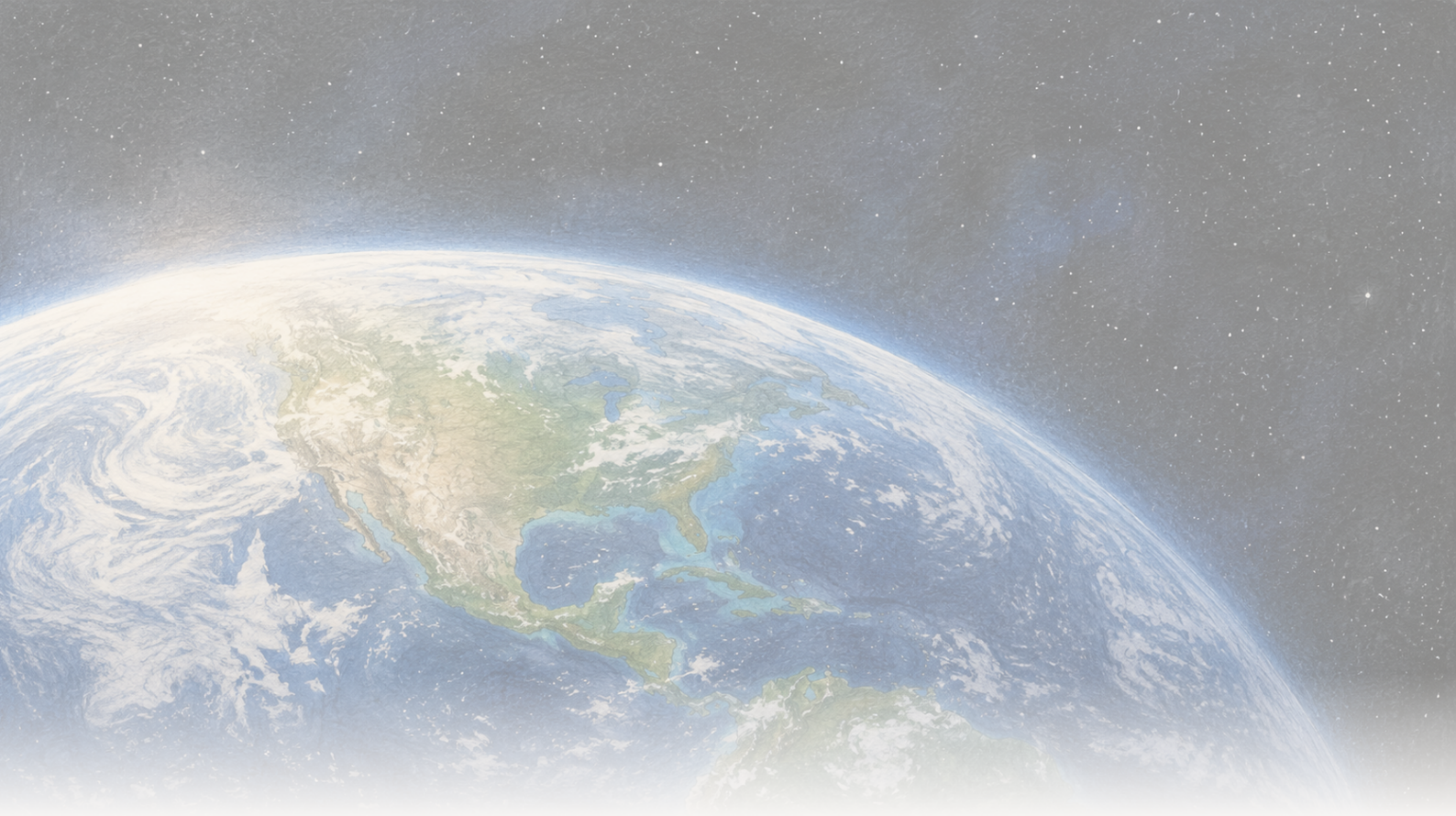




The CLEAN PAPER

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

地球還能保持綠色多久？氣候模型給出的是範圍，不是「末日日期」

29 組三維氣候模擬在不同假設下，把地球光合生物圈的極限放在距今約 13.5 億到 18.7 億年之間。具體數值取決於人為簡化的岩石風化路徑、熱極限，以及植物可能利用的最低二氧化碳濃度。它們並不是對所有植物、所有生命、人類文明或地球本身何時終結的預測。

