不要信任，去验证：迈向比特币绿色化框架

Juan Ignacio Ibañez[123], Alexander Freier[234]DLT Science Foundation，英国伦敦[2]区块链技术中心，伦敦大学学院，英国伦敦[3]政治科学与国际关系学院，科尔多瓦天主教大学，阿根廷科尔多瓦[4] EnergiequelleGmbH，德国费尔德海姆 j.ibanez@ucl.ac.uk，freier@energiequelle.de

arXiv:2305.01815v1 [econ.GN] 2 May 2023

版本：2023年5月4日

摘要——**十多年来，比特币在广受采用的同时，也饱受批评。从根本上说，比特币因工作量证明（PoW）共识算法能耗巨大、由此产生的碳足迹高而备受抨击。然而，比特币挖矿正呈现出迈向碳负排放状态的趋势，尤其是通过采用基于甲烷的挖矿，以及采用基于挖矿的灵活负荷响应（灵活负荷响应，FLR）来补充可变可再生能源（VRE）发电。矿工和电力销售商不仅可以利用过剩能源提高盈利能力，还可以向有意让投资组合更加绿色的买家出售绿色代币。尽管如此，要建立恰当的"绿色比特币"核算体系，就需要一个用于认证可持续比特币持有量的标准框架。建立这一框架的恰当方式仍存在争议。本文综述了不同的可持续比特币核算体系，并通过分析各种方案，提出了未来的发展方向。**

索引词—**区块链、碳足迹、脱碳、可持续性、《可再生能源》**。

I. 引言

在革命性的比特币协议及其加密货币比特币的引领下，区块链技术正超越单纯的愿景，逐渐成为现实。然而，区块链总体而言，尤其是比特币，因工作量证明共识算法 [1], [2]能耗高而受到严厉批评。这主要源于人们担心挖矿可能会加剧气候变化。尽管如此，越来越多的文献开始指出，比特币不仅有望实现脱碳，甚至还可能成为净负碳资产 [3], [4]。

简而言之，争论的核心在于，比特币挖矿过程具有独特特征，使其成为可再生能源发电的极佳补充：它提供的负荷具有灵活、可中断、非竞争性、可用、稳定可靠、对价格高度敏感、与规模无关且便于迁移等特点；与此同时，其产出价格与电价不相关，并为可再生能源卖方提供额外收入来源 [3]。随着时间推移，这种互补性预计将不断增强：一方面，挖矿利润会因挖矿市场竞争加剧和比特币减半而下降；另一方面，可再生能源不平衡会因可再生能源渗透率提高而加剧 [3]。

尽管这一论点具有合理性，但这种现象究竟只是比特币碳足迹的减缓因素，还是会成为推动整个能源电网实现真正净脱碳的力量，仍是一个有待实证研究的问题。不过，这并不意味着它只是外生因素，因为矿工或许有能力推动协议朝后者的方向发展。

具体而言，如果矿工能够将其活动相关的绿色属性变现，这可能会使他们比其他矿工更具竞争优势 [4]。反过来，这可能成为一个关键的推动因素，使局势转向脱碳。

A. 研究现状与我们的贡献

随着时间推移，已有多项研究致力于为绿色比特币矿工提供额外的利润来源。Cross 和 Bailey [5] 系统梳理了持有和挖掘比特币对可持续性的影响，并据此提出了一种激励抵消方案。Martinez [6] 概述了一个符合现有环境、社会和治理（ESG）报告标准的比特币碳市场框架；SBP [7] 则探讨了比特币与能源属性证书（EACs）之间的相互作用。尽管如此，尚无重要研究对这一领域的最新进展进行系统梳理。本文提出一个最新框架，以弥补这一空白。

为此，本文结构如下。首先，我们回顾比特币碳核算的各种形式，并比较不同的估算方法。其次，我们调查旨在核算比特币绿色程度并为之提供激励的方案，探讨其优缺点。随后，我们讨论研究发现并总结关键结论。

II. 比特币碳核算

要建立一个以温室气体（GHG）为衡量标准、用于核算绿色比特币属性的框架，首先需要了解比特币排放的碳核算。我们将处理比特币排放不同方面的系统分为两类。第一类系统用于确定某个系统的总排放中有多少比例归因于特定子系统（此处指比特币协议）。第二类系统则讨论与排放存在因果关系、应作为排放分母的事件（每次事件的排放量）。

