

开源生态系统的创新结构与收益分配机制研究

——以区块链开源创新为例

摘要

开源创新的持续繁荣挑战了传统经济学关于“公共品悖论”的理论。现有研究多从外生激励视角解释开源协作项目的可持续性，如声誉积累、职业信号或互补资产收益等，但尚未揭示在缺乏产权保护与中心化协调的条件下，开源创新生态系统如何形成内生化的回报机制。区块链技术的出现为这一问题提供了新的分析契机。其引入的代币经济使创新活动的收益实现了可计量与可追踪，为研究开源创新体系内部的收益分配结构提供了可观测基础。本研究以以太坊（Ethereum）与索拉纳（Solana）两大代表性区块链生态为研究对象，结合 GitHub 开发数据与链上经济数据，试图回答以下核心问题：在开放协作的区块链创新体系中，创新活动的经济回报如何产生并实现分配？换言之，本研究旨在揭示区块链生态中创新结构与收益分配之间的内在耦合机制，从而探索开源创新体系实现可持续性的内生逻辑。

关键词： 开源创新； 以太坊； 创新结构； 收益分配机制

Abstract

The sustained prosperity of open-source innovation challenges the traditional economic theory of the “public goods paradox”. Existing studies have primarily explained the sustainability of open-source collaboration from the perspective of external incentives—such as reputation building, career signaling, or complementary asset returns—yet they have not revealed how open-source innovation ecosystems generate endogenous mechanisms of reward in the absence of property rights and centralized coordination. Blockchain technology provides a new analytical opportunity for this question. By introducing token economies, blockchain enables the quantification and traceability of innovation rewards, offering an observable basis for studying the internal distribution structure of open-source innovation. This study takes Ethereum and Solana as representative blockchain ecosystems and integrates GitHub development data with on-chain economic data to address a central question: How are the economic returns of innovation activities generated and distributed within an open and collaborative blockchain system? In essence, this research aims to uncover the intrinsic coupling mechanism between innovation structure and income distribution within blockchain ecosystems, thereby exploring the endogenous logic of sustainability in open-source innovation systems.

Keywords: open-source; Ethereum; innovation structure; income distribution mechanism

目录

摘要	2
Abstract	3
第一章 引言	5
1.1 研究背景	5
1.1.1 开源创新的历史演进与内生激励问题	5
1.1.2 以太坊生态的组织结构与创新过程	6
1.2 研究问题	8
1.3 研究意义	8
1.4 文章结构	9
二、文献综述	9
2.1 创新激励的传统逻辑与开源困境	9
2.2 开源创新的回报机制	10
2.3 开源生态系统的结构分化与回报差异	11
2.4 文献述评与研究空白	12
三、研究设计	12
3.1 数据	12
3.2 研究方法	13
3.2.1 案例选择逻辑	13
3.2.2 案例分析逻辑与步骤	13
3.2.3 变量设计与指标说明（初步）	13
四、研究进展	15
4.1 基础层和应用层创新的贡献者网络形态	15
4.2 以太坊生态系统的迭代机制	17
4.3 以太坊生态系统的产业结构演化	19
参考文献	21

第一章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 开源创新的历史演进与内生激励问题

开源软件运动（open source software）自 20 世纪 60 年代萌芽以来，经历了从学术机构自由共享代码，到确立“自由软件”制度，再到 20 世纪 90 年代伴随着互联网普及所形成的大规模开源软件协作体系的演进过程（Lerner & Tirole, 2002）。Linux、Apache 等开源项目的成功实践表明，即便缺乏产权保护与中心化管理，开放协作同样能够进行快速的知识积累并催生出高质量的技术成果（Raymond, 1999）。近年来，开源（open source）正从一种软件开发模式，逐渐扩展至硬件设计、数据科学、人工智能等更广泛的知识生产场景中（Red Hat, 2025; McKinsey & Company et al., 2025; Miljković et al., 2021），演化为一种新的知识创造与技术创新模式。

然而，开源创新的持续繁荣现象对传统经济学的“公共品悖论”理论构成了挑战。按照经典创新理论的逻辑，创新活动依赖于排他性收益以弥补前期投入，若创新成果无法通过产权保护获得专有回报，创新者的激励将被削弱，从而导致“创新不足”的市场失灵（Nelson 1959; Arrow, 1962）。然而，与此预期相反，开源创新在缺乏明确产权界定与外部财政支持的条件下，依然展现出持续的创新与技术进步能力。为了理解这一现象，不同领域学者提出了不同解释路径：劳动经济学与组织行为学的研究聚焦于开发者的非货币激励机制。开源贡献者在缺乏直接经济回报的情况下，仍积极参与项目开发的动机源于声誉积累、职业信号与人力资本投资（Arrow, 1962; Lerner & Tirole, 2002; Hann, Roberts, & Slaughter, 2004; Roberts, Hann, & Slaughter, 2006）以及低进入门槛与高社群互助性所产生的参与者学习收益与归属感（Lakhani & von Hippel, 2003; Haruvy, Wu, & Frels, 2003）。产业组织学与战略管理研究则从企业视角，强调其往往通过开放源代码来利用互补资产与差异化商业模式（如咨询、硬件、云服务等）实现间接盈利（Bessen, 2002; Lerner & Tirole, 2005; Schmidt & Schnitzer, 2003），这也有助于企业影响技术标准与生态格局（Shapiro & Varian, 2004; Casadesus-Masanell & Ghemawat, 2006），并成为企业的竞争性策略，用以削弱专有软件的垄断优势并扩大用户基础（Kuan, 2001; Gaudeul, 2004; Saint-Paul, 2003）。

尽管现有研究对开源创新的激励机制提出了多种解释，但这些解释大多依赖外生因素。大量实证研究表明，大多数开源项目生命周期短暂、治理结构脆弱，

仅有少数能够演化为稳定且自我强化的生态系统（Avelino et al., 2019; Liao et al., 2017; Alami et al., 2024）。因此，外生激励视角虽有助于理解开源创新在特定情境下的运作逻辑，却难以揭示开源生态系统得以长期维持的内在动力机制。越来越多的研究表明，开源项目的可持续性不仅取决于外部激励，还受到其内部组织结构和协作模式的深刻影响，同时，这种结构分化也使得不同位置的创新参与者在创新回报方面存在显著差异（Liao et al., 2017; Avelino et al., 2019）。然而，现有理论尚未充分阐明这种结构差异与创新激励之间的内在联系。换言之，在缺乏产权保护和外部资助的条件下，开源创新的持续繁荣究竟依赖何种内生的收益分配结构，仍有待深入探讨。

