



The CLEAN PAPER

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

一次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
· 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)

地球故事中几乎不剩书页的那一章

地球是我们已知唯一拥有大陆的星球——我们赖以生存的浮力富硅陆地。然而，大陆最初是如何形成的，是地质学中最古老的未解之谜之一，原因很残酷：证据几乎完全消失了。

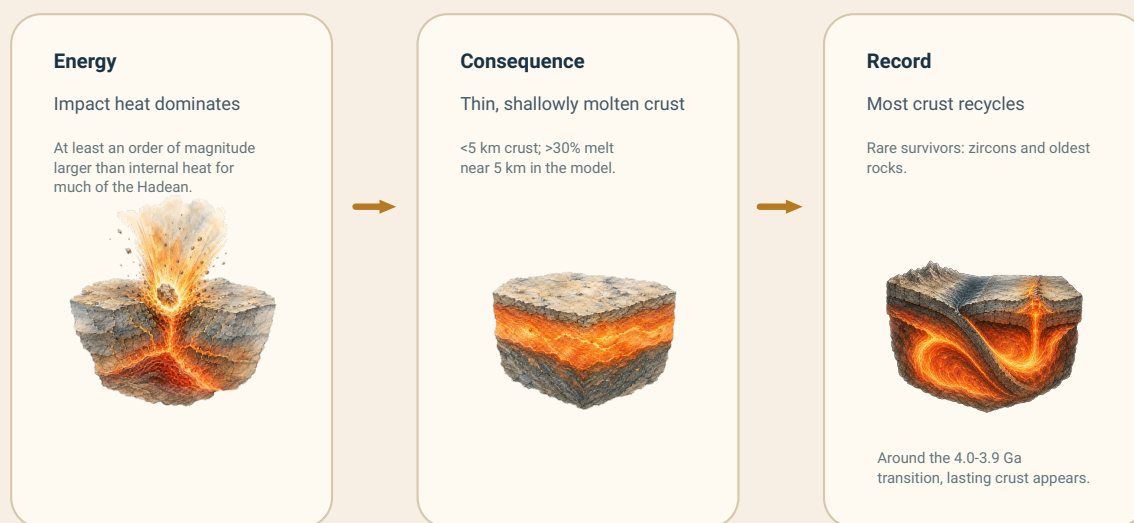
地球的第一个冥古宙，从行星诞生一直持续到约 40.3 亿年前。在那最初的五亿年里，几乎没有任何东西幸存。最古老的完整长英质（大陆型）岩石距今约 40.3 亿年。少数稀有的玄武岩可达约 42 亿年。任何种类的最古老物质，是一把锆石晶体——最著名的是来自西澳大利亚杰克山的那些——定年在 44 亿年。这就是地球婴儿期的全部档案：几个地点和一些沙粒大小的矿物。

这项研究并没有为那个档案增添一块新岩石。它做了一件不同的事：它构建了一个物理模型，描述在那种物理学下冥古宙地壳会是什么样子，并提出了一个大多数早期地球模型忽略的问题。当你不再忽略早期地球正在遭受轰炸这一事实时，会发生什么？

作者得出的答案引人注目。在冥古宙的大部分时间里，撞击传递的热量会淹没地球所有的内部热量，使地壳变得薄而半熔融——他们认为它太脆弱了，无法支持任何类似现代板块构造的东西。这是一个模型，不是一段记忆。但这是一个，终于尝试解释它所描述的时代的那份暴力的模型。

A model of the Hadean, not a memory of it

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



撞击热量主导了模型的能量预算，薄而浅层熔融的地壳自我循环，持续的大陆地壳仅在大约 40–39 亿年的过渡期才出现。这是冥古宙的一个模型，而非对它的直接记忆。

作者做了什么

团队组合了三个通常被分开使用的要素。

第一，一个**撞击通量的随机模型**——在冥古宙和早太古代袭击内太阳系的小行星和更大天体的雨。关键的是，这不是旧的“晚期大轰炸”尖峰概念。这是一个早期密集并**随时间衰减**的通量，大型撞击随机（随机地）到达，而不是按时间表。该模型由月球和内太阳系撞击统计数据重新标定，并选择与锆石年龄谱和可获得的古地磁证据一致。

第二，关于热量如何通过地壳和上地幔传输的**地球动力学模拟**。他们使用了一个经过基准测试的格子玻尔兹曼代码（Planet_LB），既运行了简单的一维温度对深度的计算，也运行了 41 亿年前地幔的完整二维对流快照。这些包括普通的内部热源——放射性衰变和来自地核的热量——以及重要的**岩浆平流**：由上升熔体携带向上的热量，这是大多数地壳热模型遗漏的因素。