与排放存在因果关系、应作为排放分母的事件（每次事件的排放量）。

A. 总排放量的估算方法

要计算特定电网中比特币协议的总排放量，必须先采取某种哲学立场。尽管在某些离网挖矿情形下，或在矿工与能源卖方之间达成安排、由后者新增发电以履行其义务时（这也会引发外部核验问题，例如与自我报告相关的问题），排放核算通常并非直接明了，因为它要求优先考虑某些排放而非其他排放。

为分析每种方法，我们采用 Cross [8] 确定的 3 项碳核算约束：

1) “可组合性。系统中各参与者的碳足迹之和必须等于该系统的总碳足迹。2) “边际性。某项行动的碳足迹必须反映采取该行动与（反事实地）不采取该行动之间的差异。”3) “可互换性。在相同时间内使用相同能源的任意两名用户，其碳足迹必须相等。”

a) 边际排放核算：边际排放方法是一种事前与事后的因果推断形式。如果接入电网的矿工开始运营，那么电网在其开始运营后的排放量与开始运营前的排放量之差，就应归因于该矿工。也可以将其表述为一种假设性的事前分析：如果矿工开始运营，电网将产生的新增排放应归因于该矿工。反过来也可以进行同样的分析：如果矿工关机，电网将产生的排放量与电网实际排放量之差，就是应归因于该矿工的排放量。这种近似方法往往突出这样一个事实：基础能源需求由可再生能源满足，只有在可再生能源耗尽后，净负荷才由化石能源满足。换言之，化石能源来源是边际卖方。

这种方法直观易懂，通常被比特币批评者采用，大概是因为比特币是一个相当新的能源需求来源 [9]。然而，这种方法存在四个问题。

1) 它任意地将“绿色能源”分配给老用户，将“棕色能源”分配给新用户，尽管他们消耗的都是来自同一能源电网、可互换的电子，而这样分配的唯一依据只是先到先得原则。因此，它牺牲了负荷的可互换性（见下文讨论）。2) 如果对所有能源购买者始终如一地应用这一原则，就会出现电网总排放量远小于所有购买者个体排放量之和的结果。因此，它牺牲了负荷的可组合性。3) 它表现出非常显著的短期偏差，这与人们通常看待其他负荷的方式并不一致，例如。

电池。额外负荷可能会激励可再生能源扩建（需求带动投资），从而形成边际排放数据未考虑的新均衡。例如，电池的边际排放可能很高，但同时也能推动新增可再生能源容量的部署。

4）短期边际排放可能不会与长期边际排放一致（增加的边际排放也可能与减少的平均排放并存 [10]）。

b）归因法核算：归因法核算是一种碳核算形式，将电网的全部排放归因于所有能源消费者。由于从电网总排放出发，它保留了构成性。归因法核算最简单的形式是简单平均值（“平均排放”），由此形成一种电网组合平等主义。Ryan 等人 [11] 已确定了归因法核算的众多变体。

平均排放因子同样保留了可互换性。总体而言，相较于边际排放因子，其有用性取决于研究问题（例如，平均排放因子被认为更适合用于责任归因 [11]）。然而，它们不一定会考虑边际性，而边际性是一个有用的概念。

c）基于能源属性证书的排放：使用能源属性证书，例如可再生能源证书（RECs）或原产地保证（GOs），可以被视为归因法核算的一种形式。然而，鉴于其对于理解能源市场运作的重要性，我们将其单独处理。在能源属性证书体系下，矿工是否使用绿色或棕色能源进行挖矿，并不直接取决于矿工在电网组合中的份额，也不取决于矿工开始运营后随后产生的额外影响，而是取决于矿工是否购买了能源属性证书。

B. 每笔事件排放的估算方法 *nt*

确定总排放量后，识别一个在因果上导致这些排放产生的事件是有益的，这样既可以确定每个事件对应的排放量，也有助于开展成本效益分析，例如根据该事件带来的收益和排放造成的成本进行分析。

a) 来源核算： 来源核算关注每一枚“币”，将每枚币的环境影响视为由其历史挖矿过程中所使用的能源支出和能源结构决定。在某种意义上，这种观点认为，用于挖掘某枚特定币的能源结构会在其整个生命周期中始终伴随该币，因此，使用少量电力挖掘的“较老”币始终会比更新、耗电量更高的币环保得多。在这一范式下，如果从技术上能够追溯每枚币的来源，其经济上的可互换性就会受到削弱。

