The Clean Paper

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

Trái Đất còn có thể xanh trong bao lâu? Một mô hình khí hậu đưa ra khoảng giá trị, không phải ngày tận thế

Hai mươi chín mô phỏng khí hậu ba chiều đặt các giới hạn khác nhau cho sinh quyển quang hợp của Trái Đất trong khoảng 1,35 đến 1,87 tỷ năm kể từ nay. Các giá trị phụ thuộc vào những quỹ đạo được cố ý đơn giản hóa cho phong hóa đá, nhiệt và mức carbon dioxide thấp nhất mà thực vật có thể sử dụng. Chúng không dự đoán khi nào mọi thực vật, mọi sự sống, nền văn minh hay hành tinh sẽ kết thúc.

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

Trái Đất còn có thể xanh trong bao lâu? Một mô hình khí hậu đưa ra khoảng giá trị, không phải ngày tận thế

Một chiếc lá tồn tại trong một thỏa thuận rất hẹp. Nó cần ánh sáng, nước, carbon dioxide và một nhiệt độ mà hóa học của nó có thể chịu được. Trong một đời người, Mặt Trời có vẻ là phần cố định của thỏa thuận đó. Trong một tỷ năm thì không.

Khi Mặt Trời già đi trên dãy chính, độ sáng của nó tăng dần. Nhiều ánh sáng Mặt Trời hơn làm Trái Đất ấm lên, nhưng hành tinh có một phản ứng dài hạn: các phản ứng giữa nước mưa, carbon dioxide và đá silicat có thể loại carbon dioxide khỏi khí quyển. Điều này làm yếu hiệu ứng nhà kính và bù lại một phần sự ấm lên. Nhưng chính phản ứng làm mát hành tinh cuối cùng cũng có thể làm các sinh vật quang hợp thiếu carbon dùng để tạo mô sống.

Một bài báo mới trên Journal of Geophysical Research: Atmospheres hỏi giới hạn nào có thể đến trước: quá nóng hay quá ít carbon dioxide. Câu trả lời không phải một ngày Trái Đất "chết". Trên hai quỹ đạo tương lai được cố ý đơn giản hóa, các giới hạn được chọn cho sự sống quang hợp nằm trong khoảng **1,35 đến 1,87 tỷ năm kể từ nay**.

Khoảng này nói về **sinh quyển thực vật**: phần của hệ sống trên Trái Đất được duy trì bởi các sinh vật quang hợp, đặc biệt là thực vật và những dạng sống biến ánh sáng cùng carbon dioxide thành vật chất sinh học. Nó không phải dự báo cho mọi vi sinh vật. Nó không phải tuổi thọ của nền văn minh nhân loại. Và cũng không phải tuổi thọ của hành tinh.

"Bộ điều nhiệt" hành tinh có hai thiết lập chưa chắc chắn

Bất định trung tâm là **phong hóa silicat**. Carbon dioxide hòa tan trong nước mưa, phản ứng với đá silicat và cuối cùng được vận chuyển về đại dương và trầm tích. Núi lửa trả carbon dioxide lại khí quyển trên thang thời gian địa chất. Cùng nhau, các quá trình này tạo thành một phần của chu trình carbonate–silicate, thường được mô tả như một bộ điều nhiệt hành tinh.

Trong một thế giới ấm và ẩm hơn, phong hóa có thể tăng tốc và loại carbon dioxide nhanh hơn. Nhưng các nhà khoa học không biết phản ứng này sẽ chi phối Trái Đất mạnh đến mức nào dưới một Mặt Trời sáng hơn trong tương lai. Vì vậy Jacob Haqq-Misra và Eric Wolf không chọn một quỹ đạo duy nhất được cho là đúng. Họ mô hình hóa hai **trường hợp giới hạn** (*end members*): những trường hợp cực đoan có chủ ý dùng để kẹp khoảng bất định.