第三，对现实早期地壳的**相平衡建模**——一个来自 Nuvvuagittuq 绿岩带的水化冥古宙变玄武岩——以计算出这种岩石在什么温度和深度下会开始熔融。

有一个方法学选择影响着你怎么阅读整篇论文：作者刻意将牌堆向不利于他们自己结论的方向倾斜。他们假设了一个“非球粒陨石”地幔（比球粒陨石参考值含有更少产热放射性物质的地幔），其内部加热不到标准模型的一半，使用了保守的加热率，并且忽略了来自年轻、近距离月球的潮汐加热。这意味着他们计算的地壳温度是**最小值**——下界。如果有什么不同的话，真实的冥古宙比他们模拟的更热。

他们发现了什么

撞击，而非内部热量，主导了冥古宙的能量预算。当撞击热量在时间上积分时，它使内部贡献相形见绌——在冥古宙的大部分时间里至少高出一个数量级。在这幅图景中，撞击加热而非放射性衰变，是驱动早期构造活动的主要引擎，而且它无处不在，融化着任何暴露的东西。

没有放射性庇护所。因为撞击热量袭击地表，它集中在最上面几十公里处——恰好是地壳所在。放射性加热虽然小得多，但分布在整個地幔深处。上面的热量极多，下面的热量极少且分布广泛。脆弱的矿藏无处可藏。

薄而浅层熔融的地壳。在撞击主导的模型运行中，地壳非常薄——可能不到约 5 公里——并在其底部几公里处部分熔融。在约 5 公里深度处，熔体分数超过 30%，使地壳在机械上变得脆弱。受撞击加热的浅层被锁定在一个循环中：熔融，重新混合回地幔，然后重新出现。这将解释为什么没有冥古宙岩石幸存：不是它们从未存在过，而是它们不断被抹除。

持久的大陆地壳在撞击减弱时出现。只有当撞击在约 40–39 亿年的过渡期减弱时，足够厚、足够浮力的地壳才能持续存在而不被重新混合。这种持久的大陆地壳恰在最古老的长英质岩石开始出现的同一个窗口中形成——作者指出这“很可能不是巧合”。

板块构造不太可能发生。在如此薄且浅层熔融的地壳中，该模型表明冥古宙板块构造是“不可行的”。这并不意味着板块构造从未在其他时间发生过，或在地球历史的更晚阶段没有启动——但它排除了冥古宙是板块构造的。

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读取的测量——因为这些岩石几乎全部已不复存在。这并不使结果变弱，但它确定了这是哪一类型的结果。

链条是这样的：一个撞击通量模型馈入一个地幔和地壳热流的模型，再与一个关于特定岩石如何熔融的模型进行校验。每个环节在物理上都有动机，并且在可能的情况下都经过了基准测试——但整体是一个关于冥古宙必定是什么样子的自洽论证，基于合理的物理学，而不是对冥古宙实际是什么样子的测量。

这就是为什么作者的保守假设比它们看起来更为重要。因为他们选择了下界加热值，并忽略了潮汐加热，却仍然得到了普遍熔融的浅层地壳，所以定性结论——冥古宙地壳是热的、弱的——对他们的选择是稳健的。而不被此项研究所确定的是精确的数字：确切的地温梯度、确切的熔融分数、确切的地壳厚度。将结果的方向视为强有力的，将小数点后的数字视为暂时性的。

这没有证明什么

- 它**没有**直接观察冥古宙地壳。几乎没有来自这个时代的岩石；这是一个关于物理学暗示了什么的结果，而不是一次测量。
- 它**没有**依赖于“晚期大轰炸”。所使用的撞击通量是递减的、随机的——模型不需要，也不调用，一次突然的轰炸尖峰。
- 它**没有**解决板块构造的辩论。“不可行”在这里是一个强有力的、物理上扎根的推论，倾向于一个热的、停滞盖或软盖的早期地球——但冥古宙的构造模式仍然真正存在争议。
- 它**没有**证明撞击导致了大陆在约 40–39 亿年过渡期出现。时间上的匹配是一个强有力的关联，作者自己称之为“很可能不是巧合”——这是对一个引人注目的相关性的谨慎措辞，而不是一个被证明的原因。
- 杰克山锆石**不是**被保存的大陆。它们是稀有的幸存颗粒，表明长英质物质和水存在得很早；该模型的全部要点是，制造了它们的地壳大部分被循环回收了。
- 它**没有**重建早期地球的完整历史。模拟是理想化的——一维剖面 and 二维赤道切片，撞击限制在赤道附近，以快照形式捕捉——而不是一个完整的行星四维模型。

