



## The CLEAN PAPER

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

# 一層薄而半熔融的初生地殼：一個以撞擊而非內部熱量為主導的冥古宙模型

地球的第一個冥古宙幾乎沒有留下岩石記錄。這項建模研究詢問，一旦停止忽略撞擊，地殼會是什麼樣子。作者使用隨機遞減撞擊通量模型和地殼與地幔熱流的基準模擬，發現撞擊熱量在冥古宙大部分時間裡至少超過地球全部內部熱量一個數量級，留下薄（約 5 公里以下）且在幾公里深處部分熔融的地殼——他們認為這太脆弱了，無法支持板塊構造，並且傾向於自我循環回地幔，這也解釋了為什麼冥古宙物質幾乎無一倖存。隨著撞擊在約 39 億年前減弱，持續的大陸地殼才能形成，恰與最古老的長英質岩石出現的時機一致——用作者謹慎的話說，「很可能不是巧合」。由於刻意使用了保守的下界加熱值，定性結果是穩健的，即使精確數字未定。

---

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)

# 地球故事中幾乎所剩無幾的一章

地球是我們所知唯一擁有大陸的行星——那是我們共同生活其上、具有浮力且富含矽的陸地。然而，大陸最初是如何形成的，卻是地質學中最古老的未解問題之一，原因非常殘酷：證據幾乎全都消失了。

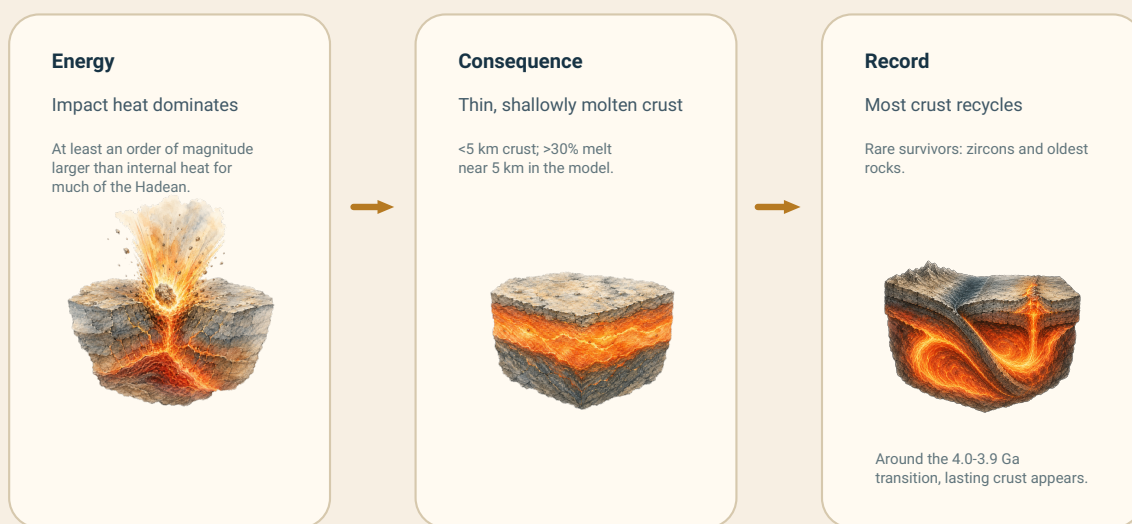
地球的第一個宙代——冥古宙——從行星誕生延續至約 40.3 億年前 (Ga)。在最初的五億年裡，幾乎沒有任何東西留存下來。最古老的完整長英質（大陸類型）岩石約為 4.03 Ga。少數罕見的玄武岩可追溯至約 4.2 Ga。任何種類中最古老的物質，是散落各處的鉛石晶體——其中最著名的來自西澳洲 Jack Hills——其年代測定為 4.4 Ga。這就是地球幼年期的全部檔案：少數幾個地點，以及一些沙粒大小的礦物。

這項研究沒有為那份檔案增添一塊新岩石。它做的是另一件事：根據相關物理條件，建立冥古宙地殼可能呈現的樣貌模型，並提出一個多數早期地球模型避而不談的問題。當你不再忽略早期地球正遭受猛烈撞擊時，會發生什麼事？

作者得到的答案令人震撼。在冥古宙的大部分時間裡，撞擊帶來的熱量會淹沒地球所有內部熱量，使地殼變得薄且呈半熔融狀態——他們認為，這樣的地殼太弱，不可能形成類似現代的板塊構造。這是模型，不是記憶。但它至少嘗試把所描述時代的暴力納入考量。