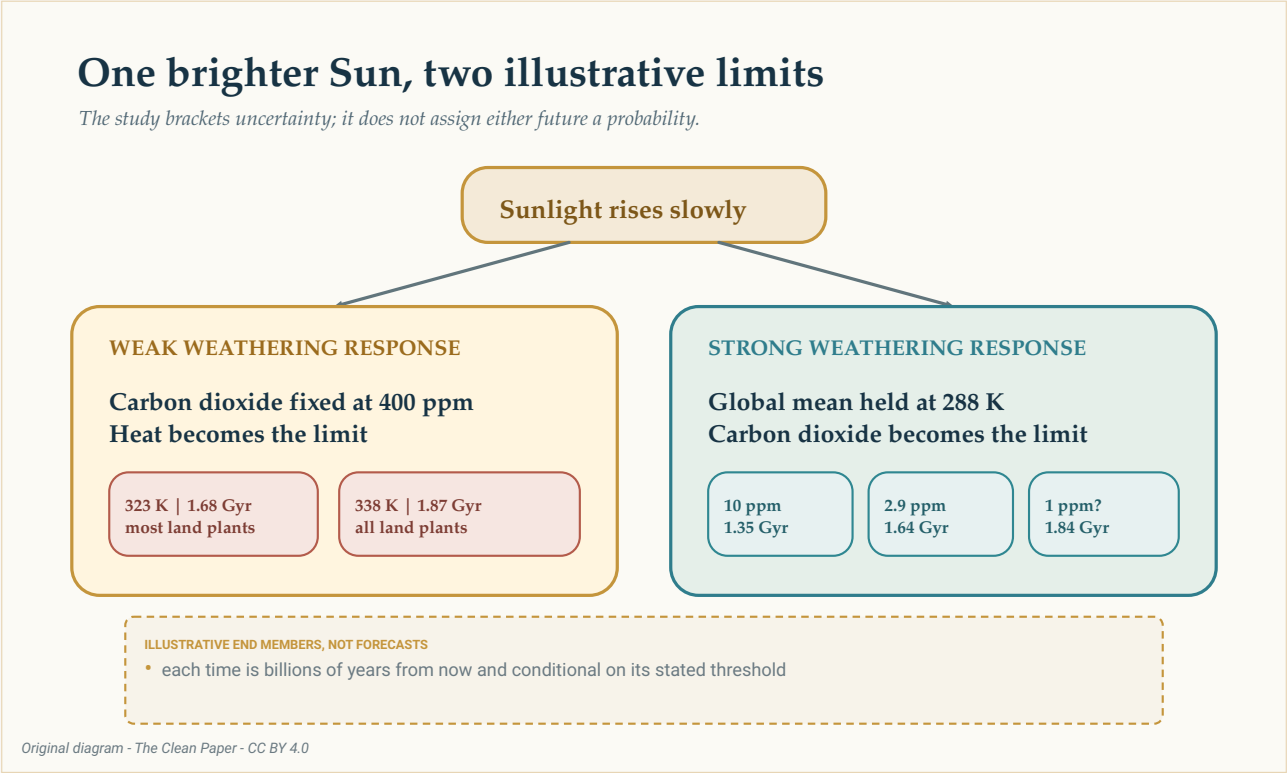
- Trong **trường hợp phong hóa yếu**, carbon dioxide khí quyển được giữ ở 400 phần triệu trong khi Mặt Trời sáng dần làm nhiệt độ tăng.
- Trong **trường hợp phong hóa mạnh**, nhiệt độ bề mặt trung bình toàn cầu được giữ ở 288

kelvin, khoảng 15 độ C, trong khi carbon dioxide bị rút xuống khi lượng ánh sáng Mặt Trời tăng.

Không nhánh nào được trình bày như tương lai thật của Trái Đất. Nhánh đầu hỏi nhiệt sẽ làm gì nếu carbon dioxide vẫn cao. Nhánh thứ hai hỏi thiếu carbon sẽ làm gì nếu phong hóa giữ nhiệt độ trung bình toàn cầu gần mức ngày nay.

Phong hóa có thể hoạt động như một bộ điều nhiệt bằng cách nào?

