



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

一层薄而半熔融的初生地壳：一个以撞击而非内部热量为主导的冥古宙模型

地球的第一个冥古宙几乎没有留下岩石记录。这项建模研究询问，一旦停止忽略撞击，地壳会是什么样子。作者使用随机递减撞击通量模型和地壳与地幔热流的基准模拟，发现撞击热量在冥古宙大部分时间里至少超过地球全部内部热量一个数量级，留下薄（约 5 公里以下）且在几公里深处部分熔融的地壳——他们认为这太脆弱了，无法支持板块构造，并且倾向于自我循环回地幔，这也解释了为什么冥古宙物质几乎无一幸存。随着撞击在约 39 亿年前减弱，持续的大陆地壳才能形成，恰与最古老的长英质岩石出现的时机一致——用作者谨慎的话说，「很可能不是巧合」。由于刻意使用了保守的下界加热值，定性结果是稳健的，即使精确数字未定。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: [10.1126/science.aeb5402](https://doi.org/10.1126/science.aeb5402)

地球故事中几乎没有留下几页的章节

地球是我们已知唯一拥有大陆的行星——我们所有人生活的、具有浮力且富含硅的陆地。然而，大陆最初是如何形成的，是地质学中最古老的未解问题之一，原因也极其残酷：证据几乎全部消失了。

地球的第一个宙——冥古宙——从行星诞生一直延续到约 40.3 亿年前（Ga）。在最初的 5 亿年里，几乎没有任何东西保存下来。最古老的完整长英质（大陆型）岩石约有 40.3 亿年。少数罕见的玄武质岩石可追溯到约 42 亿年前。任何种类中最古老的物质，是一批散落的锆石晶体——其中最著名的是来自西澳大利亚杰克山的锆石——其年代为 44 亿年。这就是地球幼年期的全部档案：少数几个地点，以及一些砂粒大小的矿物。

这项研究没有给这份档案增添一块新岩石。它做的是另一件事：根据相关物理条件，建立一个冥古宙地壳形态的物理模型，并提出一个大多数早期地球模型都忽略的问题：如果不再忽视早期地球一直遭受的撞击轰炸，会发生什么？

作者得出的答案十分惊人。在冥古宙的大部分时期，撞击带来的热量会压倒地球全部内部热量，使地壳保持薄且处于半熔融状态——他们认为，这种地壳太弱，不可能形成类似现代板块构造的系统。这是一个模型，不是记忆。但这是一个难得尝试将它所描述的那个时代的暴烈程度纳入考量的模型。

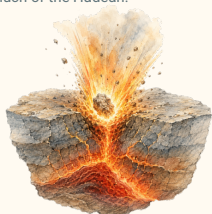
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

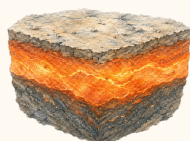
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

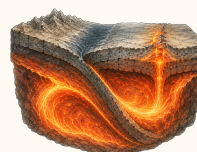
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

撞击热主导着模型的能量收支，浅部薄弱的熔融地壳不断自我再循环，而持久的大陆地壳直到约 4.0–3.9 Ga 的过渡期才出现。这是冥古宙的模型，而不是对冥古宙的直接记忆。

作者做了什么

研究团队把通常彼此分开的三个要素结合起来。

第一，**撞击通量的随机模型**——小行星和更大天体在冥古宙及早太古宙期间撞击内太阳系的持续过程。关键在于，这不是过去那种单次“晚期重轰炸”的峰值假说，而是一种早期强、**随时间减弱**的通量，大型撞击以随机（随机过程）的方式发生，而不是按时间表到来。该模型根据月球和内太阳系的撞击统计数据重新标定，并被选择为与锆石年龄谱和现有古地磁证据相一致。

第二，**地球动力学模拟**，用于研究热量如何穿过地壳和上地幔。研究人员使用经过基准测试的格子玻尔兹曼代码（Planet_LB），既运行简单的一维温度—深度计算，也运行 41 亿年前地幔完整二维对流状态的快照。这些模拟包含通常的内部热源——放射性衰变和地核热量——以及尤其重要的**岩浆平流**：由上升熔体向上传输的热量，而大多数地壳热模型都忽略了这一点。

第三，**相平衡建模**，针对一种真实的早期地壳——来自努武瓦吉图克绿岩带的含水冥古宙变玄武岩——计算这类岩石在何种温度和深度下会开始熔融。

有一个方法选择会影响你如何理解整篇论文：作者有意让自己的结论处于不利条件下。他们假设地幔是“非球粒陨石型”的（即所含产热放射性物质少于球粒陨石参照值），内部加热量不到标准模型的一半，采用保守的加热速率，并忽略年轻且距离很近的月球所产生的潮汐加热。这意味着他们计算出的地壳温度是**最小值**——下限。如果说有什么不同，那就是现实中的冥古宙比模型中的更热。

他们发现了什么

主导冥古宙能量收支的是撞击，而不是内部热量。将撞击热随时间积分后，其数值远超内部热量的贡献——在冥古宙大部分时期至少高出一个数量级。在这一图景中，驱动早期构造活动的主要引擎是撞击加热，而不是放射性衰变；直到约 **3.9 Ga** 之后，它才逐渐退居次要地位。