然而，持有比特币会推高比特币价格，从而激励更多的挖矿活动。无论持有的币是旧币还是新币，是绿色的还是非绿色的，都不会对此产生任何影响。换言之，即使持有绿色比特币成为可能，这样做也会产生激励，促使人们挖掘更多比特币，而这些比特币可能是绿色的。

或棕色。这种激励效应应纳入 greenBitcoin 框架中。

b) 交易核算：交易核算是指在给定时间段内，将所有排放（或电力消耗）除以该时段内的交易数量，从而得出每笔交易的碳排放（或电力消耗）指标。这种方法通常暗示交易会导致电力消耗或排放，因此新增交易会带来额外排放。

这种方法受到批评，因为它忽视了一个事实：与权益证明（PoS）系统不同，在大多数工作量证明（PoW）系统中，交易处理所消耗的电力微乎其微。相反，绝大多数计算工作都来自挖矿过程。此外，这种方法既忽略了比特币作为批发支付系统的运作方式——该系统可通过二层（L2）解决方案支持大量交易——也未将定期减少挖矿激励的比特币减半纳入考量，因此，将每笔新增交易都与额外排放挂钩的预测通常存在严重缺陷 [12], [13]。

c) 持有量核算：为解决上述不足，Cross 和 Bailey [5] 提出了持有量核算方法，加密碳评级研究所将其称为“基于持有量的方法” [14]。该方法认为，在持有比特币期间，持有比特币会按比例产生激励，促使比特币被挖出。此外，也可以像基于交易的方法那样，以对称的方式，将某一时期的全部排放量按各持有者在该时段内的持有比例进行分摊。[1]

由于这种方法更准确地反映了比特币挖矿的经济现实，因此正获得越来越多的赞誉。尽管如此，它也存在一些局限。交易处理在比特币协议的计算工作量中占比微不足道，并不意味着交易处理所导致的电力消耗也同样微不足道。这是因为交易处理本身可能产生一种挖矿激励，其影响远超其所占计算工作量的比例。[2] 因此，持有量核算方法能够准确归因于比特币持有所导致的排放，却无法核算比特币交易。[3]

d) 混合核算：若采用更全面的方法，可以将因争取区块补贴而产生的排放归于持有者（按其持有量比例，即持有量核算），并将因争取交易手续费而产生的排放归于交易（交易核算）。CCRI [14] （Cross[16]也曾提出这种混合方法）：

> “从激励角度来看，矿工既获得区块补贴，也获得交易费。交易费由执行交易的实体支付，但区块补贴为何由所有持有者支付，可能并不直观。要理解持有者与区块补贴之间的关系，我们需要考虑新货币的创造。矿工提出新区块时，会获得新币作为奖励。随着货币供应量增加，货币整体价值保持不变。因此，单个币的价值会降低；相应加密货币中每位持有者所持资产的价值都会缩水；缩水的部分以新币的形式支付给矿工作为区块补贴。这相当于所有持有者间接向矿工付款，而矿工继而用这笔钱购买电力，以运行挖矿设备。因此，所有持有者都应承担总奖励中区块补贴所占部分。混合方法考虑了这些现象，并将网络总排放分摊给所有持有者以及所有执行交易的实体。持有者与交易所占的份额按两部分各自的占比加权。” [14,第 14] 页

III. 比特币排放问题的拟议解决方案综述

介绍了应对比特币温室气体排放的框架后，我们转而讨论核算绿色比特币属性的框架。

A. 彩色币

解决比特币能源“问题”的一种初步方案，是区分“绿色”“灰色”和“棕色”币 [17]–[19]。这相当于在链上记录挖掘每枚特定币所用能源类型。[4] 这一提议至少可追溯至 2013 年，当时有人提出了“Coin Validation”项目 [18]（并遭到强烈批评 [20],

[1]“所有碳排放都会按持有者所拥有的比特币数量比例，归于比特币持有者。”[2] 还要注意，虽然在任何时刻，所有未丢失的比特币都必须由某人持有（包括用于交易的比特币），但从激励角度看，这一点关系不大（见下一条脚注）。

[3]Cross 和 Bailey [5] 认为，区块奖励和交易费均以比特币计价，因此取决于比特币价格，而比特币价格又受到持有比特币的投资者影响。尽管这些说法都成立，但我们并不认为交易费仅仅因为以比特币计价，就会随比特币价格而变化。相反，交易费由区块空间的供求关系决定，而这种供求关系取决于付款方认为比特币作为支付协议具有多大预期效用。就实际情况而言，最好将区块奖励视为以比特币计价，而将交易费视为以法定货币计价。