Phép so sánh này nói về phản hồi, không phải một núm điều khiển theo nghĩa đen. Khi khí hậu ấm hơn làm phong hóa hóa học tăng nhanh, nhiều carbon dioxide khí quyển hơn có thể kết thúc trong vật chất hòa tan, khoáng vật và trầm tích. Việc loại bỏ khí nhà kính này chống lại một phần sự ấm lên ban đầu. Trên thang thời gian rất dài, khí thoát ra từ núi lửa đưa carbon dioxide trở lại.
Độ mạnh của từng mắt xích phụ thuộc vào mưa, đá lộ thiên, xói mòn, sinh học, kiến tạo và hóa học đại dương. Đó là lý do bài báo thử các phản ứng giới hạn thay vì coi “bộ điều nhiệt” là một cỗ máy đã biết rõ.



Bài báo kẹp một tương lai chưa chắc chắn bằng hai trường hợp giới hạn minh họa. Nếu phong hóa phản ứng yếu, nhiệt tăng sẽ chạm các ngưỡng được chọn cho thực vật trên cạn. Nếu phong hóa phản ứng mạnh, carbon dioxide giảm sẽ chạm các ngưỡng quang hợp được chọn. Đây là các nhánh mô hình có điều kiện, không phải xác suất hay đồng hồ đếm ngược.

The Clean Paper CC BY 4.0

Hai mươi chín thế giới mô hình đã ổn định, không phải một bộ phim dài hai tỷ năm

Các nhà nghiên cứu dùng ExoCAM, một mô hình khí hậu toàn cầu ba chiều, để tính **29 khí hậu trạng thái ổn định** trên các tổ hợp ánh sáng Mặt Trời mạnh hơn và carbon dioxide thấp hơn. Mỗi trường hợp chạy trong 70 năm mô hình. Ở đây, một năm mô hình là một chu kỳ năm mô phỏng dưới các điều kiện cố định: đó là thời gian chạy để khí hậu nhân tạo ổn định, không phải một bước trong dự báo từng năm về tương lai Trái Đất. 20 năm cuối được lấy trung bình sau khi khí hậu mô phỏng có đủ thời gian ổn định.

29 trường hợp đó là các thế giới mô hình riêng biệt. Mỗi lần chạy là một điểm trên lưới, trả lời câu hỏi “khí hậu đã ổn định nào phù hợp với cặp ánh sáng Mặt Trời và carbon dioxide được chọn này?”. Máy tính không bắt đầu từ Trái Đất ngày nay rồi liên tục tiến hóa khí quyển, đá, đại dương và sinh vật của nó trong hai tỷ năm tiếp theo. Thay vào đó, các tác giả lần theo hai quỹ đạo phong hóa sơ đồ qua các điểm đã tính trước; phần đường giữa các điểm không được mô phỏng trực tiếp.