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: [10.1029/2025JD045586](https://doi.org/10.1029/2025JD045586)

地球還能保持綠色多久？氣候模型給出的是範圍，不是「末日日期」

一片葉子的生存建立在一組狹窄條件之上。它需要光、水、二氧化碳，以及自身化學過程能夠承受的溫度。在一個人的一生裡，太陽似乎是這組條件中最穩定的一項。把時間拉長到十億年尺度，就不是這樣了。

太陽在主序星階段逐漸老化時，會慢慢變亮。更多陽光會讓地球升溫，但地球也有一個長期響應：雨水、二氧化碳與矽酸鹽岩石之間的反應，會從大氣中移除二氧化碳。溫室效應因此減弱，抵消一部分升溫。但正是這種幫助降溫的回饋，最終也可能把光合生物「餓」到沒有足夠碳來製造自身組織。

一篇新的 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 論文問的是：哪一種限制會先到來——太熱，還是二氧化碳太少？它給出的答案不是「地球死亡的日期」。在兩條刻意簡化的未來路徑中，論文採用的光合生命極限落在距今約 **13.5 億到 18.7 億年** 之間。

這個範圍討論的是**植被—光合生物圈**：地球生命系統中由光合生物維持的部分，尤其是利用光和二氧化碳合成生物物質的植物及其他生物。它不是對所有微生物的預測，也不是人類文明的壽命，更不是地球本身的壽命。

行星「恆溫器」有兩個都不確定的旋鈕

核心不確定性是**矽酸鹽風化**。二氧化碳溶入雨水，與矽酸鹽岩石反應，最終以溶解物、礦物和沉積物等形式被帶向海洋和沉積環境；在地質時間尺度上，火山又會把二氧化碳釋放回大氣。這些過程共同構成碳酸鹽—矽酸鹽循環的一部分，人們常把它比作行星尺度的恆溫器。

在更溫暖、更濕潤的世界裡，風化可能加快，更快從大氣中移除二氧化碳。但科學家並不知道，未來太陽更亮以後，這種回饋會在多大程度上控制地球氣候。因此 Jacob Haqq-Misra 和 Eric Wolf 沒有挑一條自稱「正確」的未來路徑，而是模擬兩個**端元**：刻意選定的兩種極端情境，用來框定不確定性的範圍。

- 在**弱風化端元**中，大氣二氧化碳保持 400 ppm，太陽逐漸變亮並推動溫度升高。
- 在**強風化端元**中，全球平均地表溫度保持 288 K，也就是約 15°C；隨著太陽輻照增強，二氧化碳不斷被抽走。

兩條分支都沒有被論文當作地球實際未來。第一條問的是：如果二氧化碳一直保持較高，升溫最終會怎樣限制生命？第二條問的是：如果風化把全球平均溫度維持在接近今天的水平，碳匱乏最終會怎樣限制生命？