## A model of the Hadean, not a memory of it

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



撞擊熱主導模型的能量收支；一層薄的淺部熔融地殼會自我再循環，而持久的大陸地殼只在 4.0–3.9 Ga 的轉折期附近出現。這是冥古宙的模型，不是對那段歷史的直接記憶。

## 作者做了什麼

研究團隊結合了三項通常分開處理的要素。

第一，**撞擊通量的隨機模型**——描述冥古宙和早期太古宙期間，隕石與更大型天體撞擊內太陽系所形成的撞擊雨。關鍵在於，這不是過去那種單一「晚期重轟炸期」高峰的想法，而是早期強烈、**隨時間下降**的通量，大型撞擊以隨機方式到來，而不是按照時間表發生。這個模型依據月球與內太陽系的撞擊統計重新調整，並選擇使其與鉛石年齡光譜及現有古地磁證據一致。

第二，**地球動力學模擬**，用來描述熱量如何穿過地殼與上部地函。他們使用經過基準測試的格子玻爾茲曼程式碼（Planet\_LB），同時執行簡單的一維溫度對深度計算，以及 4.1 Ga 時地函完整的二維對流快照。這些模擬納入一般的內部熱源——放射性衰變與來自核心的熱量——以及重要的**岩漿熱輸運**：由上升熔體向上攜帶的熱量，而這一項多數地殼熱模型都省略了。

第三，**相平衡建模**，針對一種真實的早期地殼——來自 Nuvvuagittuq 綠岩帶、含水的冥古宙變玄武岩——計算這類岩石會在何種溫度與深度開始熔融。

有一項方法選擇會影響你如何閱讀整篇論文：作者刻意讓自己的結論處於不利條件。他們假設地函是「非球粒隕石型」（所含產熱放射性物質少於球粒隕石參考值），其內部加熱量不到標準模型的一半；他們採用保守的加熱速率，並忽略年輕且距離很近的月球所造成的潮汐加熱。這表示他們計算出的地殼溫度是**最小值**——下限。真實的冥古宙很可能比模型更熱。

## 他們發現了什麼

**主導冥古宙能量收支的是撞擊，而非內部熱量**。將撞擊熱隨時間積分後，它遠遠超過內部熱量的貢獻——在冥古宙大部分時間裡至少高出一個數量級。在這幅圖景中，驅動早期構造作用的主要引擎是撞擊加熱，而非放射性衰變；直到約 **3.9 Ga** 之後，它才逐漸退居次要地位。

**那股熱量讓地殼保持薄且呈淺部熔融狀態**。不計入撞擊與熔體熱輸運時，他們的模型顯示，冥古宙地殼只有在約 10–15 km 以下才會部分熔融。加入撞擊熱後，熔融帶大幅上升：地殼向下僅**幾公里處**（約 2–5 km 以下）就會部分熔融。在約 5 km 深處，模型預測熔體比例超過 30%——在這種狀態下，岩石太弱，無法作為剛性板塊維持完整。在 5–10 km 深處，約 1000–1100°C 的溫度意味著地殼幾乎不論成分為何，都會廣泛熔融。倖存的固態地殼應當會**很薄，厚度不到約 5 km**。

**半熔融地殼會抹除自身**。廣泛熔融會讓密度較高、富含鐵和鎂的物質下沉並分離出去，而較輕、富含矽的熔體則上升。隨時間推移，這會使地殼平均成分朝向更演化、富含矽的方向發展，並產生能結晶形成鉛石的長英質熔體。接著，這層薄地殼幾乎全都會再循環回到對流地函中，這與化學（同位素）記錄一致。在這個模型裡，冥古宙岩石近乎完全缺失並不是記錄中的空白——而是模型的預測。4.2 Ga 的岩石與 4.4 Ga 的鉛石，是一層在形成後幾乎立即便遭到摧毀的地殼中少數倖存者。