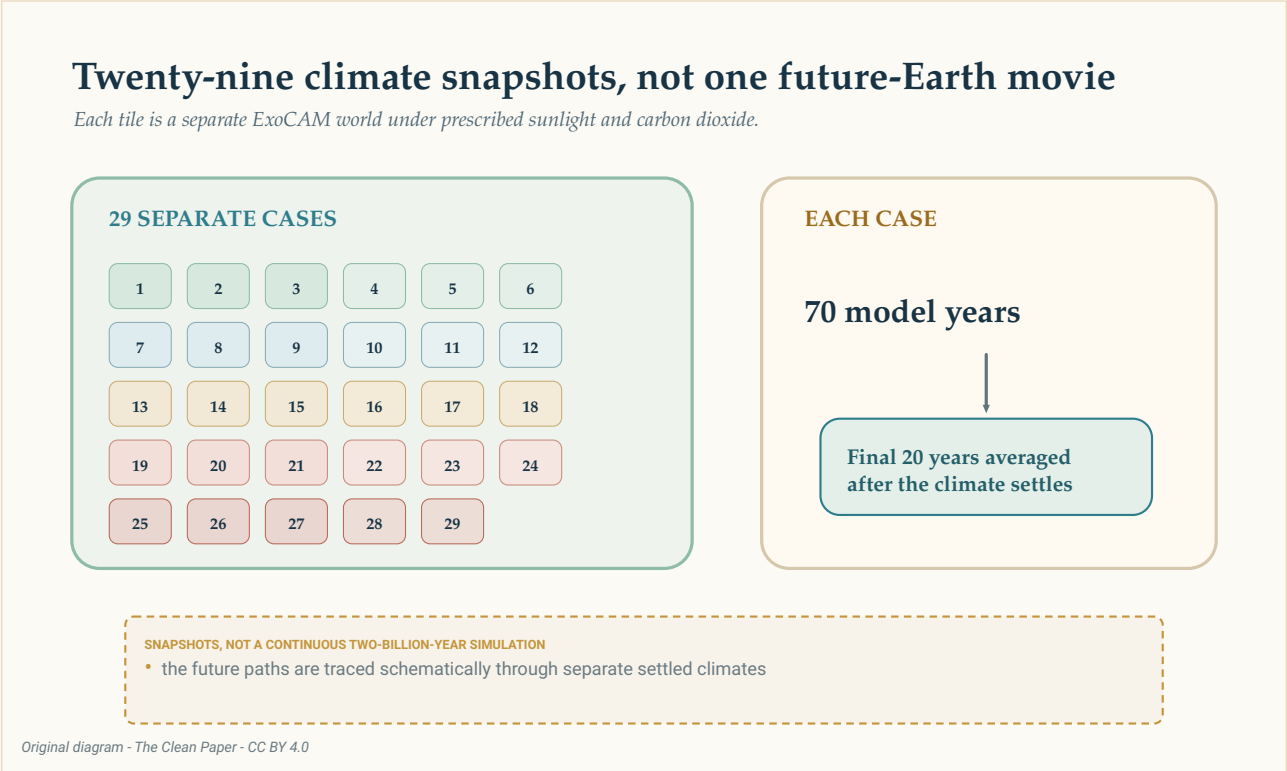
Bảng dưới đây tái hiện các tổ hợp ánh sáng Mặt Trời và carbon dioxide trong kho dữ liệu mô hình chính thức. ID trường hợp là nhãn hỗ trợ đọc được thêm ở đây theo thứ tự trong kho. **S/S0** là hằng số Mặt Trời tương đối: năng lượng Mặt Trời tới được dùng trong mô hình chia cho giá trị hiện nay, S0. Vì vậy giá trị 1,2 có nghĩa năng lượng Mặt Trời tới nhiều hơn hiện nay 20%. **CO2 (ppm)** là tỷ lệ trộn carbon dioxide khí quyển tính theo số phân tử trên một triệu phân tử khí quyển.

ID trường hợp	S/S0	CO2 (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

ID trường hợp	S/S0	CO2 (ppm)
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

Trái Đất trong mô hình vẫn dễ nhận ra nhưng được cố ý giới hạn. Nó có kích thước Trái Đất và dùng địa lý hiện tại. Nó có một đại dương dạng lớp đơn giản thay vì đại dương tuần hoàn đầy đủ, áp suất khí quyển đặt gần giá trị hiện nay của Trái Đất (một bar) và methane cố định. Quỹ đạo hoàn toàn tròn (độ lệch tâm bằng 0), và trục quay không nghiêng (độ nghiêng trục bằng 0). Mô hình không có đất, thảm thực vật hay phản hồi từ sinh quyển đang thay đổi một cách tường minh. Quan trọng nhất, mô hình khí hậu không được ghép động với mô hình phong hóa đá. Nói cách khác, ExoCAM không tính phong hóa, dùng nó để cập nhật carbon dioxide rồi chạy khí hậu tiếp theo trong một vòng phản hồi. Thay vào đó, các nhà nghiên cứu quy định trước hai quỹ đạo giới hạn và lần theo chúng trên lưới khí hậu 29 trường hợp.