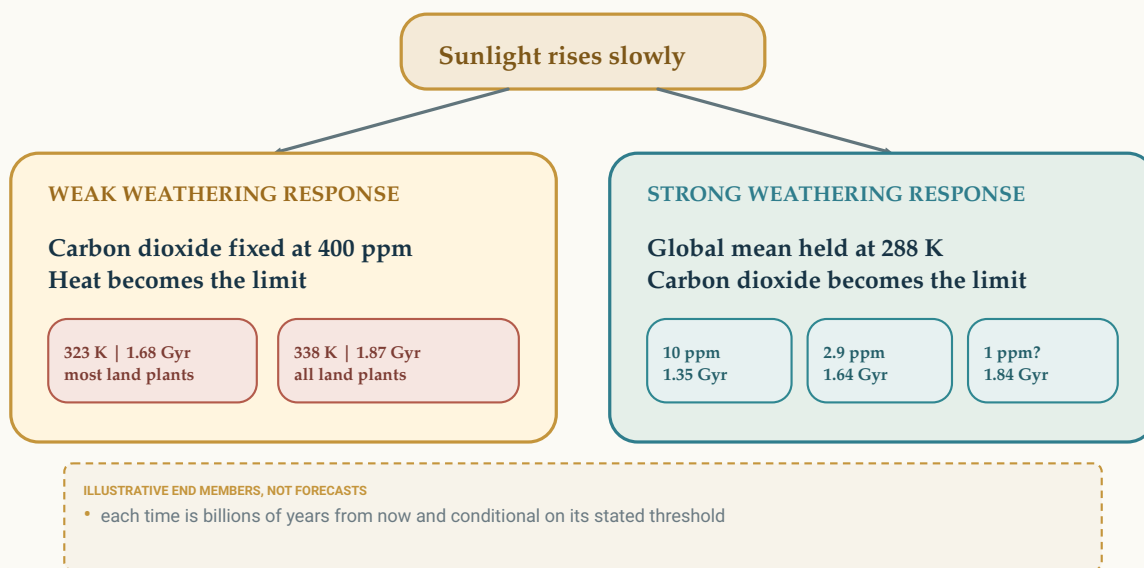
風化為什麼能像「恆溫器」？

這個類比說的是回饋，不是說地球真有一個控制旋鈕。氣候變暖如果加速化學風化，就可能讓更多大氣二氧化碳最終進入溶解物、礦物和沉積物。移除這種溫室氣體，會抵消一部分最初的

升溫。在很長的時間尺度上，火山逸氣又會把二氧化碳補回大氣。但每一環的強弱都取決於降雨、裸露岩石、侵蝕、生物、構造活動和海洋化學。因此論文測試的是限制性響應，而不是把這個「恆溫器」當成一台已知機器。

One brighter Sun, two illustrative limits

The study brackets uncertainty; it does not assign either future a probability.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

論文用兩個示意端元框定不確定的未來。如果風化響應弱，持續升溫會碰到作者採用的陸生植物熱門檻值；如果風化響應強，持續下降的二氧化碳會碰到作者採用的光合作用門檻值。這些是有條件的模型分支，不是機率，也不是倒計時日期。

The Clean Paper CC BY 4.0

29 個已經穩定下來的模型世界，不是一部連續兩十億年的「電影」

研究人員使用三維全球氣候模型 ExoCAM，在不同太陽輻照和不同二氧化碳濃度組合下計算了 **29 個穩態氣候**。每個案例運行 70 個模型年。這裡一個模型年是固定外部條件下模擬的一次年度循環，用來讓人工氣候逐漸穩定；它不是把真實地球未來逐年向前推進的一步。模型達到穩定後，對最後 20 年取平均。

這 29 個案例是彼此分開的模型世界。每一次運行只是網格中的一個點，回答：「給定這一組太陽輻照和二氧化碳，這個世界穩定下來後是什麼氣候？」電腦並沒有從今天的地球開始，把未來 20 億年中的大氣、岩石、海洋和生命連續演化下去。作者做的是在這些預先算好的點之間，沿兩條示意風化路徑取值；點與點之間的真實演化過程並沒有被模擬。

下表復現了官方模型資料檔案中的太陽輻照和二氧化碳組合。案例編號只是本文按檔案順序加入的閱讀輔助。**S/S₀** 是相對太陽常數：模型使用的入射太陽能除以今天的數值 S₀。因此 1.2 代表入射太陽能比今天高 20%。**CO₂ (ppm)** 表示每一百萬個大氣分子中二氧化碳分子的數量。

案例編號	S/S ₀	CO ₂ (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

這個模型地球仍然很像地球，但它有意做了許多限制。行星大小與地球相同，使用今天的地理分布；海洋是簡化的平板/混合層海洋，不是完整環流海洋；大氣壓約設為今天地球水平（1 bar）；甲烷固定不變。軌道是完全圓形的（偏心率為 0），自轉軸沒有傾角（傾角為 0）。模型中沒有顯式土壤、植被，也沒有會隨生物圈變化而產生的回饋。最重要的是，氣候模型並沒有與岩石風化模型動態耦合。也就是說，ExoCAM 不是先計算風化、用風化結果更新二氧化碳，再把新二氧化碳送入下一輪氣候計算。研究人員是預先規定兩條限制路徑，再讓它們穿過這 29 個氣候案例組成的網格。