区块链技术的出现为这一问题提供了新的观察窗口。最初，区块链被设计为一种分布式账本系统，由全球各地的节点共同维护交易记录，并通过共识机制（如工作量证明 PoW 或权益证明 PoS）来验证信息的真实性，从而确保数据的公开、透明与不可篡改。随着技术演进，区块链的作用早已超越“记账”的功能，逐渐发展为一种新型的数字经济基础设施，不仅可以支撑加密货币的发行与交易，还为各类去中心化应用（DApps¹）提供运行环境，构成整个生态系统的底层基础设施。以以太坊为代表的区块链生态系统，延续了开源协作的组织逻辑——代码公开、社区共治、贡献透明——但更进一步地，将经济回报直接嵌入技术协议之中。通过代币经济（token economy），参与者在网络运行与创新活动中的贡献可获得即时、可计量的经济回报，使创新产出与价值分配在同一系统内得以显性化与可追踪化²。正因如此，区块链为研究开源生态系统中“创新结构—收益分配”之间的关系提供了理想的案例。具体而言，通过分析区块链生态内部的代币激励、交易费用与创新结构之间的互动，可以系统地理解开源创新体系如何在缺乏传统产权与外部资助的条件下，实现创新的内生激励与生态系统的持续演化。

1.1.2 以太坊生态的组织结构与创新过程

作为最典型的区块链生态，以太坊（Ethereum）延续了开源协作的传统模式，并形成了一套结构化的创新体系。与传统科研体系依托论文与专利不同，以太坊生态中的创新成果以标准提案（Ethereum Improvement Proposals, EIPs）与开源代码的形式体现，构成其知识生产的核心载体。整个创新过程通常包括三个主要阶

1 DApps 通过区块链上的智能合约实现自动执行与开放协作，使用户和开发者能够在没有中心机构的情况下进行金融交易、数据交换、治理决策等活动。

2 代币不仅作为生态系统内的计价与结算媒介，用于支付交易费用，还承担激励机制的核心角色——通过奖励验证者、开发者与应用贡献者，奖励他们维系网络安全、参与生态建设。

段：提案—协议改进—应用开发。在第一阶段，开发者或应用团队通过提案提出各类创新设想；在第二阶段，开发者在客户端³中对第一阶段中的提案进行开发，通过多轮讨论、评审与硬分叉升级完成技术落地；而在第三阶段，开发者在区块链协议之上进行智能合约（smart contracts）的部署与开发。智能合约也是一组代码，它通过可编程的方式自动执行交易规则与治理，构成去中心化金融（DeFi）、非同质化代币（NFT）、去中心化自治组织（DAO）以及各类 Layer 2 与以太坊主网交互等一系列上层应用创新的单位。

在第一阶段的 EIP 提出过程中，根据提案内容及其对应的创新层次不同，EIP 可分为四个层级：Core 层、Network 层、ERC 层与 Interface 层：

（1）Core 层（核心层）：涉及以太坊底层协议、共识机制和链上数据结构的设计与改进，是维系整个系统运行的技术基础。其主要内容包括共识算法、虚拟机（EVM）执行逻辑、区块结构与数据状态管理等。Core 层 EIP 的目标在于提升区块链的安全性、可扩展性与运行效率，属于典型的基础层创新。

（2）Network 层（网络层）：构成区块链的通信基础，包括节点间的 P2P 网络协议、数据传播与同步机制等。Network EIP 确保交易与区块信息能够在全网高效传播，是支持共识执行与链上数据共享的关键技术层。

（3）ERC 层（标准接口层）：主要定义智能合约的接口标准，是应用层创新的制度基础。ERC 提案通常规范智能合约的执行接口，为应用层协议或功能提供标准化的编程框架；部分提案还旨在解决不同 Layer-2 网络之间的跨链通信与流动性分散问题，从而支持多样化的去中心化应用（如 DeFi、NFT、DAO）以及跨 Layer-2 的资产互通与流动性共享。

（4）Interface 层（交互层）：位于最上层，涉及用户与区块链网络的交互方式，如钱包、区块浏览器、开发框架等。这一层通过改进人机交互界面与开发工具，降低了开发与使用门槛，使区块链技术能够被更广泛采用与应用。

其中，Core 层与 Network 层 EIP 代表了以太坊生态中的基础协议层创新，主要对应于以太坊客户端（client）的维护与开发，旨在提高整个区块链系统的性能、安全性与稳定性，构成以太坊生态的底层基础设施。而 ERC 层与 Interface 层 EIP 则体现了生态系统的应用层创新，重点关注智能合约的开发、部署与标准化，以及上层应用生态的扩展，从而推动以太坊功能与场景的持续扩张。

³ 客户端（client）是指运行以太坊协议的软件程序，用于验证区块、执行交易和维护网络状态

1.2 研究问题

本文以以太坊（Ethereum）与索拉纳（Solana）两个代表性区块链生态为研究对象，试图回答以下核心问题：在开放协作的区块链创新系统下，创新活动的经济回报如何产生和分配？换言之，本文旨在揭示区块链生态系统中创新结构与收入分配之间的内在勾连机制，以此探索开源创新可持续性的内生逻辑。

为回答这一总体问题，研究将围绕两个层面展开：

（1）区块链生态的创新结构与创新测度

这一部分旨在刻画区块链生态系统创新活动的组织模式与知识生产形态。具体而言，本文将以以太坊的 EIP 体系及其核心开发活动为基础，构建创新网络的结构化描述。通过识别基础层创新（Core 协议与客户端改进）与应用层创新（ERC 标准、智能合约与 DApp 开发）之间的互动关系，并考察二者与生态系统市场表现（如代币价格、交易费用等）之间的关联，来系统分析不同层次创新在生态系统中的地位、演化趋势及其经济效应。研究还将进一步通过网络分析方法（如贡献者网络、提案引用网络与模块化结构）量化创新的集中度与扩散性，以揭示生态创新的结构特征。

（2）区块链生态的收益分配机制

在明确创新结构之后，本文将分析不同类型创新在经济回报上的分布模式与演化特征。以代币激励、交易费用及项目收入为主要经济变量，研究将探讨生态系统内部两类核心参与者（基础层协议开发者、应用层开发者）之间的收入分配机制，包括：不同层级的创新活动（基础层 vs. 应用层）是否存在回报差异？创新结构与收入分配之间的耦合关系？随着生态复杂度的提升（如 Layer-2 扩张、跨链通信），创新结构随之发生改变，这种创新结构—收益分配关系如何发生变化？最后，本文将用 Solana 生态系统对以太坊分析所得的结论进行验证。