[4]其他替代方案包括只长期持有绿色的“原生”币，参见 https://www.hiveblockchain.com/。

[21]）。也有人出于了解你的客户/反洗钱目的提出了类似的方案 [22]。

彩色币存在两个主要问题。首先，区分绿色币与灰色币/棕色币，会以严重损害比特币可互换性为代价，而可互换性是加密货币货币属性的关键要素 [5], [21]（另见 [23]）。其次，使用彩色币的前提是采用“来源核算” [5]。

B. 激励抵消

2021年，Cross 和 Bailey [5] 从持有量核算的角度提出激励抵消系统，将这一观点形式化。他们的框架指出，为了完全抵消持有比特币所造成的任何排放，每位比特币持有者都应按其持有量的比例，共同投资于可持续比特币挖矿（可持续的定义由个人自行决定）。因此，如果某人持有全部比特币的1%，就应投资于以可持续方式挖掘相当于比特币总哈希率1%的算力。

这一提议背后的机制与持有和挖掘比特币所带来的激励有关。首先，持有比特币会产生挖掘比特币的激励，因为比特币价格会上涨，挖矿盈利能力也会提高。其次，挖掘比特币会产生不再挖掘比特币的激励，因为哈希率会上升，挖矿盈利能力也会随之下降。因此，Cross 和 Bailey 建议按持有量的比例共同投资于绿色挖矿，以此中和持有比特币所带来的任何激励效应。

该提案具有若干显著优势，包括能够适应每个人对可持续性的不同定义、无需了解全球比特币电网能源结构，以及最重要的一点：只要挖矿本身能够盈利，该提案就能实现盈利。然而，扩大该提案的应用规模可能会面临一些实施方面的挑战，因为它可能与现有系统发生冲突，进而导致绿色属性的重复计算（见 IV-D）。

C. 传统环境市场工具

只要比特币挖矿导致温室气体净排放为正，矿工、持有者或比特币付款者（具体取决于所采用的单次活动估算方法）就可以选择通过在市场上购买环境工具，使其比特币持有量实现绿色化。

a) 碳抵消：碳抵消是指减少温室气体排放或清除温室气体。碳抵消证书是一种工具（广义上说是一种“代币”），它不仅证明了抵消，还允许持有人或所有者将该抵消视为自己的抵消，从而补偿自身的排放。温室气体排放为正的比特币矿工可以购买碳抵消，例如实现净碳中和。抵消证书可被视为有利于环境，因为对其需求越大，价格越高，抵消项目提供方获得的回报就越高，因此持续开展抵消的动力也越大。

然而，碳抵消一直受到批评：

1) 它们会成为排放方继续排放并为其活动“漂绿”的“通行证” [24]–[26].[5] 2) 它们并不可信，所声称的“已避免”温室气体数量被严重高估；无论抵消方是否采取行动，这些排放本来都会被避免；排放会在一段时间后“反弹”；或者它们存在其他实证问题，例如重复计算、缺乏额外性等。 [27], [28] 3) 至少从财务角度来看，它们对买方而言纯属损失，因为买方无法从中获得任何收入 [5]。

还应注意，如果一位温室气体排放为负值的矿工想要出售碳抵消，以便为其算力创造绿色溢价，从而获得进一步投资可再生能源挖矿的激励，那么其可能无法做到这一点。这是因为，绿色矿工实现净负排放的主要方式之一，是通过提高全球算力将棕色矿工挤出市场，或通过灵活负荷响应促成额外的可再生能源建设[3]。这两者都属于二阶效应，存在不确定性，并受许多其他因素影响，因此即便激励效应确实存在，也无法对其进行核验、审计和认证。[6]

b) 碳信用：碳信用是与碳抵消相似的工具，但通常源于监管，而且它们并不代表已经排放的一定数量温室气体，而是代表合法排放该数量温室气体的权利。因此，矿工或持有者可以购买碳信用。它们也受到一些与碳抵消相同的批评，即可能助长漂绿 [31]，且不会为购买者带来收入 [5]。[7]

c) 可再生能源证书和原产地保证：如果从电网购电，由于绿色能源电子与棕色能源电子无法区分，矿工可以购买能源属性证书，从而声称其活动是绿色的。这种做法的优点是符合现有能源市场的运作方式（即通过环境属性的商业化），并且能够激励可再生能源扩建，因为它实际上为可再生能源所发电力提供了“绿色溢价”。 [32]