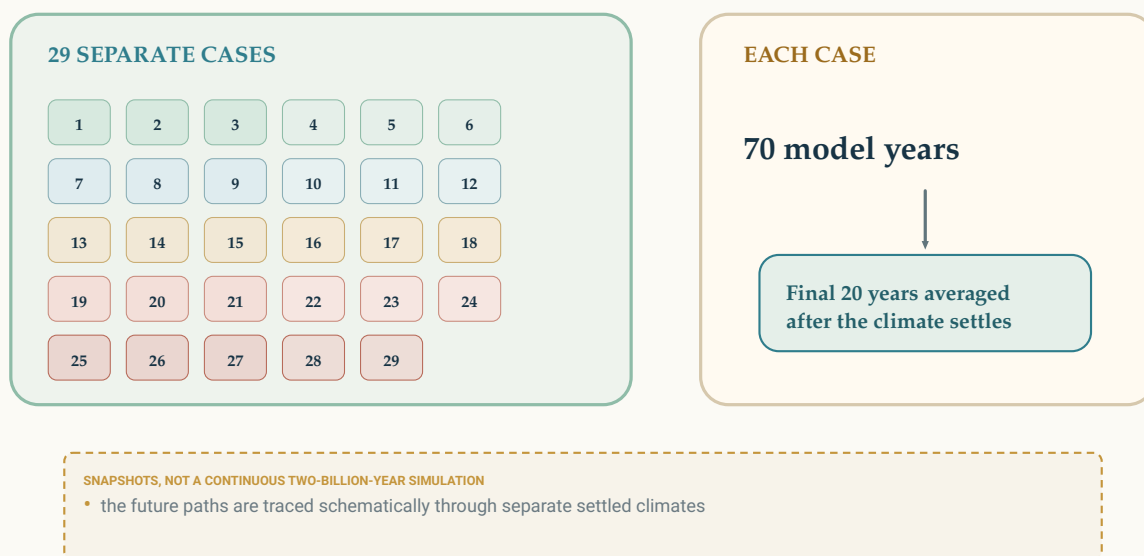
氣候模型裡的「穩態」是什麼意思？

穩態案例指的是：在固定太陽和大氣條件下，讓模型氣候充分穩定。模擬內部每天、每年仍然會有天氣變化，但長期平均值不再明顯漂移。

這種方法適合問「在這些條件下，什麼氣候能穩定存在？」它與預測真實地球究竟沿著什麼精確路徑從一組條件走向下一組條件，是兩回事。

Twenty-nine climate snapshots, not one future-Earth movie

Each tile is a separate ExoCAM world under prescribed sunlight and carbon dioxide.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

每個方塊都是一次獨立的 ExoCAM 氣候模擬，運行 70 個模型年，並對最後 20 年取平均。研究在預設的太陽輻照與二氧化碳條件下抽取 29 個穩定氣候；它沒有連續模擬一顆地球演化 20 億年。

The Clean Paper CC BY 4.0

端元一：二氧化碳夠用，但越來越熱

在弱風化分支中，二氧化碳固定為 400 ppm。隨著太陽輸入增加，熱成為限制因素。

論文採用了兩個來自既有研究的全球平均溫度門檻值：

- 全球年平均達到 **323 K**，約 **50°C** 時，模型把世界視為對大多數陸生植物過熱。到達這一門檻值約在距今 **16.8 億年**。
- 全球年平均達到 **338 K**，約 **65°C** 時，模型把世界視為對所有陸生植物過熱。到達這一門檻值約在距今 **18.7 億年**。

這些是作者採用的生物學極限，不是所有光合生物都必然在同一個溫度失效的普適門檻值。全球平均值也會掩蓋很大的地區差異。研究另外分析了哪些地方的溫度和水分組合可能仍然適合生命，但氣候圖上的一個「適宜」標籤，不可能窮盡所有未來避難區或適應方式。

端元二：溫度還能承受，但二氧化碳太少

在強風化分支中，全球平均溫度保持 288 K，約 15°C，而大氣二氧化碳不斷下降。此時，結果取決於不同光合途徑最低能利用多少碳。

- 採用傳統的 **10 ppm** 門檻值——每一百萬個大氣分子中有 10 個二氧化碳分子——C4 光合作用的限制約在距今 **13.5 億年**到來。C4 光合作用見於玉米、甘蔗等植物，它能在固碳酶周圍濃縮二氧化碳。
- 如果採用既有研究討論的另一項 **2.9 ppm** C4 門檻值，這一極限會推遲到約 **16.4 億年**。
- 如果採用一個暫定的 **1 ppm** 門檻值——與部分 CAM 植物（採用景天酸代謝，在夜間吸收二氧化碳、白天再使用）或能夠利用溶解碳酸氫根的水生植物可能繼續存活有關——則會推遲到約 **18.4 億年**。