通过对以太坊和索拉纳的案例研究，本文希望揭示区块链生态系统中创新与收益分配的联动机制，从而为理解开源创新体系的激励结构提供新的理论与实证基础。

1.3 研究意义

现有开源创新文献大多从外生激励出发解释创新行为的可持续性，如声誉、职业信号、互补资产与资助等。然而，这些解释未能充分揭示开源生态系统在缺乏产权保护与中心化协调的条件下，如何形成内生化的收益分配机制。本文使用区块链这一案例研究，将“开源创新”与“经济回报”相结合，揭示了技术协议

中嵌入的经济回报是如何分配的，进而成为生态系统创新自我维系的内在动力。因此，本研究将从理论上拓展开源创新激励结构的研究，为理解公共品型创新体系的可持续性提供新的分析框架。

1.4 文章结构

第一章为引言，介绍研究背景、研究问题、研究意义及文章的整体结构，阐明研究的现实动机与学术价值。

第二章为文献综述，系统梳理，明确现有文献的主要观点与不足，为后续研究奠定理论基础。

第三章为研究设计，介绍本文所采用的数据与方法。

第四章针对研究问题一，刻画区块链生态系统的创新结构与演化特征，分析基础层创新（Core 协议与客户端改进）与应用层创新（ERC 标准、智能合约与 DApp 开发）的互动关系及其与市场表现的关联。

第五章针对研究问题二，探讨区块链生态系统的收益分配机制，重点分析创新结构与收入分配之间的耦合关系及其随生态复杂度变化的动态特征，并以 Solana 生态系统为对照进行验证与比较。

第六章为结论与展望，总结研究的主要发现与结论，讨论研究的局限性，并提出未来可进一步探索的研究方向。

二、文献综述

2.1 创新激励的传统逻辑与开源困境

在主流经济学与创新理论中，创新活动的激励长期建立在“产权与排他性收益”的逻辑之上。早期的创新经济学认为，知识作为一种具有非竞争性与非排他性的公共品，其自由传播虽然有助于社会福利最大化，却会削弱创新者的私人回报，导致创新投资不足（Nelson, 1959; Arrow, 1962）。在这种框架下，知识产权制度被视为纠正创新外部性、确保创新激励的必要机制，通过授予创新者一定期限的垄断权利来实现创新收益的“私有化”。随后，熊彼特（Schumpeter, 1934, 1942）进一步从动态竞争的角度论证了垄断利润与创新动力之间的关系。他指出，垄断利润是创新的“奖励机制”，为企业提供了承担不确定性与高风险研发投入的激励，从而推动“创造性毁灭”的循环过程。

综上所述，传统创新理论普遍假设创新激励必须以排他性收益为前提，通过产权界定与垄断利润来弥补研发投入。然而，开源软件运动所展现的事实表明，

即便在产权界定模糊、创新成果可自由复制的条件下，创新活动依然能够蓬勃发展。这一现象直接挑战了“创新—产权”关系的经典假设，因此，需要超越传统产权经济学框架，重新审视在非排他性条件下创新如何实现激励与持续性。

2.2 开源创新的回报机制

面对“无产权但有创新”的经验事实，学界从 20 世纪末开始逐步发展出一系列关于开源创新的解释框架。这些研究普遍认为，开源创新的持续性并非源自排他性利润，而是建立在非货币化的激励机制与网络协作结构之上。

Lerner 与 Tirole（2002, 2004）首先从劳动经济学视角出发，将开源贡献视为一种职业信号与人力资本投资行为。开发者通过公开源代码展示技术能力、积累声誉资本，从而提升未来的市场收益与就业机会。这种机制使得个体在缺乏直接经济回报的情境下，仍具有理性参与的动机。Hann, Roberts 与 Slaughter（2004）及其后续研究（Roberts, Hann, & Slaughter, 2006）进一步以实证数据证实，活跃的开源贡献者确实在职业晋升与薪资水平上获得显著溢价。除声誉与职业激励外，开源参与还包含学习、互助与社群认同的内在收益。Lakhani 与 von Hippel（2003）指出，开源社区具有较低的进入门槛与高度的知识共享性，参与者在“学习-协作-改进”的互动中持续积累技能与归属感。Haruvy, Wu 与 Frels（2003）则从行为经济学角度说明，社区互惠与群体声誉机制能形成“内生合作规范”，在缺乏正式契约的条件下维持持续参与。总体而言，这一研究路径强调开源创新的非货币化激励——贡献行为本身能够带来声誉、学习与社群资本，从而形成可持续的激励体系。

与个体动机研究并行，产业组织与战略管理学者从企业角度解释为何公司会主动开放源代码。Bessen（2002）和 Lerner & Tirole（2005）提出，企业开放技术并非出于利他动机，而是为了通过互补资产与差异化商业模式实现间接盈利。例如，企业可以通过咨询服务、技术支持、硬件销售或云计算服务获利，从而以开放策略扩大市场影响力。Schmidt 与 Schnitzer（2003）、Kuan（2001）和 Gaudeul（2004）进一步指出，开放源代码可作为企业的竞争性策略：通过降低潜在进入者成本、削弱专有软件厂商的垄断地位，企业得以在标准制定与技术路径上占据主导。Shapiro 与 Varian（2004）以及 Casadesus-Masanell 与 Ghemawat（2006）将其纳入网络经济学与平台战略框架，认为开放源代码能放大“网络效应”（network effects）并巩固生态势力范围。在这一意义上，开源不仅是一种协作模式，更是企业控制标准与市场结构的战略工具。

Von Hippel 与 von Krogh (2003) 提出的 Private-Collective Innovation Model 为上述两类解释提供了统一理论框架。该模型认为,创新者在公共产出(collective good)生产过程中,仍可通过私人收益(private returns)获得激励——包括声誉、人力资本、互补商业收益等。开源创新正是这种“私人激励与公共产出共存”的典型实践,其知识产出具有公共品特征,而参与者的回报机制则建立在社会资本与协作结构之上。这一模型的提出,标志着经济学与组织理论开始系统理解非排他性条件下的创新激励。然而,该模型仍主要依赖外生激励(如声誉、职业、商业互补性)来解释持续性创新。随着开源项目规模扩大、生态结构复杂化,单纯依靠外部回报已难以解释为何仅有少数项目能形成稳定、可自我维系的生态系统。

2.3 开源生态系统的结构分化与回报差异

随着开源创新规模的扩大与协作网络的复杂化,研究者逐渐认识到,开源体系的可持续性并不仅依赖于外部激励因素(如声誉、职业机会或商业互补资产),还与其内部结构的演化密切相关。