然而，能源属性证书也因涉嫌漂绿而受到批评。具体而言，有观点认为，这种激励

[5]较为宽容的观点或许会承认，购买碳抵消能为额外的抵消项目带来激励，但仍认为，如果低质量抵消比可靠性高得多的内部温室气体减排措施更便宜（因此优先于后者），那么抵消在一定程度上就成了免罪通行证，类似于格雷欣法则 [25]。

[6]请注意，甲烷矿工并非如此；他们只需认定甲烷比二氧化碳“危害更大”，就能轻易认证减排，且无需承担其他成本（见 [3], [29], [30]）。

[7]有人也可能会认为，与抵消证书不同，碳信用本身不会产生促使进一步抵消或扩大可再生能源建设的激励，因为它们不会直接奖励抵消项目提供方或可再生能源（RES）生产商。不过，情况并非显而易见。碳信用价格高昂，可能会促使企业减少或抵消排放，以免必须购买碳信用。

绿色溢价带来的收入并未促成额外的可再生能源扩建（若有新的可再生能源投资，也应归因于其他因素，而非这笔收入）。因此，出售能源属性证书（EACs）所得收入实际上会成为可再生能源卖方的意外之财，而这些卖方的设施早已建成。然而，尽管通过购买能源属性证书（EACs）间接实现的减排远少于企业在现实世界中直接实现的减排，二者却被视为同等。这样一来，又会出现某种类似格雷欣法则的现象：劣质减排取代优质减排。 [33]–[36]

D. 独特的比特币环境市场工具

上文讨论了矿工在其运营产生净负面影响时，出售其运营绿色属性所面临的困难。为解决这一问题，已有方案提出将这些属性代币化。Sustainable Bitcoin Protocol 和 Clean Incentive 分别设计了可持续比特币证书和清洁比特币证书，二者各有一些差异化特点。这些代币在链上（分别记录于基于比特币的 Stacks 区块链和基于序数理论的比特币铭文中）存储一项记录，证明某枚比特币是以可持续方式挖出的；每枚以可持续方式挖出的比特币都会生成一个代币（须经过验证流程）。投资组合经理可以通过每持有一枚比特币便持有一个代币的方式，使其比特币投资组合更加绿色。[8][9]

这些工具的优点包括：为矿工提供额外的收入来源；既与现有体系（尤其是环境属性市场）保持一致，又针对比特币的特殊性量身定制（例如，这些代币可用于甲烷挖矿、离网挖矿、基于能源属性证书的挖矿等）；并有助于环境、社会和治理报告。反过来，这些项目面临的挑战之一，是构建技术上可靠且拥有足够买家的生态系统，以使这些代币具备流动性。

IV. 讨论

本文始终致力于梳理并系统化构成比特币绿色化及其核算体系的各种要素，并强调了不同方法各自的优缺点。接下来，我们将解读这些发现，并提炼出关键结论。

A. 二阶因果效应与激励

我们的研究表明，要恰当地评估比特币的可持续性程度，就必须超越对特定事件即时、直接的短期影响的考察。否则，就会掩盖一些重要事实，例如边际电力消耗（即使其边际排放较高）、灵活负荷、碳抵消，乃至碳信用如何可能激励可再生能源扩建。同样，对碳信用、碳抵消和能源属性证书有用性的悲观态度，也可能源于短期偏见，以及对其中长期激励的忽视。

B. 哲学预设

另一个发现是，在分析比特币的“绿色性”或“棕色性”时，哲学假设的重要性常常遭到忽视。如果将边际排放核算用于归属责任（而非用于其他范围狭窄得多的应用），它便与这样一种哲学立场相联系：能源购买者的正当性取决于其相对资历。这是一种相当非正统的立场。这或许表明，对于这一目标而言，归因框架更为适用，无论是通过简单平均所体现的平等主义，还是通过基于能源属性证书的方法所体现的一致性。总之，始终如一地运用哲学视角至关重要，无论是在分析单一行业的各个维度时，还是在跨行业分析时。

C. 与现有体系的协调性

本文指出的各项举措凸显了任何比特币绿色化方案与现有体系（例如环境属性市场）保持协调的重要性。若制定框架时未将这些体系纳入考量，可能会面临实施障碍，且推广速度也会减慢。