最後一個數字的生物學不確定性最大。作者明確把 1 ppm 稱為暫定門檻值。它並不是在「未來地球條件」下，經實驗確認所有 CAM 植物或水生植被都能存活的界線。

C3、C4 和 CAM 是不同策略，不是一架「優劣階梯」

植物使用不同生化路線獲取碳。**C3 光合作用**最常見。**C4 光合作用**見於玉米、甘蔗等植物，它會在固碳酶周圍濃縮二氧化碳，在二氧化碳稀缺時可能更有優勢。**景天酸代謝（CAM）**則把碳的吸收與利用分到夜間和白天進行，幫助許多植物節約水分。

這些是各自包含許多物種差異的策略家族，不是一代比一代「更高級」的植物。論文採用的極低二氧化碳門檻值，是為了探索可能極限而設的假設，並不能保證未來生態系統一定會演化出利用這些條件的能力。

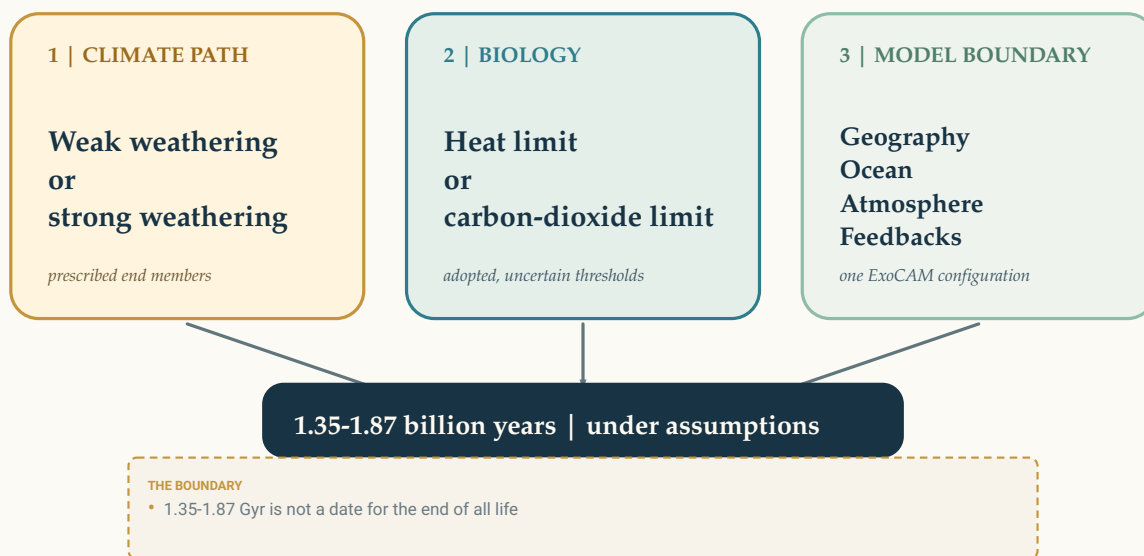
為什麼 18.6 億年不是「保質期」

論文經常被引用的約 **18.6 億年**，其實只是兩個最樂觀上限的平均值：二氧化碳受限分支的 18.4 億年，與熱受限分支的 18.7 億年。它只是用一個數字概括兩種不同情景，並不是第三個精度更高的模型結果，更不是「最佳估計日期」。

即使把範圍放寬到 13.5–18.7 億年，也不能給它附上一個統一機率。上下限依賴不同的風化假設、不同的生物學門檻值以及同一個氣候模型配置。這個範圍反映的是假設選擇帶來的差異，也就是在衡量模型不確定性，而不是在量一個唯一的「時間」。

The range is built from choices, not read from a clock

Change a path, threshold or model boundary and the endpoint can move.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

只有先選定一條風化路徑、一個生物學門檻值和一組模型邊界，才會得到 13.5–18.7 億年的範圍。它更像一張「假設地圖」，不是一個最終指向所有生命滅絕的倒計時鐘。

The Clean Paper CC BY 4.0

其他限制可能會更早到來

最長的植被生物圈估計已經接近另一個獨立而不確定的邊界：濕溫室或失控溫室狀態，它們可能造成大規模海洋損失。在太陽輻照不斷增加、尤其遠離今天條件時，不同氣候模型對這些狀態何時開始存在明顯分歧。有些估計把它們放在最樂觀的光合作用極限之前。