实证研究表明,开源社区并非完全平等或自发的协作网络,而是呈现出显著的“核心—边缘”结构:少数核心开发者在代码贡献上居于中心位置,通过控制版本发布、技术架构与接口标准等手段,决定了其他参与者的创新边界与路径(Crowston & Howison, 2005; Avelino et al., 2019)。这种结构赋予核心维护者一种“架构权力”(architectural power):他们虽未直接占有产权,却能凭借在技术与治理体系中的位置获得更稳定的资源流与影响力。与此同时,外围开发者与依附性项目则通过对核心模块的复用、兼容与扩展实现间接收益,包括知识学习、声誉积累与市场可见度的提升(Liao et al., 2017)。Roberts, Hann 和 Slaughter (2006) 基于 Apache 项目的纵向数据进一步证实了这种结构性的回报差异——核心贡献者在声誉与职业回报方面获得显著溢价,而外围成员主要通过学习与社群认同获得非货币性收益。由此可见,创新回报在开源生态中以结构化、层次化的形式存在。

与此同时,学者也开始探讨这种内部结构与项目活跃度和可持续性之间的关系。Martínez-Torres (2008) 基于多个虚拟社区的社会网络分析提出,开源项目通常经历从单层集中网络到多层分化网络的演化过程,其中核心团队的集中度与项目成功显著正相关。Liao, Hong, and Wu (2017) 的动态网络研究发现,随着时间推移,开源社区的凝聚性增强、核心稳定性提升,表明结构集中有助于项目持续

发展。Hong et al. (2011) 与 Babic and Grbac (2012) 亦从网络演化角度揭示了结构特征与项目生命力之间的深层联系，发现随着项目成熟，开发者网络的聚类度降低、连接性增强，社区逐渐形成更紧密与整合化的结构，这种结构特征有助于知识流动与协调效率。Van Antwerp (2009) 则从协作关系的持续性出发，指出熟悉的合作网络能够显著延长项目生命周期并提升社区活跃度。综上，现有研究普遍认为，开源项目的结构特征——尤其是核心成员的集中度、网络凝聚性与合作关系的稳定性——是影响项目绩效和长期生命力的重要因素。

2.4 文献述评与研究空白

尽管已有研究揭示了开源生态系统内部的结构分化特征及其对项目活跃度和可持续性的影响，但现有文献仍未充分解释这种创新结构与激励结构之间的关系。这一空白使得我们仍无法回答一个核心问题：在没有外部市场补偿的情况下，开源创新体系如何在内部形成可持续的回报机制？

本研究正是从这一空白出发，试图揭示开源创新体系中“创新结构—收益分配”的内生联系。以区块链生态系统为研究对象，本文关注不同层级的创新活动是如何进行收益分配的，进而使得开源创新系统持续向前演进和迭代。通过这一分析框架，本文希望弥补现有文献对开源生态内生激励机制理解的不足。

三、研究设计

3.1 数据

本研究收集和整理了以下三类数据：

（1）开源开发数据：包括以太坊 GitHub 仓库（ethereum/EIPs、go-ethereum 等）及 Solana GitHub 仓库（solana-labs/solana、SIPs 等）的提交记录（commits）、协作请求（PRs）与提案文档。这部分数据用于刻画生态系统的创新活动、贡献者网络以及创新层级的动态变化。

（2）链上经济数据：包括交易费用（gas fees）、代币发行量与通胀率、项目总锁仓量（TVL）、代币价格以及智能合约部署情况等。这部分数据反映生态系统内部的经济回报机制，用于分析不同创新层级（基础层与应用层）与经济回报之间的关系。

（3）市场结构数据：主要来源于链上应用生态与去中心化协议（DApps）层面的信息，包括项目类别、部署时间、协议规模、代币市值等指标。数据主要

来自 DeFiLlama、TokenTerminal 等公共数据接口。该部分数据用于刻画生态系统的外延市场。

3.2 研究方法

本研究采用案例研究（case study）的方法，以区块链生态系统为典型情境，探讨开源创新体系中“创新结构—收益分配”之间的内在机制。

3.2.1 案例选择逻辑

以太坊（Ethereum）被选为主要研究案例。一方面，它是迄今最具代表性的开源区块链系统，形成了由 EIP 提案、协议开发与智能合约应用组成的多层级创新体系，能较完整地体现开源创新与经济激励之间的互动逻辑；另一方面，以太坊生态拥有丰富的可观测数据（GitHub 仓库、链上经济指标、应用项目数据等），为实证分析提供了坚实基础。

此外，本文选取 Solana 作为验证性案例，用于检验研究框架的普适性与稳健性。Solana 在技术架构与治理模式上与以太坊存在一定差异——其开发者集中度更高、性能优化导向更强，但同样遵循开源协作原则。通过对 Solana 的辅助分析，本文旨在验证不同生态条件下“创新层级—收益分配”关系的适用性。

3.2.2 案例分析逻辑与步骤

案例分析将遵循以下逻辑：

- （1） 识别结构：基于 GitHub 数据构建开发者协作网络与提案引用网络，识别基础层与应用层的创新结构特征；
- （2） 创新测度：结合 EIP/PR 数据与链上合约、项目数据，量化不同层级的创新活动强度与扩散模式；
- （3） 收益分析：利用链上经济数据（代币价格、交易费用、TVL 等）刻画生态内部的收益分布特征；
- （4） 机制解释：分析创新结构与收益分配之间的耦合关系，探索区块链生态中内生激励机制的形成逻辑。