这些热量使地壳保持薄且处于浅部熔融状态。如果不考虑撞击和熔体平流，模型显示冥古宙地壳只有在约 10–15 km 以下才会部分熔融。加入撞击热后，熔融带大幅上移：地壳在**几公里**深处就开始部分熔融（约 2–5 km 以下）。在约 5 km 深度处，模型预测熔体比例超过 30%——在这种状态下，岩石太弱，无法像刚性板块那样保持完整。在 5–10 km 深处，约 1000–1100°C 的温度意味着不论成分如何，地壳都已广泛熔融。能够保存下来的固态地壳应当是**薄的，不到约 5 km**。

半熔融地壳会抹去自身。广泛熔融会使致密、富铁和富镁的物质下沉并分离，而较轻、富硅的熔体上升。随着时间推移，这会使地壳平均成分趋向更演化、更富硅的状态，并产生能够结晶形成锆石的长英质熔体。随后，这层薄地壳几乎全部会被再循环回对流地幔中，这与化学（同位素）记录相一致。在该模型中，冥古宙岩石近乎完全缺失并不是记录中的空白——而是一个预测结果。42 亿年前的岩石和 44 亿年前的锆石，是这层地壳形成得快、毁灭得也快之后留下的罕见幸存者。

轰炸结束的时间与最早的持久大陆相吻合。随着轰炸在 4.0–3.9 Ga 过渡期逐渐减弱，地壳终于能够增厚并保存下来。最古老的幸存大陆岩石也大约在同一过渡期出现。作者谨慎地表述道：持久大陆地壳在这一时期出现“很可能并非巧合”。

他们的核心推断是：在这些条件下——地壳很薄，并且在几公里深处就已熔融——**冥古宙板块构造不太**

可信。

他们还说明了为什么早期研究会得出相反结论。此前关于随机撞击的研究发现其影响很小，任何时刻熔融的地壳都不到 2.5%。那些研究遗漏了本文纳入的两点：大型撞击对地幔深部熔融的全球效应，以及上升岩浆对这些热量的向上传输。将这两点加回去，热学图景便发生了剧烈变化。

为什么模型不是记忆

上面的一切都是模拟的输出，而不是从冥古宙岩石中读取的结果——因为那些岩石几乎已经全部不存在了。这并不会使结果变得薄弱，但它确实限定了这是什么类型的结果。

这条推理链是这样的：撞击通量的一个模型，为地幔和地壳热流的一个模型提供输入；后者再与某种特定岩石如何熔融的一个模型相互检验。每个环节都有物理依据，并且在可能的情况下经过基准测试——但整体仍是一个关于在合理物理条件下冥古宙必然呈现何种面貌的连贯论证，而不是对它实际面貌的测量。

这正是作者的保守假设比表面上看起来更重要的原因。因为他们选择了加热下限，却仍然得到一个普遍熔融的浅部地壳，所以定性结论——冥古宙地壳很热且很弱——对这些选择是稳健的。但这项研究没有确定精确数值：准确的地温梯度、准确的熔体比例、准确的地壳厚度。应当把结果的方向视为有力，把小数点后的数值视为暂定。

这项研究没有证明什么

- 它**没有**直接观测冥古宙地壳。这个时代几乎没有岩石留下；这是一个关于物理学意味着什么的建模结果，而不是测量结果。
- 它**不以**“晚期重轰炸”为基础。所使用的撞击通量是一个逐渐减弱的随机通量——模型不需要、也没有引入突然出现的轰炸峰值。
- 它**没有**解决板块构造争论。这里的“不太可信”是一个有力且具有物理依据的推断，倾向于认为早期地球拥有炽热的停滞盖或软盖；但冥古宙的构造模式仍然存在真正的争议。
- 它**没有**证明撞击导致大陆在 4.0–3.9 Ga 过渡期出现。时间上的吻合是一个很强的关联，作者自己称其“很可能并非巧合”——这是对有说服力的相关性的谨慎措辞，不是已经证实的因果关系。
- 杰克山锆石**不是**保存下来的大陆。它们是少量幸存的颗粒，表明早期已经存在长英质物质和水；该模型的核心恰恰是，形成它们的地壳大多都被再循环带走了。
- 它**没有**重建完整的早期地球历史。这些模拟是理想化的——撞击被限制在赤道附近，以一维剖面 and 二维赤道切片的快照呈现——并不是行星完整的四维模型。

证据有多强？

就其核心主张——撞击加热是控制冥古宙地壳的一级因素，使地壳保持薄且在浅部熔融——而言，这一论证是连贯的，而且在一个重要意义上是保守的。它使用了经过基准测试的地球动力学代码、物理上

合理的输入，以及下限假设；同时还纳入了一个大多数先前模型干脆忽略的热源。它的可信度还来自于能够同时解释两个顽固事实：为什么约 40 亿年前更古老的岩石几乎都没有保存下来（近乎完全的再循环），以及为什么持久地壳恰好在轰炸减弱时出现。