> **“Trạng thái ổn định” có nghĩa gì trong mô hình khí hậu?**
>
> Một trường hợp trạng thái ổn định là khí hậu mô hình được phép ổn định dưới một Mặt Trời và khí quyển đã chọn. Thời tiết vẫn thay đổi từ ngày này sang ngày khác và năm này sang năm khác trong mô phỏng, nhưng các giá trị trung bình dài hạn không còn trôi mạnh.
> Điều này hữu ích để hỏi “khí hậu nào phù hợp với các điều kiện này?”. Nó khác với việc dự đoán chính xác con đường mà Trái Đất thật đi từ một tập điều kiện sang tập kế tiếp.



Mỗi ô là một lần chạy khí hậu ExoCAM riêng biệt trong 70 năm mô hình, với 20 năm cuối được lấy trung bình. Nghiên cứu lấy mẫu 29 khí hậu đã ổn định trên các điều kiện ánh sáng Mặt Trời và carbon dioxide được quy định; nó không mô phỏng một Trái Đất duy nhất liên tục tiến hóa trong hai tỷ năm.

The Clean Paper CC BY 4.0

Trường hợp giới hạn thứ nhất: đủ carbon dioxide, quá nhiều nhiệt

Trong nhánh phong hóa yếu, carbon dioxide được giữ cố định ở 400 phần triệu. Khi năng lượng Mặt Trời tăng, nhiệt trở thành yếu tố giới hạn.

Bài báo dùng hai ngưỡng nhiệt độ trung bình toàn cầu lấy từ các nghiên cứu trước:

- Ở **323 kelvin**, khoảng **50 độ C** theo trung bình năm toàn cầu, thế giới được xem là quá nóng đối với phần lớn thực vật trên cạn. Mô hình đạt ngưỡng này sau khoảng **1,68 tỷ năm**.
- Ở **338 kelvin**, khoảng **65 độ C** theo trung bình năm toàn cầu, thế giới được xem là quá nóng đối với toàn bộ thực vật trên cạn. Mô hình đạt ngưỡng này sau khoảng **1,87 tỷ năm**.

Đây là các giới hạn sinh học được chọn, không phải nhiệt độ phổ quát mà ở đó mọi sinh vật quang hợp chắc chắn thất bại. Trung bình toàn cầu cũng che giấu khác biệt khu vực rất lớn. Nghiên cứu có xem xét riêng nơi các tổ hợp nhiệt độ và nước có thể vẫn phù hợp, nhưng một nhãn trên bản đồ khí hậu không thể liệt kê mọi nơi trú ẩn hay thích nghi trong tương lai.

Trường hợp giới hạn thứ hai: nhiệt độ chịu được, quá ít carbon dioxide

Trong nhánh phong hóa mạnh, nhiệt độ trung bình toàn cầu được giữ ở 288 kelvin, khoảng 15 độ C, trong khi carbon dioxide khí quyển giảm. Ở đây câu trả lời phụ thuộc vào lượng carbon tối thiểu mà các con đường quang hợp khác nhau có thể sử dụng.

- Với ngưỡng truyền thống **10 phần triệu** — 10 phân tử carbon dioxide trên mỗi một triệu phân tử khí quyển — giới hạn cho quang hợp C4 đến sau khoảng **1,35 tỷ năm**. Quang hợp C4 được dùng bởi các loài cây như ngô và mía, và tập trung carbon dioxide quanh enzyme cố định carbon.
- Dùng ngưỡng C4 thay thế **2,9 phần triệu** được thảo luận trong nghiên cứu trước sẽ đẩy giới hạn đến khoảng **1,64 tỷ năm**.
- Một ngưỡng **1 phần triệu** mang tính thăm dò, liên quan đến khả năng một số cây CAM — thực vật dùng chuyển hóa acid crassulacean, tách việc thu carbon dioxide vào ban đêm khỏi việc sử dụng nó ban ngày — hoặc thực vật thủy sinh có thể dùng bicarbonate hòa tan, sẽ đẩy giới hạn đến khoảng **1,84 tỷ năm**.