证据有多强

对于其核心主张——撞击加热是冥古宙地壳的一阶控制因素，使其保持薄且浅层熔融——该论证是自洽的，并且在一个重要的意义上，是保守的。它使用了一个经过基准测试的地球动力学代码、物理上合理的输入和下界假设，并整合了一个大多数先前模型直接忽略的热源。它还通过同时解释两个顽固的事实赢得了可信度：为什么几乎没有比约 40 亿年更古老的岩石幸存（近乎完全的循环），以及为什么持久的地壳恰在轰炸消退时出现。



杰克山，西澳大利亚，由 NASA 的 ASTER 仪器拍摄。来自该地区的锆石包括一些已知最古老的地球早期地壳幸存物质，是一个岩石大部分被抹去的冥古宙留下的微小线索。

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

其局限同样清晰，它们在任何深时模型的局限：它是模型叠在模型之上，锚定在一个非常稀疏的岩石记录上，而其最可引用的结论——“板块构造是不可行的”——是一个推论，而非一个观察。正确的姿态是将其视为一个强有力的、推理良好的假设，它重新构建了冥古宙，并现在邀请其他人检验其假设——尤其是撞击通量模型的选择——而不是将其视为一个已结案的结果。

最有用的总结既不是“这就是冥古宙的样子”，也不是“它只是一个模拟”。而是：给定合理的、保守的物理学，一个处于重轰炸下的早期地球将拥有薄、半熔融、自我循环的地壳——而这一个想法就解释了我们实际能看到的少得惊人的事实。

为什么重要

早期地球的流行形象往往在两个极端之间摇摆：一个宁静的、板块构造的水世界，几乎像今天一样；或一个地狱般的熔岩行星。这项工作勾勒出一个具体的、物理上有动机的中间状态：一个地壳很薄且在几公里以下反复重新熔融的星球，不断被摧毁和重新制造，撞击——而非内部热量——设定了条件。

这种重新构建做了真正的工作。它为地球婴儿期的两个最大事实提供了一个机制——岩石记录的近乎完全缺失，以及第一个持久大陆出现的时机——并将一个通常被忽视的过程，撞击加热，置于故事的中心。如果它成立，它将改变我们对地球何时成为一个拥有稳定大陆的行星的推理方式，并将其带到那些在自身轰炸下形成的其他岩石世界上。

这一切都不要要求该模型是最终结论。它要求它是一个足够好的假设来检验——而通过将自己与幸存的锆石和同位素记录绑定，它确实是。标题中的“隐藏的冥古宙”正是重点：一个我们大多数只能通过建模来触及的时代，因为这个时代抹去了自己的证据。

简洁摘要

地球的第一个冥古宙（约 40.3 亿年前之前）几乎没有留下岩石记录。这项建模研究询问，一旦加入一个通常被忽略的热源——撞击——地壳会是什么样子。使用一个随机递减撞击通量模型，连同地壳和地幔热流的经过基准测试的一维和二维模拟（包括由上升熔体携带的热量），作者发现，时间积分的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。结果是一个薄地壳（约 5 公里以下），在几公里深处部分熔融，并且在约 5 公里深度处熔体超过 30%——太脆弱了，无法维持板块构造，作者称其在冥古宙不可行。这样的地壳大部分会循环回地幔，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 40–39 亿年过渡期减弱，持久的大陆地壳才能形成，恰与最古老的长英质岩石出现的时间一致——“很可能不是巧合”。由于作者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。这是一个关于地球婴儿期的强有力的、自洽的模型——而非对它的直接观察。

No-BS 检查

论文所展示的：在包含撞击加热和岩浆热运输的物理基础模拟中，冥古宙地壳呈现出薄且在几公里深处部分熔融，由撞击热量而非内部热量主导，大部分循环回地幔，并且——在此模型上——无法支持板块构造。

合理但未经证实的：撞击是持久大陆约在 39 亿年前出现的原因；冥古宙是一个停滞盖或软盖世界，而非早期板块构造世界；几乎没有冥古宙岩石幸存，具体是因为一个熔融的地壳自我循环了。

它没有展示的：对冥古宙地壳的直接测量；板块构造辩论的确定答案；轰炸消退与第一个大陆之间被证明的因果联系；杰克山锆石代表被保存的大陆；早期地球的完整模型。

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；它将模型叠在模型上（撞击通量 → 地球动力学 → 相平衡）；撞击通量本身是一个代表性的、不确定的选择；模拟是理想化的（一维和二维赤道切片，时间快照）。保守的下界假设加强了定性结论，但并未使具体的地温梯度变得精确。

普通读者应抱有多大信心？ 高度信心认为，在合理的物理学下，一个遭受重轰炸的早期地球将会有一个热、薄、浅层熔融的地壳。中等信心认为这使冥古宙板块构造不太可能，并解释了缺失的岩石记录。低信心认为这证明了大陆是如何形成的或确切何时——这是一个强有力的、保守的模型，它重新构建了冥古宙，而不是对它的一次直接观察。

来源

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