D. 重复计算问题

这些举措属于前述类型。多个框架相互重叠，可能会给旨在解决双重支付问题的技术带来一个讽刺性的后果：环境属性被重复计算。如果矿工声称，由于其接入电网的能源结构，该矿工的活动是绿色的，但与此同时，电网中的所有能源都已出售能源属性证书，那么就会出现重复计算：能源结构的绿色属性被使用了两次，一次是在平均归因方案中，另一次是在能源属性证书方案中。类似地，如果某人通过投资于一名声称依托电网能源结构、但未购买可再生能源证书的矿工，采用 Cross的激励抵消方案来抵消其比特币持有量，那么绿色能源的绿色属性也可能被使用两次。[10]

E. 建立环境、社会和治理报告框架的必要性

比特币的碳负二阶效应必须以充分符合现有报告实践的方式纳入核算（如前文关于“连贯性”的讨论所述）。为此，一个可能颇有成效的途径是采用“范围四”排放（避免排放）的概念[37], [38]。

我们此前已经指出，第二阶避免排放无法得到可靠的“验证”，但其所产生的避免排放激励效应确实存在。通过可再生能源证书（RECs）等现有工具所激励的额外可再生能源扩建。

[8]这些体系包含代币经济方案，不仅旨在使新币实现绿色化，也旨在使已挖出的币实现绿色化。[9]参见 https://www.sustainablebtc.org/ 和 https://www.cleanincentive.com/。

[10]这又回到了哲学预设这一根本问题：在双方都对同一属性进行重复使用的情况下，责任应如何归属并不完全明晰。

也无法证明碳抵消的效果，但我们仍承认，例如，能源属性证书是碳核算中的重要工具。类似的理解也可以为基于范围四的工具提供指导。

五、结论

我们调研并系统梳理了比特币碳核算领域的最新进展。因此，我们倾向于强调以下几点的重要性：明确哲学假设、考虑二阶效应、将任何绿色比特币框架纳入现有方案，以及避免重复计算。

致谢

我们感谢 Troy Cross、Casey Martinez 和 Elliot David 提出的意见，这些意见极大地改善了本文稿。J.I.I. 的研究工作得到了 DLT Science Foundation 和伦敦大学学院区块链技术中心的资助。A.F. 的研究工作得到了伦敦大学学院区块链技术中心和 Energiequelle GmbH 的资助。

利益冲突

作者声明，他们不存在可能影响本文所报告工作的已知竞争性财务利益或个人关系。

缩略语

能源属性证书 能源归属证书 环境、社会和治理 灵活负荷响应 温室气体 温室气体原产地保证 原产地保证 第二层 第二层 权益证明 权益证明 工作量证明 工作量证明 可再生能源证书 可再生能源证书 可再生能源 可再生能源 可变可再生能源 可变可再生能源

参考文献

[1] M. Platt、J. Sedlmeir、D. Platt、J. Xu、P. Tasca、N. Vadgama 和 J. I. Ibanez，《超越工作量证明的区块链共识机制能源足迹》，《*2021*年第*21*届软件质量、可靠性与安全国际会议伴会论文集》（*QRS-C 2021*），第1135–1144页，2021年。doi：10.1109/QRS-C55045.2021.00168。[2] J. I. Ibañez 和 F. Rua，《权益证明系统的能源消耗：一项复现与扩展研究》，*Arxiv*，2023年。[3]J. I. Ibañez 和 A. Freier，《比特币能阻止气候变化吗？工作量证明、能源消耗与碳足迹（知识综述）》，*SSRN*电子期刊，2023年2月，issn：1556-5068。doi：10.2139/SSRN.4347220。[在线]。链接：https://papers.ssrn.com/abstract=4347220。

[4] A. Freier 和 J. I. Ibañez，《比特币挖矿作为风能发电的稳定器：德国案例研究》，即将发表，2023年。[5] T. Cross 和 A. M. Bailey，《通过激励抵消实现比特币绿色化》，2021年。 [在线]。链接：https://www.resistance.money/green/。[6] C. Martinez，《清洁比特币白皮书》，Clean Incentive，技术报告，2023年。 [在线]。链接：https://www.cleanincentive.com/。[7]SBP，《Sustainable Bitcoin Protocol 白皮书》，Sustainable Bitcoin Protocol，技术报告，2023年2月。[在线]。链接：https://www.sustainablebtc.org/news/sbp-white-paper。[8] T. Cross，没有任何碳核算体系能够满足以下*3*项约束，2023年3月。 [在线]。链接：https://twitter.com/thetrocro/status/1634634326116831233。[9] G. J. X. Dance，《比特币数字竞赛的现实成本》，2023年4月。 [在线]。链接：https://www.nytimes.com/2023/04/09/business/bitcoin-mining-elect