Con số cuối mang bất định sinh học lớn nhất. Các tác giả nói rõ giới hạn một phần triệu chỉ mang tính thăm dò. Đây không phải ngưỡng sống sót đã được chứng minh bằng thực nghiệm cho mọi cây CAM hay thảm thực vật thủy sinh dưới điều kiện Trái Đất tương lai.

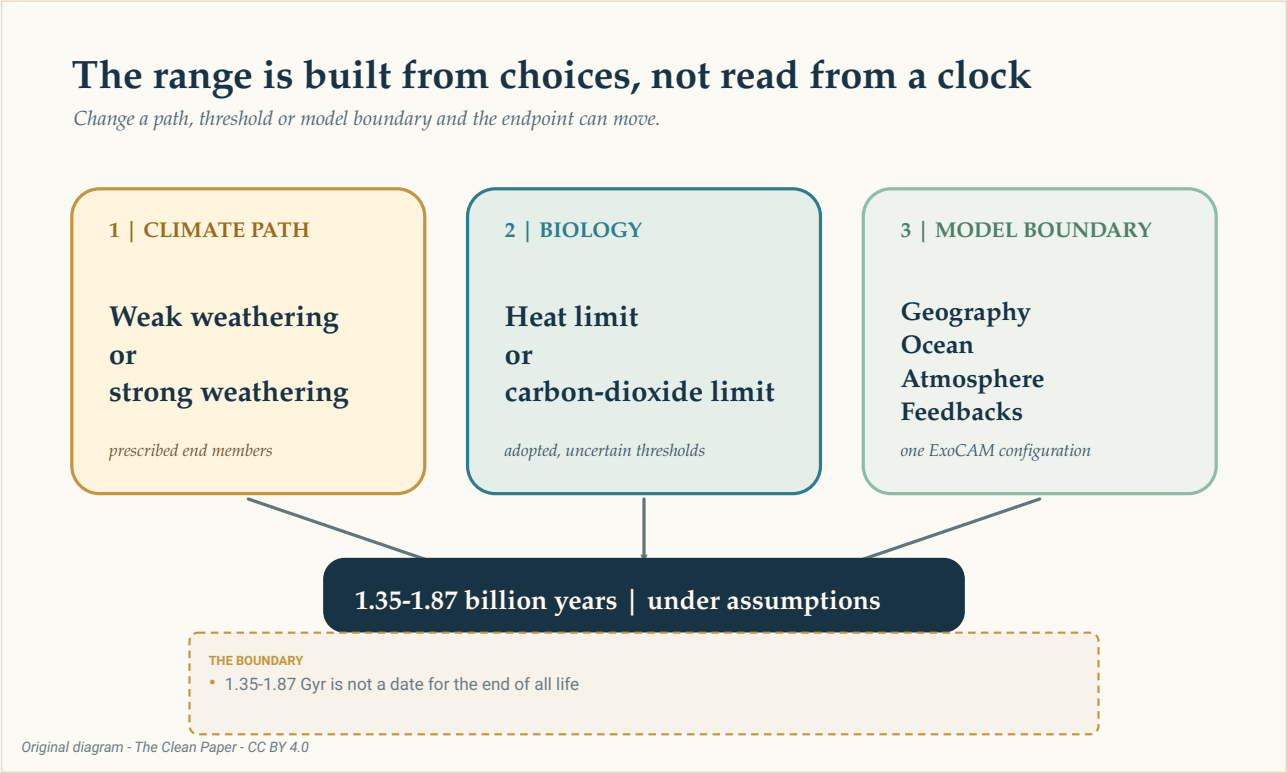
> **C3, C4 và CAM là các chiến lược, không phải một thang xếp hạng**
>
> Thực vật dùng các con đường sinh hóa khác nhau để thu carbon. **Quang hợp C3** phổ biến nhất. **Quang hợp C4**, được các loài như ngô và mía sử dụng, tập trung carbon dioxide quanh enzyme cố định carbon và có thể hoạt động tốt hơn khi carbon dioxide khan hiếm. **Chuyển hóa acid crassulacean (CAM)** tách việc thu và sử dụng carbon giữa đêm và ngày, giúp nhiều loài thực vật tiết kiệm nước.
> Đây là các họ chiến lược với nhiều khác biệt ở cấp loài, không phải các bậc liên tiếp của cây "tốt hơn". Các ngưỡng carbon dioxide rất thấp trong bài báo là giả định để khảo sát các giới hạn khả dĩ, không phải bảo đảm rằng một hệ sinh thái tương lai sẽ tiến hóa để dùng chúng.

