统计量 | (自由度 = 1.0；134829.0) | (自由度 = 2.0；134828.0) | (自由度 = 3.0；134827.0) |

注： *p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

**表 13：合并前后等待时间（延迟）的 75% 分位数**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -13.844*** | -11.975*** | -13.421*** |
| | (0.048) | (0.098) | (0.098) |
| blockn | | -0.000*** | 0.000*** |
| | | (0.000) | (0.000) |
| 合并区块数量 | | | -0.000*** |
| | | | (0.000) |
| 截距 | 34.365*** | 33.423*** | 35.039*** |
| | (0.034) | (0.055) | (0.069) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | nan | nan | nan |
| 调整后 $R^2$ | nan | nan | nan |
| 残差标准误 | 1.000（df = 134829） | 1.000（df = 134828） | 1.000（自由度 = 134827） |
| F 统计量 | nan*** (df = 1.0；134829.0) | nan*** (df = 2.0; 134828.0) | nan*** (df = 3.0; 134827.0) |

注：

*p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

**表 14：合并前后等待时间（延迟）的四分位距**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -32.269*** | -26.011*** | -26.057*** |
| | (1.140) | (2.276) | (2.276) |
| blockn | | -0.000*** | 0.000 |
| | | (0.000) | (0.000) |
| 合并区块数量 | | | -0.000*** |
| | | | (0.000) |
| 截距 | 52.611*** | 49.487*** | 54.509*** |
| | (0.807) | (1.272) | (1.612) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| 调整后 $R^2$ | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| 残差标准误 | 209.219（自由度 = 134829） | 209.212（自由度 = 134828） | 209.193（自由度 = 134827） |
| F 统计量 | 801.865*** (df = 1.0；134829.0) | 406.004*** (df = 2.0；134828.0) | 279.302*** (df = 3.0；134827.0) |

注：

*p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

## E 受制裁交易

**表15：合并之前和之后的等待时间（延迟）中位数**

| | 因变量: | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 已合并 | -9.659*** | -0.225 | -0.239 |
| | (0.661) | (1.319) | (1.319) |
| blockn | | -0.000*** | -0.000*** |
| | | (0.000) | (0.000) |
| 合并区块数量 | | | -0.000*** |
| | | | (0.000) |
| 截距 | 28.142*** | 23.434*** | 25.016*** |
| | (0.468) | (0.737) | (0.934) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 调整后的 $R^2$ | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 残差标准误 | 121.289（自由度 = 134829） | 121.258（自由度 = 134828） | 121.255（自由度 = 134827） |
| F 统计量 | 213.775*** (df = 1.0; 134829.0) | 141.072*** (df = 2.0; 134828.0) | 96.588*** (df = 3.0；134827.0) |
| 注: | | | *p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01 |

**表 16：合并前后每个区块的每秒消耗的 Gas**

| | 因变量: | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -544728.569*** | -507576.370*** | -507395.185*** |
| | (10074.034) | (20120.755) | (20120.609) |
| blockn | | -0.531** | -1.097*** |
| | | (0.249) | (0.353) |
| 合并区块数量 | | | 1.124** |
| | | | (0.498) |
| 截距 | 1815617.089*** | 1797075.882*** | 1777314.312*** |
| | (7135.295) | (11245.745) | (14247.892) |
| 观测值 | 134,830 | 134,830 | 134,830 |
| $R^2$ | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| 调整后 $R^2$ | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| 残差标准误 | 1849542.236(df = 134828) | 1849517.888(df = 134827) | 1849489.752(df = 134826) |
| F 统计量 | 2923.839*** (df = 1.0；134828.0) | 1464.233*** (df = 2.0; 134827.0) | 977.886*** (df = 3.0；134826.0) |
| 注: | | | *p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01 |