[10] S. P. Holland、M. J. Kotchen、E. T. Mansur 和 A. J. Yates，“为什么美国电力的边际 CO2 排放并未减少：估算及其对气候政策的启示”，美国国家科学院院刊，第 119 卷，第 8 期，e2116632119，2022 年 2 月，ISSN：10916490。doi：10.1073/PNAS.2116632119/SUPPL{_}FILE/PNAS.2116632119.SA

[在线]。可访问：https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.211

[11] N. A. Ryan、J. X. Johnson 和 G. A. Keoleian，《用于计算电网电力排放的模型与方法比较评估》，环境科学与技术，第 50 卷，第 17 期，第 8937–8953 页，2016 年 9 月，ISSN：15205851。doi：10.1021/ACS.EST.5B05216/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES-2015-

[在线]。可访问：https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.5b0

[12] M. Paez 和 T. Cross，*RFI* 回复：数字资产的气候影响——比特币与能源转型，2022 年。 [在线]。链接：https://global-uploads.webflow.com/61d2416d1d63f07ecbfd010c/62

[13]S. Imran，比特币挖矿的正外部性，2018 年 8 月。[在线]。链接：https://drive.google.com/file/d/1dB0aDo__nzhNM8toHclhk9qfFNEN

[14] CCRI，“Polygon区块链的能源效率和碳足迹”，加密碳评级研究所，技术报告，2022年8月。[15] WBD，比特币挖矿能拯救环境吗？与*Troy Cross*对谈，2022年2月。 [在线]。可访问：https://www.whatbitcoindid.com/wbd463-troy-cross。[16] T. Cross，更好的碳核算方式是将因追求区块补贴而产生的碳排放分摊给持有者，因为这正是激励其产生的因素；并将因交易激励而产生的碳排放分摊给各笔交易，2022年7月。[在线]。可访问：https://twitter.com/thetrocro/status/1544593741637267457。

[17] Joule，第4卷，第6期，第1211–1216页，2020年6月，issn：2542-4351。doi：10.1016/j.joule.2020.05.006。[18] Green Bitcoin，“Green Bitcoin”。[在线]。可访问：https://greenbitcoin.io/。[19] Bitcoin Clean Up，“Bitcoin Clean Up”。[在线]。可访问：https://bitcoincleanup.com/。[20] Forbes，“Kevin O’Leary Doubles Down On Green Bitcoin”。[在线]。可访问：https://www.forbes.com/sites/kashmirhill/2013/11/13/sanitizing-bitcoin-coin-validation/?sh=48b2bb124e0f。[21] A. Back，*Coin Validation*。[在线]。可访问：http://bitcoinism.blogspot.com/2013/11/is-it-time-to-boycott-all-us-bitcoin.html。[22] M. del Castillo，*Bitfury进军比特币犯罪打击业务*，2018年1月。[在线]。可访问：https://www.coindesk.com/markets/2018/01/30/bitfury-enters-bitcoin-crime-fighting-business/。[23] D. Kuhn，“绿色比特币”的神话与现实，2021年4月。[在线]。可访问：https://www.coindesk.com/business/2021/04/01/the-myths-and-realities-of-green-bitcoin/。[24] F. Harvey，“漂绿还是实现净零的必要之举？气候科学家谈碳抵消，2023年6月。[在线]。可访问：https://www.theguardian.com/environment/2023/jun/18/greenwashing-or-net-zero-necessity-climate-scientists-on-carbon-offsetting-a。[25] K. Raji，碳抵消是否属于漂绿？2022年4月。[在线]。可访问：https://www.greenpeace.org.uk/news/golden-age-of-greenwash/。[26] S. Gelmini，我们正生活在漂绿的黄金时代，2021年6月。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/s41612-018-0026-8。[27] K. Anderson，《碳抵消令人不便的真相》，《自然》2012 484:7392，第484卷，第7392期，第7–7页，2012年4月，issn：1476-4687。doi：10.1038/484007a。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/484007a。[28] M. W. Wara 和 D. G. Victor，《关于国际碳抵消的现实政策》，工作论文第74号，2008年。[在线]。可访问：http://pesd.stanford.edu。[29] M. R. Allen、K. P. Shine、J. S. Fuglestvedt、R. J. Millar、M. Cain、D. J. Frame 和 A. H. Macey，《解决雄心勃勃的减缓措施下对短寿命气候污染物二氧化碳当量排放的误述问题》，《npj气候与大气科学》2018 1:1，第1卷，第1期，第1–8页，2018年6月，issn：2397-3722。doi：10.1038/s41612-018-0026-8。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/s41612-018-0026-8。[30] D. Cushing、J. Brice、J. Lorimer 和 T. Garnett，《当你向一颗（GWP）星星许愿：全球变暖指标的环境治理与反身表演性》，https://doi.org/10.1177/03063127221134275，第030 631 272 211 342页，2022年11月，issn：0306-3127。