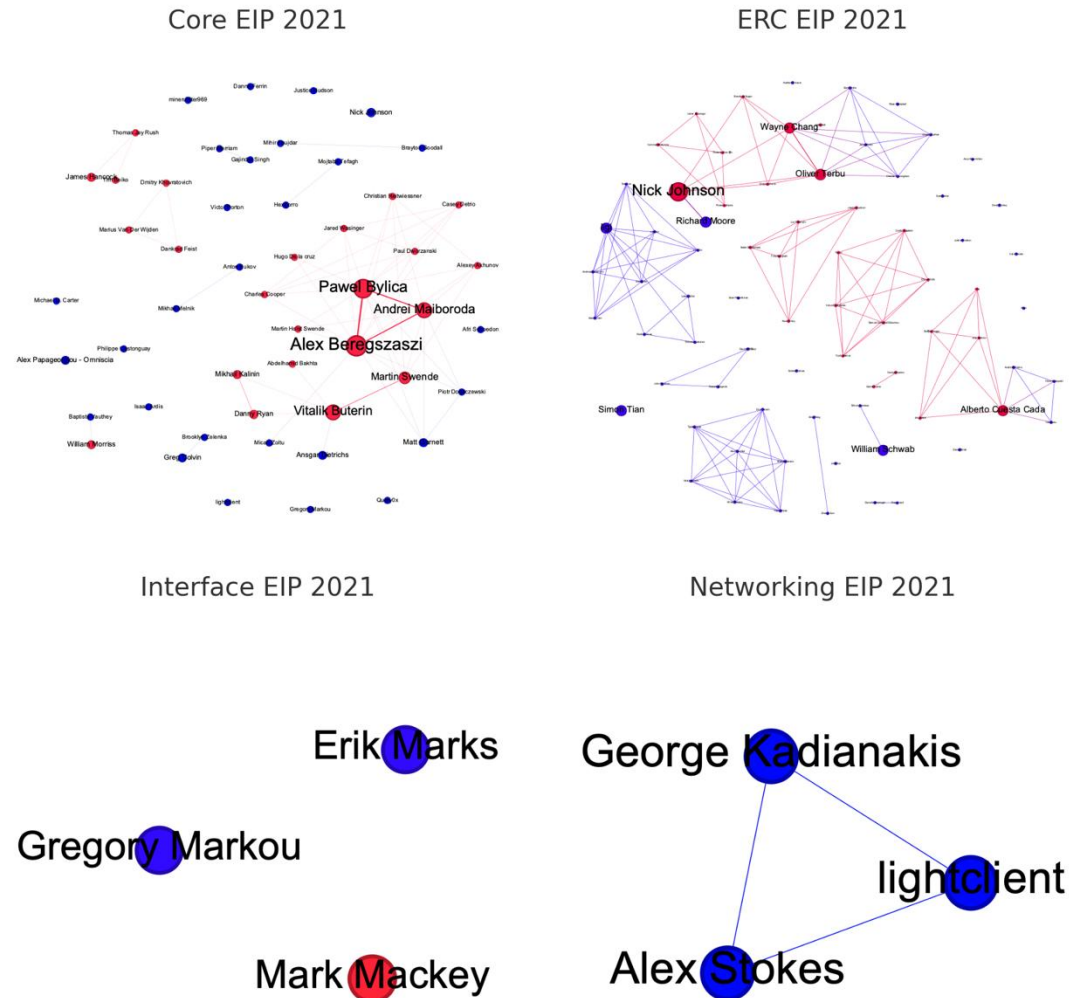
3.2.3 变量设计与指标说明（初步）

为揭示区块链生态系统中不同层级的创新活动与收益分配之间的关系，本文将创新结构划分为基础层创新与应用层创新两类，并结合链上经济变量构建分析指标体系。

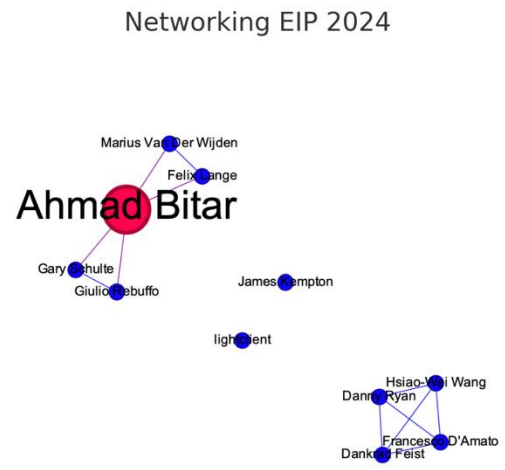
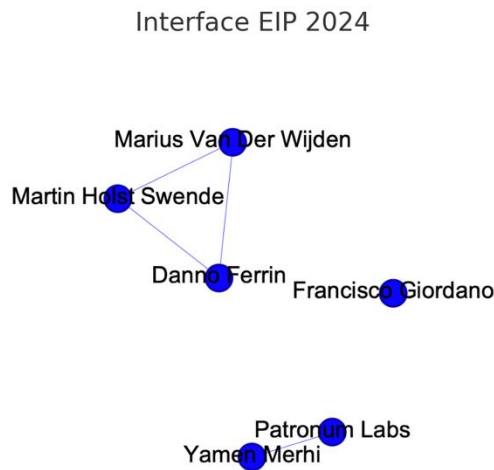
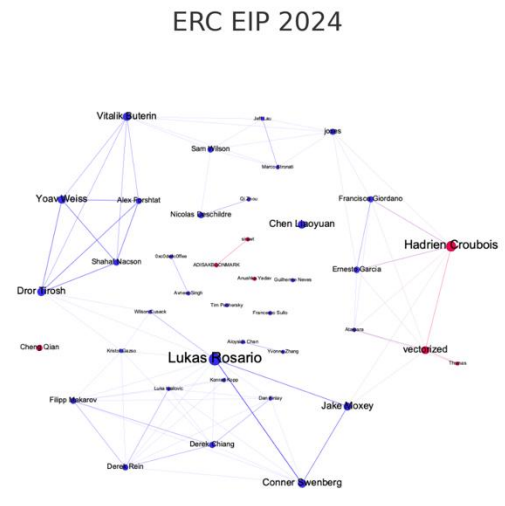
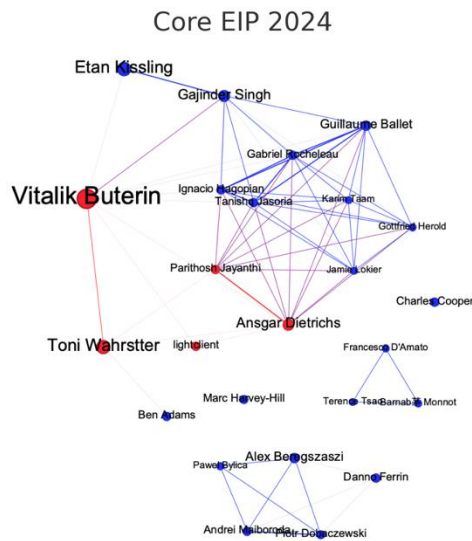
层次	变量类别	测度指标	指标意义
基础层	协议层创新提案	Core 类 EIP 提案数量	衡量基础层创新强度，反映协议在共识、安全与数据结构上的创新想法
	开发活动强度	客户端仓库（go-ethereum）中的 commits 与 Pull Requests 数量	反映客户端的开发强度
	开发者参与度	客户端活跃开发者数量	衡量核心开发社区的人力投入
应用层	应用层创新提案	ERC 提案数量及作者数量	衡量应用层的创新程度，反映各类应用接口标准等应用层的创新想法
	合约开发活跃度	智能合约新部署数量（周）	反映应用开发的活跃度
	生态扩展性	新开发的应用数量	衡量生态的外延增长与应用多样性
经济回报	代币价格（Token Price）		反映生态整体的市场认可与创新成果的资本化水平
	交易费用（Fees）		衡量网络使用强度及其对开发者与验证者的直接经济回报