**轟炸的結束與第一批持久大陸相互吻合**。隨著轟炸在 4.0–3.9 Ga 的轉折期間減弱，地殼終於能夠增厚並持續存在。最古老的倖存大陸岩石也在同一轉折期附近出現。作者謹慎地寫道：持久的大陸地殼在這一時期出現「很可能不是巧合」。

他們的核心推論是：在這些條件下——地殼很薄，且向下幾公里處便熔融——**冥古宙板塊構造不太可**

能存在。

他們也說明了為何早期研究得出相反結論。先前針對隨機撞擊的研究只發現微小影響，任何時刻熔融的地殼都不到 2.5%。那些研究漏掉了本研究納入的兩件事：大型撞擊對地函深部熔融的全球效應，以及上升岩漿向上輸送那股熱量的作用。把這兩項加回來，熱學圖景便徹底改變。

## 為什麼模型不是記憶

上述一切都是模擬的輸出，不是從冥古宙岩石讀取的結果——因為那些岩石幾乎已不復存在。這不會使結果變得薄弱，但確實決定了它屬於哪一類結果。

整條推理鏈是這樣運作的：撞擊通量的模型餵給地函與地殼熱流的模型，再以某種特定岩石如何熔融的模型進行檢驗。每一個環節都有物理依據，而且在可能的情況下經過基準測試——但整體是一個關於在合理物理條件下冥古宙必然呈現何種樣貌的連貫論證，而不是對它實際樣貌的測量。

這就是為什麼作者的保守假設比表面上看來更重要。因為他們選擇了加熱下限，卻仍得到地殼廣泛熔融且熔融帶很淺的結果，所以定性結論——冥古宙地殼炎熱而脆弱——對其選擇具有穩健性。但這項研究**沒有**精確確定的是具體數值：準確的地溫曲線、準確的熔融比例、準確的地殼厚度。應把結果的方向視為強而有力，把小數點後的數字視為暫定。

## 這項研究沒有證明什麼

- 它**沒有**直接觀察冥古宙地殼。這個時代幾乎沒有岩石留存；這是根據物理條件推導出的模型結果，而不是測量。
- 它**不是**建立在「晚期重轟炸期」之上。所使用的撞擊通量會下降且具有隨機性——模型不需要、也沒有假設突然出現的轟炸高峰。
- 它**沒有**解決板塊構造爭論。這裡的「不太可能」是一項強而有物理依據、支持炎熱且具有停滯或柔軟岩石圈的早期地球的推論，但冥古宙的構造模式仍確實存在爭議。
- 它**沒有**證明撞擊導致大陸在 4.0–3.9 Ga 左右出現。時間上的吻合是很強的關聯，作者自己也稱其「很可能不是巧合」——這是對令人信服的相關性所使用的謹慎措辭，不是已證實的因果關係。
- Jack Hills 的鋯石**不是**保存下來的大陸。它們是少數倖存的晶粒，顯示早期曾存在長英質物質與水；這個模型的全部重點正在於，形成它們的那層地殼大多已被再循環帶走。
- 它**沒有**重建早期地球的完整歷史。模擬是理想化的——一維剖面與二維赤道切片，撞擊局限在赤道附近，並以快照形式呈現——不是行星的完整四維模型。

## 證據有多強？

就其核心主張——撞擊加熱是控制冥古宙地殼的一階因素，使地殼保持薄且在淺部熔融——而言，這套論證是連貫的，而且在重要意義上採取了保守立場。它使用經過基準測試的地球動力學程式碼、物

理上合理的輸入，以及下限假設；還納入了一個多數過往模型直接忽略的熱源。它也因同時解釋兩個棘手事實而取得可信度：為什麼約 4 Ga 以前的岩石幾乎沒有留存（接近完全再循環），以及為什麼持久地殼恰好在轟炸減弱時出現。



NASA ASTER 儀器所拍攝的西澳洲 Jack Hills。這個地區的鑽石包括一些地球早期地殼中已知最古老的倖存物質，是來自岩石大多已被抹除之宙代的微小線索。

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

限制同樣清楚，而這些也是任何深時模型的限制：這是建立在模型之上的模型，以極其稀疏的岩石記錄為錨定；其中最適合引用的結論——「板塊構造不太可能存在」——是推論，不是觀察。正確的態度，是把它視為一個強而有理、重新框定冥古宙的假說，並且現在邀請其他人檢驗其假設——尤其是撞擊通量模型的選擇——而不是把它視為已經定案。

最有用的總結既不是「冥古宙就是這個樣子」，也不是「那只是一場模擬」。應該這樣說：在合理且保守的物理條件下，一個遭受猛烈轟炸的早期地球，會擁有一層薄、半熔融且自我再循環的地殼——而這個單一想法，便能解釋我們實際能看到的少量證據中令人意外的很大一部分。