doi：10.1177/03063127221134275。[31] S. Gürçam，《航空业应对气候危机的新自由主义悖论：碳抵消与减排》，Selçuk GÜRÇAM《航空业应对气候危机的新自由主义悖论：碳抵消与减排》，issn：2148-9173。doi：10.30897/ijege.1083921。[32] J. A. F. Castellanos、D. Coll-Mayor 和 J. A. Notholt，《加密货币作为账户地保证：使用以太坊区块链模拟绿色证书市场》，2017年第5届IEEE智能能源电网工程国际会议，SEGE 2017，第367–372页，2017年9月。doi：10.1109/SEGE.2017.8052827。[33] A. Bjørn、S. M. Lloyd、M. Brander 和 H. D. Matthews，《可再生能源证书威胁企业科学碳目标的完整性》，《自然气候变化》2022 12:6，第12卷，第6期，第539–546页，2022年6月，issn：1758-6798。doi：10.1038/s41558-022-01379-5。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/s41558-022-01379-5。[34] M. Brander、M. Gillenwater 和 F. Ascui，《创造性会计：对用于报告外购电力（范围2）排放的市场法的批判性视角》，《能源政策》，第112卷，第29–33页，2018年1月，issn：0301-4215。doi：10.1016/J.ENPOL.2017.09.051。[35] M. Gillenwater、X. Lu 和 M. Fischlein，《风能投资的附加性[25] K. Raji，碳抵消是否属于漂绿？2022年4月。[在线]。可访问：自愿绿色电力市场》，《可再生能源》，第63卷，第452–457页，2014年3月，issn：0960-1481。doi：[26]S. Gelmini，我们正生活在漂绿的黄金时代，2021年6月。[在线]。可访问：10.1016/J.RENENE.2013.10.003。[36]N. Gautam，问题重重的企业清洁能源信用采购威胁净零[27] K. Anderson，《碳抵消令人不便的真相》，《自然》2012 484:7392，第484卷，第7392期，第7–7页，2012年4月，issn：1476-4687。doi：10.1038/484007a。[在线]。可访问：目标，2021年5月。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/484007a。[28] M. W. Wara 和 D. G. Victor，《关于国际碳抵消的现实政策》，工作论文第74号，2008年。[在线]。可访问：http://pesd.stanford.edu。[29] M. R. Allen、K. P. Shine、J. S. Fuglestvedt、R. J. Millar、M. Cain、D. J. Frame 和 A. H. Macey，《解决雄心勃勃的减缓措施下对短寿命气候污染物二氧化碳当量排放的误述问题》，《npj气候与大气科学》2018 1:1，第1卷，第1期，第1–8页，2018年6月，issn：2397-3722。doi：10.1038/s41612-018-0026-8。[在线]。可访问：https://www.nature.com/articles/s41612-018-0026-8。[30] D. Cushing、J. Brice、J. Lorimer 和 T. Garnett，《当你向一颗（GWP）星星许愿：全球变暖指标的环境治理与反身表演性》，https://doi.org/10.1177/03063127221134275，第030 631 272 211 342页，2022年11月，issn：0306-3127。

[37] CDSB，《*Scope4*：我们是否需要新增一个排放类别，以更好地推动企业气候行动？2020年1月。[在线]。可访问：https://www.cdsb.net/blog/corporate-reporting/1005/scope-4-do-we

[38] PwC，《*“Scope4”*来了——避免排放成为衡量气候影响的新方式，2022年6月。[在线]。可访问：https://www.pwccn.com/en/industries/private-equity/responsible-inv