四、研究进展

4.1 基础层和应用层创新的贡献者网络形态



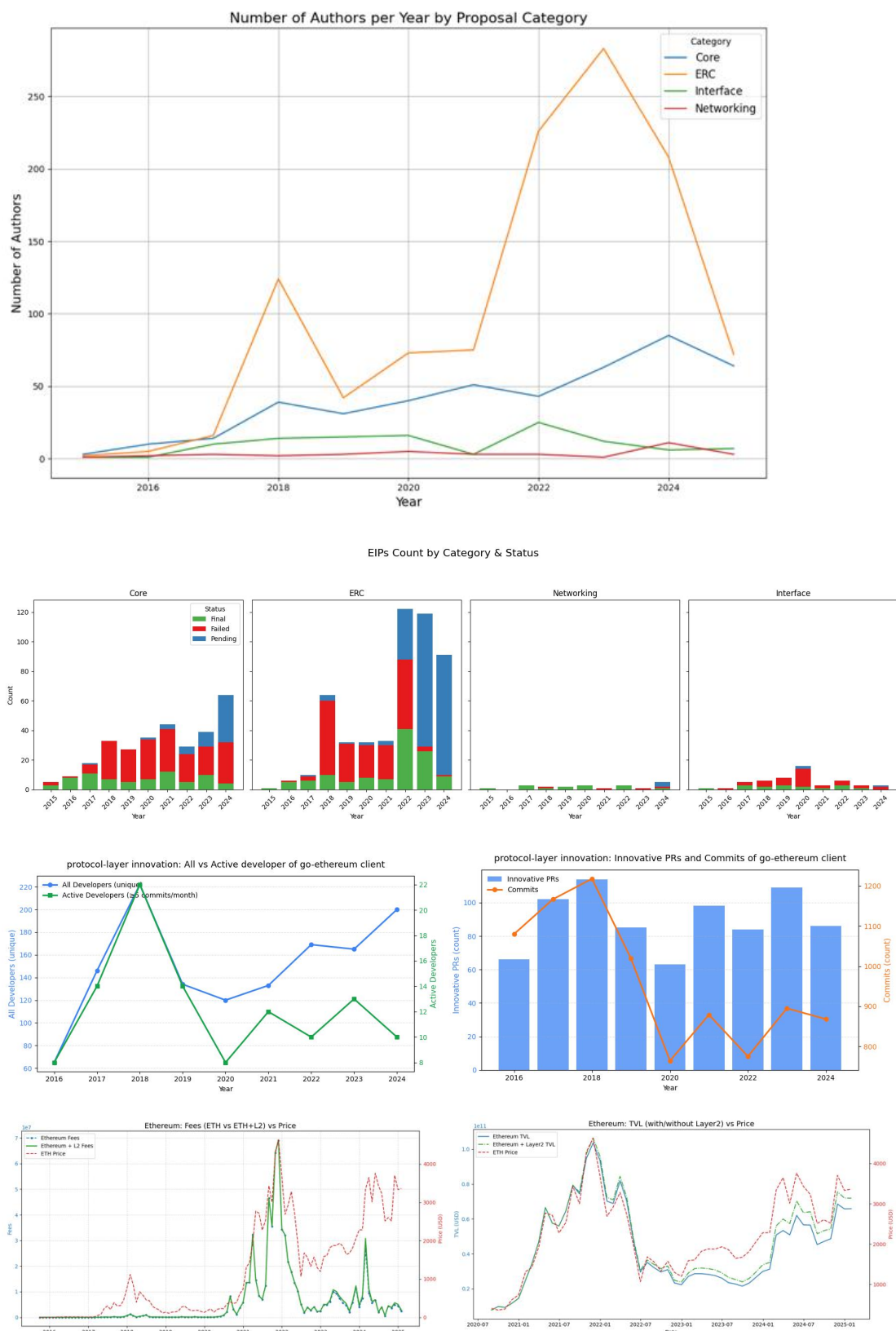
注: 红色节点表示该作者的提案被通过并采用, 在客户端实现协议升级或应用开发端被采纳, 完成创新的落地



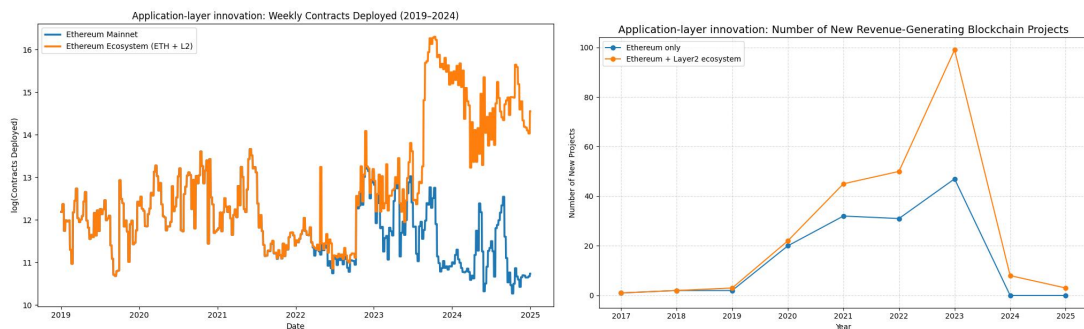
基础层创新遵循核心-外围结构，基础层（Core）的创新往往是由核心开发者团队（eth 基金会）主导，中心化程度高。在区块链底层性能扩展上，关键决策可能依赖于少数核心团队成员的意见和讨论。