這意味著，上限分支不能被理解成「地球保證會一直保有海洋、熟悉的大陸和可居住表面環境直到 18.7 億年以後」。模型也沒有包含未來板塊構造、陸地面積變化、演化中的生態系統或完整動力海洋。用於計算大氣怎樣吸收和發射能量的方法，也被推到了強太陽輻照和極低二氧化碳的區域，而不同模型在那裡會開始顯著分歧。

進化適應和技術干預在論文討論中被提到作為可能性，但它們不是 29 個氣候模擬的輸出。模型並沒有顯示未來生物會演化出可在 1 ppm 二氧化碳下工作的光合作用途徑，也沒有顯示某個文明能管理大氣十億年。

這不是一項關於今天氣候危機的結果

太陽變亮發生在數億到數十億年尺度；今天由人類活動驅動的變暖，來自幾十年至幾百年間溫室氣體迅速增加。兩者是完全不同的強迫，時間尺度也天差地別，回答的是不同問題。

這項研究沒有任何內容會削弱今天氣候變化的證據，也沒有為拖延行動提供理由。在一個遙遠模型情景下「某些光合生命也許仍能存活」，與「今天的社會和生態系統可以安全承受這種氣候」完全不是一回事。

論文的價值在於，它讓一個極遙遠的問題變得更嚴謹。它顯示：早期更簡單的模型在太陽輻照增加、二氧化碳保持固定時，可能把升溫估得過高；同時，光合生命繼續存在的路徑也可能比單一傳統碳門檻值暗示的更多。它同樣清楚地說明，任何額外延長的幾億年後，都跟著一整串假設。

供養一片葉子的太陽正在慢慢改變。地球究竟還能保持綠色 13.5 億年、18.7 億年，還是其他時間，取決於岩石、水、大氣和生命怎樣共同響應。更誠實的結論不是給出一個確定日期，而是更清楚地看到這些長期相互作用可能把結果推向多大的範圍。

重點摘要

這項三維氣候研究問：隨著太陽緩慢變亮，地球以植被和其他光合生物為主的生物圈還能持續多久？研究人員計算了 29 個彼此獨立的穩態氣候，再讓兩條示意端元路徑穿過這些結果。弱風化情況下，二氧化碳固定為 400 ppm，論文採用的陸生植物熱極限約在距今 16.8 億和 18.7 億年達到。強風化情況下，全球平均溫度固定為 288 K（約 15°C），作者採用的光合作用二氧化碳極限約在距今 13.5 億、16.4 億，以及採用暫定門檻值時 18.4 億年達到。經常被引用的 18.6 億年，只是兩個最樂觀上限的四捨五入後的平均值。這些都是依賴情景的模型範圍，不是地球、人類或所有生命結束的日期。模型採用預設路徑、現代地理、平板海洋，沒有顯式的土壤—植被或氣候—風化耦合，而且最長估計已經接近不確定的溫室與海洋損失邊界。

務實檢視

論文真正顯示了什麼：在這個 ExoCAM 配置中，當太陽輻照增加而二氧化碳固定時，三維氣候總體升溫幅度低於論文用於比較的簡化模型。在兩條預設風化端元和多個採用的生物學門檻值下，植被生物圈的限制落在距今約 13.5–18.7 億年。

合理但尚未確立的部分：某些 CAM 植物或利用溶解碳酸氫根的水生植物，可能在大氣二氧化碳接近 1 ppm 時仍能進行光合作用；適應或技術可能進一步延長光合生命；真實氣候—風化路徑會一直落在這兩個模型端元之間。

論文沒有顯示什麼：所有植物、所有生命、人類文明、地球海洋或地球本身結束的固定日期；未來 20 億年的一段連續模擬；或任何可以輕視今天人為氣候變化的理由。

主要侷限：來自單一氣候模型家族的 29 個穩態案例；風化路徑是預設而不是動態耦合；使用現代地

理；平板海洋；固定甲烷；零軸傾和零軌道偏心率；沒有顯式土壤、植被或生物圈回饋；熱與二氧化碳門檻值不確定；而在濕溫室和失控溫室附近，不同模型存在很大分歧。

普通讀者應該有多大信心？可以高度相信這項研究拓寬了合理的模型範圍，也更明確地指出哪些假設在控制結果。對於這些假設內的數值區間作為一個有用「括號」，可以有中等信心。對於任何精確日期，則應該有很低信心，因為最遙遠的端點依賴刻意極端的氣候路徑和不確定的生物學門檻值。

來源

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 131, e2025JD045586 (2026)

<https://doi.org/10.1029/2025JD045586>

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870>