NASA 的 ASTER 仪器拍摄的西澳大利亚杰克山。这个地区的锆石包含一些已知最古老的早期地壳幸存物质，是来自一个岩石大多已被抹除的宇宙的微小线索。

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

局限同样清楚，而且是所有深时模型的局限：这是建立在模型之上的模型，以极其稀疏的岩石记录为锚点；其中最常被引用的结论——“板块构造不太可信”——是一个推断，而不是观测。正确的态度，是把它视为一个有力、推理严密、重新诠释冥古宙的假说，并认为它现在邀请其他人检验其假设——尤其是撞击通量模型的选择——而不是把它当作已经盖棺定论的结论。

最有用的总结既不是“冥古宙就是这样”，也不是“这只是一场模拟”。而是：在合理且保守的物理条件下，一个遭受强烈轰炸的早期地球会拥有薄的、半熔融且不断自我再循环的地壳——而这一单一想法，解释了我们实际上所能看到的少量证据中令人惊讶的一大部分。

为什么这很重要

大众想象中的早期地球往往在两个极端之间摆动：一个几乎像今天一样平静、具有板块构造的水世界，或者一颗地狱般的熔岩行星。这项研究描绘了一个具体且有物理依据的中间状态：地壳很薄，从几公里深处开始反复重新熔融，不断被摧毁又重建；决定一切条件的是撞击，而不是内部热量。

这种重新诠释确实发挥了作用。它为地球幼年期的两个最大事实——岩石记录近乎完全缺失，以及最初持久大陆出现的时间——提供了同一个机制，并把一个通常被忽视的过程，即撞击加热，置于故事的中心。如果这一框架经得住检验，它将改变我们推断地球究竟何时成为拥有稳定大陆的行星的方式，也适用于其他在各自轰炸环境中形成的岩质世界。

这些都不要求该模型成为最终结论。它只需是一个足够好的、可以接受检验的假说；而通过将自身与幸存的锆石和同位素记录联系起来，它确实达到了这一点。标题中的“隐藏的冥古宙”正是要点：这是一个我们大多只能通过建模触及的时代，因为这个时代抹去了自己的证据。

简明总结

地球的第一个宙——冥古宙（约 40.3 Ga 之前）——几乎没有留下岩石记录。这项建模研究询问：如果加入一个通常被遗漏的热源——撞击，地壳会是什么样？作者将随机、逐渐减弱的撞击通量模型，与经过基准测试的一维和二维地壳及地幔热流模拟结合起来（包括上升熔体携带的热量），发现对冥古宙大部分时期进行时间积分后，撞击热量至少超过地球全部内部热量一个数量级。其后果是：地壳很薄（不到约 5 km），在几公里深处就发生部分熔融；在约 5 km 深度处，熔融比例超过 30%——太弱，无法维持板块构造，因此作者认为冥古宙板块构造不太可信。这样的地壳大部分会再循环回地幔，这可以解释为什么如此少的冥古宙物质得以保存；随着撞击在 4.0–3.9 Ga 过渡期减弱，持久大陆地壳得以形成，时间上恰好接近最古老的幸存长英质岩石出现之时——“很可能并非巧合”。由于作者有意采用了保守的加热下限，定性结果是稳健的，尽管精确数值并未确定。这是一个关于地球幼年期有力且连贯的模型——而不是对它的直接观测。

不绕弯检查

论文展示了什么：在纳入撞击加热和岩浆热输运的、具有物理依据的模拟中，冥古宙地壳呈现出薄且在几公里深处就部分熔融的状态；撞击热而非内部热量占据主导；地壳大部分再循环回地幔；并且在这一模型中，它无法支撑板块构造。

合理但尚未证实的内容：撞击是持久大陆在约 3.9 Ga 出现的原因；冥古宙是一个停滞盖或软盖世界，而不是早期板块构造世界；几乎没有冥古宙岩石保存下来，具体是因为熔融地壳发生了再循环。

它没有展示什么：对冥古宙地壳的直接测量；对板块构造争论的定论；轰炸减弱与最初大陆之间已得到证明的因果联系；杰克山锆石代表保存下来的大陆；早期行星的完整模型。

主要局限：冥古宙岩石记录几乎不存在，因此结果是一个受极少数据约束的模型；它是层层叠加的模型（撞击通量 → 地球动力学 → 相平衡）；撞击通量本身是一个具有代表性但不确定的选择；模拟是理

想化的（包含一维和二维赤道切片，以及时间上的快照）。保守的下限假设增强了定性结论，但并不会使具体地温梯度变得精确。

普通读者应当有多大信心？ 可以高度确信的是：在合理物理条件下，一个遭受猛烈轰炸的早期地球会拥有炽热、薄且在浅部熔融的地壳。可以中等程度地确信：这使冥古宙板块构造不太可能，并解释了岩石记录为何缺失。对于任何声称这证明了大陆如何形成或确切何时形成的说法，信心应当较低——这是一个重新诠释冥古宙的有力、保守模型，而不是对冥古宙的直接观察。

来源

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
<https://doi.org/10.1126/science.aeb5402>