应用层创新网络更加分散，通常由全球社区开发者共同参与，体现了更多的去中心化特性。

4.2 以太坊生态系统的迭代机制



基础层创新强度（core 提案数量、提案作者数量、客户端开发频率、客户端开发者数量）和生态系统整体经济回报（eth 代币价格、交易费用）同向变化。

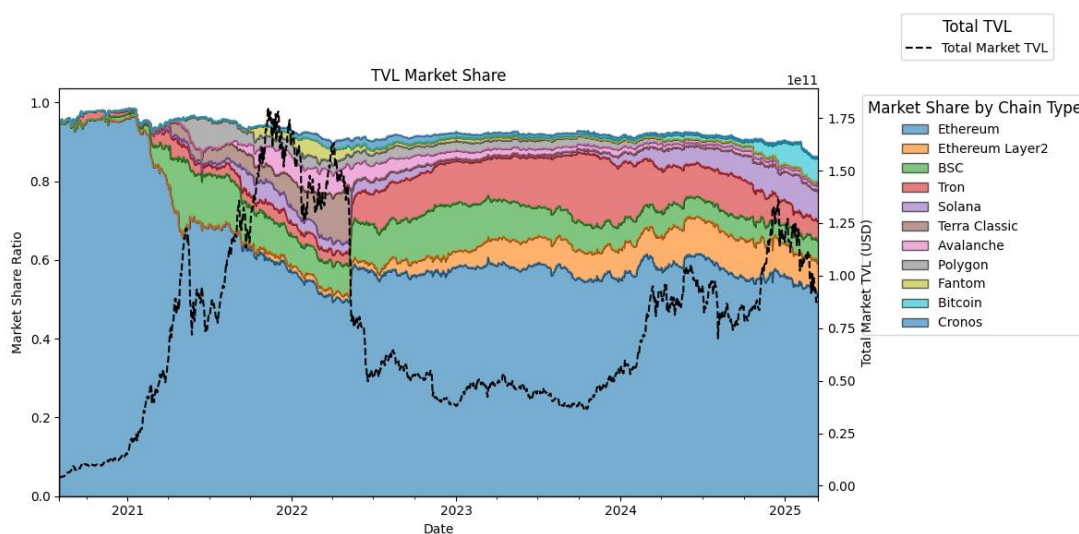
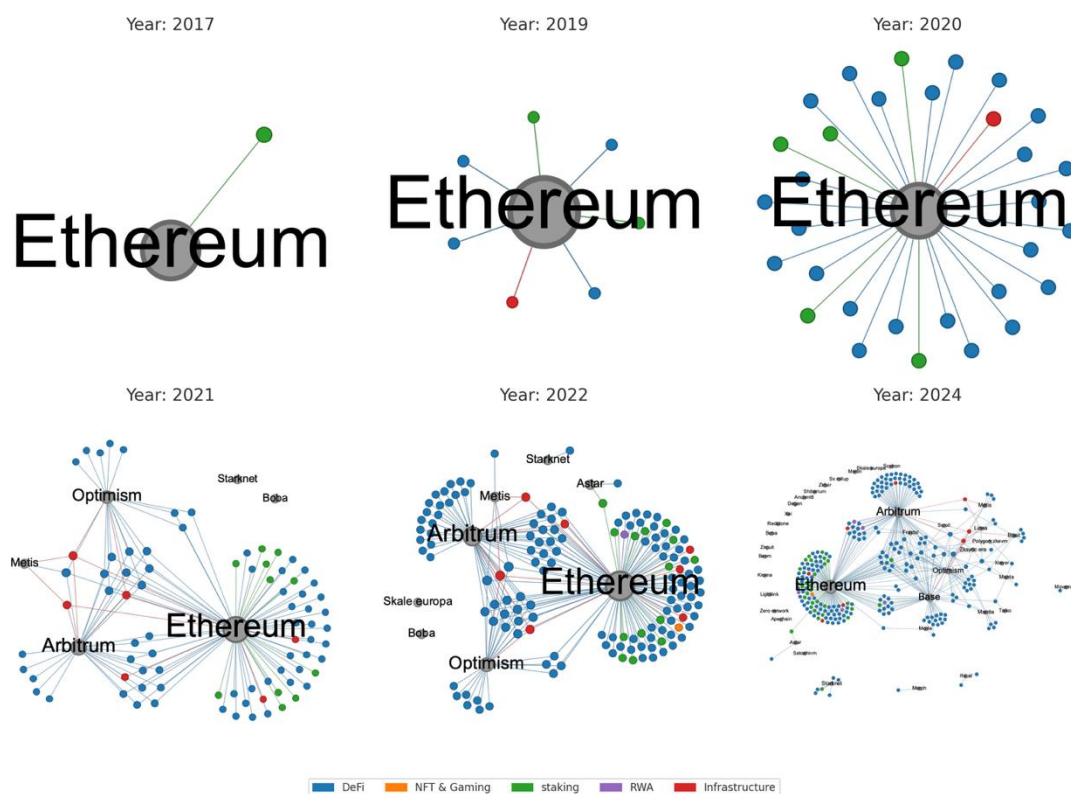


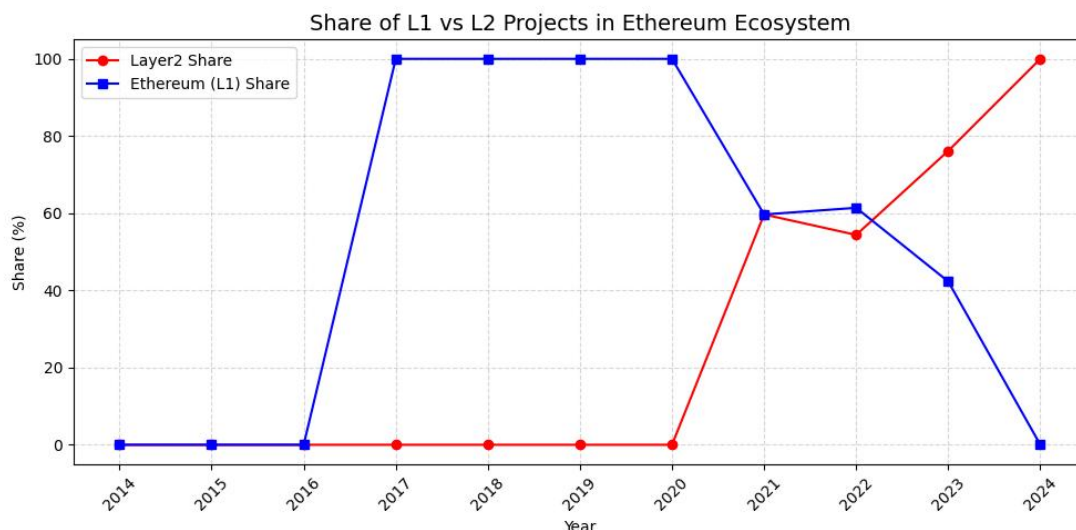
应用层创新强度（ERC 提案数量、提案作者数量、链上智能合约部署频率）和生态系统整体经济回报（eth 代币价格、交易费用）反向变化。生态扩展倾向（新 Dapp 开发数量）在市场低迷期也没有停止。

总体而言，区块链生态的创新演化呈现出由需求驱动与供给驱动交替主导的动态循环机制。在市场低迷阶段（“熊市”），生态系统面临总体需求不足与资本收缩，不同生态系间竞争加剧。此时，生态倾向于通过应用层创新（如推出新型金融协议、NFT、社交或跨链应用）以激发用户需求、拓展区块链使用场景，增加对代币的需求，从而为进一步创新提供资金与激励来源。相反，在市场繁荣阶段（“牛市”），交易量与用户活动激增，系统性能与扩展性约束成为主要瓶颈。此时，生态系统的创新动力更多源自供给侧约束：为支撑增长的交易需求与复杂应用，倒逼协议层开发者进行基础层创新，包括共识机制优化、虚拟机性能提升、分片与 Layer-2 扩展方案的实施等，来拓展区块链空间。由此，区块链生态的创新进程并非线性推进，而是在需求侧与供给侧力量的交替作用下形成循环主导、向前迭代的机制。