# 為什麼重要

人們對早期地球的流行想像，往往在兩個極端之間擺盪：一個幾乎像今天一樣祥和、具有板塊構造的水世界，或是一顆地獄般的熔岩行星。這項研究勾勒出一個具體、由物理驅動的中間情境：地殼很薄，從向下幾公里處便反覆再熔融，不斷被摧毀又重造；設定條件的不是內部熱量，而是撞擊。

這種重新框定確實發揮了作用。它為地球幼年期的兩個最大事實——岩石記錄幾乎完全缺失，以及第一批持久大陸出現的時間——提供了一種共同機制，也把一個通常遭到忽視的過程，即撞擊加熱，置於故事中心。如果這個模型經得起考驗，它會改變我們思考地球究竟何時成為一個擁有穩定大陸的行星的方式，也適用於其他在各自轟炸中形成的岩石行星。

這一切都不要求該模型成為最後定論；只要求它是一個值得檢驗、足夠好的假說——而且透過把自己與倖存的鋯石和同位素記錄連結起來，它確實做到了。標題中的「隱藏的冥古宙」正是重點：我們大多只能透過建模接觸這個時代，因為那個時代抹除了自己的證據。

## 重點摘要

地球的第一個宙代——冥古宙（約 4.03 Ga 之前）——幾乎沒有留下岩石記錄。這項建模研究提出一個問題：如果納入一個通常被忽略的熱源——撞擊，地殼會是什麼樣子？作者把隨機且下降的撞擊通量模型，與經過基準測試的地殼和地函熱流一維、二維模擬結合（包括上升熔體攜帶的熱量），發現對撞擊熱隨時間積分後，在冥古宙大部分時間裡至少會超過地球全部內部熱量一個數量級。其結果是一層薄地殼（不到 5 km），向下僅幾公里處便部分熔融；在約 5 km 深處，熔融比例超過 30%——地殼太弱，無法維持板塊構造，因此作者稱冥古宙的板塊構造不太可能存在。這樣的地殼大多會再循環回到地函，解釋為何幾乎沒有冥古宙物質留存；隨著撞擊在 4.0–3.9 Ga 的轉折期間減弱，持久的大陸地殼便可能形成，而最古老的倖存長英質岩石也在這一時期附近出現——「很可能不是巧合」。由於作者刻意採用保守的加熱下限，定性結果具有穩健性，儘管確切數字尚未確定。這是一個強而連貫的地球幼年期模型——不是對它的直接觀察。

## 不說場面話的檢驗

**論文顯示的內容：**在納入撞擊加熱與岩漿熱輸運、以物理為基礎的模擬中，冥古宙地殼呈現薄且向下僅幾公里處便部分熔融的狀態；撞擊熱而非內部熱量占主導；地殼大多再循環回到地函；而在這個模型中，它無法支撐板塊構造。

**合理但尚未證實的內容：**撞擊是持久大陸在約 3.9 Ga 出現的原因；冥古宙是停滯或柔軟岩石圈的世界，而非早期板塊構造世界；幾乎沒有冥古宙岩石留存，具體原因是熔融地殼自行再循環。

**它沒有顯示的內容：**對冥古宙地殼的直接測量；對板塊構造爭論的定案答案；轟炸減弱與第一批大陸之間已獲證明的因果關係；Jack Hills 鋯石代表保存下來的大陸；早期行星的完整模型。

**主要限制：**冥古宙岩石記錄幾乎不存在，因此結果是由極少資料約束的模型；它把模型層層疊加（撞擊通量 → 地球動力學 → 相平衡）；撞擊通量本身是具代表性但不確定的選擇；模擬是理想化的（一

維剖面、二維赤道切片，以及時間快照）。保守的下限假設強化了定性結論，但不會讓具體地溫曲線變得精確。

**一般讀者應有多少信心？**對於在合理物理條件下，遭受猛烈轟炸的早期地球會擁有炎熱、薄且淺部熔融的地殼，信心高。對於這使冥古宙板塊構造不太可能，並解釋了缺失的岩石記錄，信心中等。對於任何聲稱這項研究證明了大陸如何形成或確切何時形成的說法，信心低——這是一個重新框定冥古宙的強而保守模型，不是對那段歷史的直接觀察。

---

## 來源

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