**表 17：合并前后每秒消耗的 Gas 的移动平均值（5 个区块）**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -544442.231*** | -506485.276*** | -506303.778*** |
| | (4277.151) | (8542.016) | (8541.222) |
| blockn | | -0.542*** | -1.107*** |
| | | (0.106) | (0.150) |
| 合并区块数量 | | | 1.123*** |
| | | | (0.211) |
| 截距 | 1815479.678*** | 1796536.988*** | 1776803.682*** |
| | (3029.457) | (4774.227) | (6048.269) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | 0.107 | 0.107 | 0.108 |
| 调整后 $R^2$ | 0.107 | 0.107 | 0.108 |
| 残差标准误 | 785266.518（自由度 = 134829） | 785192.705（自由度 = 134828） | 785113.422（df = 134827） |
| F 统计量 | 16202.960*** (df = 1.0; 134829.0) | 8116.178*** (df = 2.0；134828.0) | 5421.289*** (df = 3.0; 134827.0) |

注：

*p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

**表18：合并前后每秒消耗的 Gas 的移动平均值（7200 个区块）** **ge**

| | 因变量： | | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) |
| 合并 | -518322.895*** | -390039.900*** | -390194.973*** |
| | (412.804) | (718.969) | (711.180) |
| blockn | | -1.833*** | -1.350*** |
| | | （ | (0.012) |
| | | 0.009） | |
| 合并区块数量 | | | -0.959*** |
| | | | (0.018) |
| 截距 | 1818286.002*** | 1754265.457*** | 1771125.786*** |
| | (292.384) | (401.840) | (503.605) |
| 观测值 | 134,831 | 134,831 | 134,831 |
| $R^2$ | 0.921 | 0.940 | 0.941 |
| 已调整 $R^2$ | 0.921 | 0.940 | 0.941 |
| 残差标准误 | 75788.939（自由度 = 134829） | 66088.500(df = 134828) | 65371.995(df = 134827) |
| F 统计量 | 1576572.834*** (df = 1.0；134829.0) | 1057921.096*** (df = 2.0；134828.0) | 721816.731*** (df = 3.0；134827.0) |

注：

*p<0.1； **p<0.05； ***p<0.01

**表 19：具有未观测延迟的受制裁交易（仅在合并后发现）：总数 =9**

| 地址 | hash |
|---|---|
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x0fb9a4e23d7c504571daed1394feea8bcb823a18a2887e7cab54f7f... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0xb37f8b00993271dd97ac9acdb4d84cb31cd210a037286bcc4bc7887... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0xd5c80d358016a1fe77260fa9cab88a706337c6f41f9112eca8840e9... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x52cd1910b0710e73a9fb85f9e13861ef828a3244a1fa03944e47adf... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0xe4a84c77748a627a093f79c6abb4b037c60ae9f58977bab2c46d17a... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x094cd7a9dc72cf6b3415fd18223a075e631d4ee5bfc900b9293dbd1... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x78c426d5b25290aa03153c728383f2d422c7a14a40a0a5e11bea67c... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x9d4fcf6315d8fbf2e07dc71a2c81df8c86a2dd518ac76c48eaeb397... |
| 0xd90e2f925da726b50c4ed8d0fb90ad053324f31b | 0x0b9613f988da92901816bc76af743974032985b5eeeab70d5940c65... |

**表 20：合并前后获准和未获准交易的延迟统计**

| 受制裁 | 合并 | 数量 | mean | std | min | 25% | 50% | 75% | max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| no | 之前 | 9712821.0 | 974.101368 | 37825.688389 | 0.000020 | 7.793996 | 15.191844 | 29.682377 | 5.441627e+06 |
| | 之后 | 9120233.0 | 4868.072870 | 152957.817814 | 0.000064 | 9.147091 | 13.792645 | 18.629303 | 6.292439e+06 |
| yes | 之前 | 1007.0 | 6161.196202 | 131471.221952 | 0.115805 | 10.072948 | 19.687913 | 37.180833 | 2.950860e+06 |
| | 之后 | 466.0 | 47.262011 | 257.400994 | 1.036414 | 11.876102 | 17.153332 | 22.571568 | 3.107158e+03 |