随着基础层与应用层创新在不同阶段交替主导，生态系统内部的价值创造与分配关系不断重组，不同类型的创新活动在收益形式与回报路径上逐渐分化。基于此，本文关注的核心问题在于：在开放协作的区块链创新体系中，这种创新结构的收益分配机制是什么？换言之，当以太坊生态的创新活动沿技术栈分层展开时，不同层级的创新如何被回报，进而使得生态系统具有自我维系的能力，构成了本文试图揭示的关键问题。

4.3 以太坊生态系统的产业结构演化





近年来，以太坊生态系统的产业结构经历了显著的分层化转型。早期（2017—2019 年）以太坊作为单一主链运行，绝大部分创新活动集中在主网层（Layer1），由核心协议开发者推动共识机制、虚拟机性能与代币经济改进的同时，应用层创新也集中在 layer1。然而，随着网络使用量与交易复杂度的持续上升，主链性能瓶颈逐渐显现，促使开发者探索“分层执行”的扩展方案。自 2021 年起，以太坊进入“Layer1—Layer2”协同架构阶段：主链主要承担安全与结算功能，而二层网络（如 Arbitrum、Optimism、zkSync、Base、Scroll 等）负责交易执行与应用部署。这种技术架构的转型重塑了生态的产业结构。随着 Layer2 的开发与成熟，部分锁仓量（TVL）与开发应用逐渐从主链迁移至二层网络。如图所示，2022 年后以太坊生态系统在整体市场中的份额保持稳定，但其内部产业结构出现显著再分层：Layer2 协议及其衍生应用在总锁仓量中占比快速提升，新开发的应用也主要部署在 layer2 上。

这种资金与市场活动的迁移，实质上反映了创新结构的演化。在早期单链阶段，基础层和应用层创新都主要由 layer1 开发者主导，而在多层架构形成后，Layer2 成为应用开发主要场域，聚集大量去中心化金融（DeFi）、NFT、社交与基础设施项目，承担起大部分的应用层创新；Layer1 则更多承担系统安全与跨层治理的角色，其创新活动相对集中与基础协议层创新以及生态系统的整体治理。这种分层化结构意味着创新活动的组织方式与价值分配机制正从单中心、同质化模式，演化为跨层协同的复杂结构。因此，本研究也将进一步研究随着以太坊创新结构的复杂化，生态内部的收益分配机制将会如何发生改变。

参考文献

Arrow, K. J. (1962). Economic welfare and the allocation of resources for invention. In R. Nelson (Ed.), *The rate and direction of inventive activity* (pp. 609–626). Princeton University Press.

Avelino, G., Passos, L., Hora, A., & Valente, M. T. (2019). A novel approach for estimating truck factors. *Empirical Software Engineering*, 24(4), 1884–1936.

Alami, A., Idri, A., & Bendraou, R. (2024). Free open source communities sustainability: Does it make a difference in software quality? *Empirical Software Engineering*, 29(4), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10664-024-10529-6>

Bessen, J. (2002). Open source software: Free provision of complex public goods. Boston University School of Law Working Paper.

Casadesus-Masanell, R., & Ghemawat, P. (2003). Dynamic mixed duopoly: A model motivated by Linux vs. Windows. Harvard Business School Working Paper.

Casadesus-Masanell, R., & Ghemawat, P. (2006). Dynamic mixed duopoly: A model motivated by Linux vs. Windows. *Management Science*, 52(7), 1072–1084.

Crowston, K., & Howison, J. (2005). The social structure of free and open source software development. *First Monday*, 10(2). <https://doi.org/10.5210/fm.v10i2.1207>

Gaudeul, A. (2004). The open source movement: Competition and cooperation of potentially competing firms. University of East Anglia Working Paper.

Hann, I.-H., Roberts, J., & Slaughter, S. (2004). Why developers participate in open source software projects: An empirical investigation of the Apache projects. Carnegie Mellon University Working Paper.

Haruvy, E., Wu, F., & Frels, J. K. (2003). The role of participation costs in online communities: The case of open source software. University of Texas at Austin Working Paper.

Johnson, J. P. (2002). Open source software: Private provision of a public good. *Journal of Economics & Management Strategy*, 11(4), 637–662.

Kuan, J. (2001). Open source software as consumer integration into production. Stanford University Working Paper.

Lakhani, K. R., & von Hippel, E. (2003). How open source software works: “Free” user-to-user assistance. *Research Policy*, 32(6), 923–943.

Lerner, J., & Tirole, J. (2002). Some simple economics of open source. *Journal of Industrial Economics*, 50(2), 197–234.

Lerner, J., & Tirole, J. (2005). The scope of open source licensing. *Journal of Law, Economics, and Organization*, 21(1), 20–56.

Liao, W., Jiang, H., & Liu, Y. (2017). A prediction model of the project life-span in open source software ecosystem. arXiv preprint arXiv:1710.11540.

Martínez-Torres, M. R. (2008). Analyzing communities of practice in open-source software projects using social network analysis. *Information Sciences*, 179(8), 1109–1122.

McKinsey & Company, Mozilla Foundation, & Patrick J. McGovern Foundation. (2025, April 22). Open source technology in the age of AI. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/open-source-technology-in-the-age-of-ai>

Miljković, N., Trisović, A., & Peer, L. (2021). Towards FAIR principles for open hardware. arXiv preprint arXiv:2109.06045. <https://arxiv.org/abs/2109.06045>

Red Hat. (2025, January 21). Why open source is critical to the future of AI. Red Hat Blog. <https://www.redhat.com/en/blog/why-open-source-critical-future-ai>

Roberts, J. A., Hann, I.-H., & Slaughter, S. A. (2006). Understanding the motivations, participation, and performance of open source software developers: A longitudinal study of the Apache projects. *Management Science*, 52(7), 984–999.

Saint-Paul, G. (2003). Growth effects of non-proprietary innovation. *Journal of the European Economic Association*, 1(2–3), 429–439.

Schmidt, K. M., & Schnitzer, M. (2003). Public subsidies for open source? Some economic policy issues of the software market. *CESifo Economic Studies*, 49(2), 385–426.

Shapiro, C., & Varian, H. R. (2004). The art of standard wars. *California Management Review*, 41(2), 8–32.

Van Antwerp, M. (2009). Social network dynamics and the evolution of open source communities. *Proceedings of the 2009 International Conference on Open Source Systems*, 1–12.

von Hippel, E., & von Krogh, G. (2003). Open source software and the “private-collective” innovation model: Issues for organization science. *Organization Science*, 14(2), 209–223.