Vì sao 1,86 tỷ năm không phải ngày hết hạn

Ước tính tiêu đề khoảng **1,86 tỷ năm** của bài báo là trung bình của hai điểm cuối lạc quan nhất: 1,84 tỷ năm trong nhánh bị giới hạn bởi carbon dioxide và 1,87 tỷ năm trong nhánh bị giới hạn bởi nhiệt. Nó là một tóm tắt gọn của hai kịch bản khác nhau. Nó không phải một kết quả mô hình thứ ba có độ chính xác cao hơn, và cũng không phải ngày ước tính tốt nhất.

Ngay cả khoảng rộng hơn từ 1,35 đến 1,87 tỷ năm cũng không đi kèm một xác suất duy nhất.

Giá trị thấp và cao của nó phụ thuộc vào những giả định phong hóa khác nhau, các ngưỡng sinh học khác nhau và một cấu hình mô hình khí hậu. Khoảng này đo các lựa chọn trong thí nghiệm nhiều không kém gì đo thời gian.



Khoảng 1,35 đến 1,87 tỷ năm chỉ xuất hiện sau khi chọn quỹ đạo phong hóa, ngưỡng sinh học và biên mô hình. Đây là một bản đồ giả định, không phải chiếc đồng hồ kết thúc bằng sự tuyệt chủng của toàn bộ sự sống.

The Clean Paper CC BY 4.0

Những giới hạn khác có thể đến trước

Các ước tính dài nhất cho sinh quyển thực vật tiến gần một ranh giới riêng và chưa chắc chắn: hiệu ứng nhà kính ẩm hoặc mất kiểm soát có thể dẫn tới mất đại dương quy mô lớn. Các mô hình khí hậu bất đồng đáng kể về thời điểm những trạng thái này bắt đầu khi ánh sáng Mặt Trời tăng, đặc biệt ở xa điều kiện hiện nay. Một số ước tính đặt chúng trước giới hạn quang hợp lạc quan nhất.

Điều đó có nghĩa nhánh trên không thể được đọc như lời hứa rằng Trái Đất sẽ giữ đại dương, lục địa quen thuộc hay điều kiện bề mặt có thể ở được cho đến 1,87 tỷ năm nữa. Mô hình cũng không bao gồm kiến tạo mảng tương lai, thay đổi diện tích đất liền, hệ sinh thái tiến hóa hay một đại dương động đầy đủ. Các tính toán về cách khí quyển hấp thụ và phát năng lượng cũng bị đẩy vào những chế độ ánh sáng Mặt Trời rất mạnh và carbon dioxide cực thấp, nơi các mô hình khác nhau bắt đầu phân kỳ.

Thích nghi tiến hóa và can thiệp công nghệ xuất hiện trong phần thảo luận của bài báo như các khả năng. Chúng không phải đầu ra của 29 mô phỏng khí hậu. Mô hình không cho thấy sinh vật tương lai tiến hóa một con đường quang hợp hoạt động ở một phần triệu, và cũng không cho thấy một nền văn minh quản lý khí quyển trong một tỷ năm.

Đây không phải kết quả về cuộc khủng hoảng khí hậu hiện nay

Mặt Trời sáng dần trên thang hàng trăm triệu đến hàng tỷ năm. Sự ấm lên hiện đại do con người gây ra đến từ khí nhà kính tăng nhanh trong vài thập kỷ và thế kỷ. Đây là các tác động cưỡng bức khác nhau, trên thang thời gian hoàn toàn khác nhau, trả lời những câu hỏi khác nhau.

Không có điều gì trong nghiên cứu này làm yếu bằng chứng về biến đổi khí hậu hiện nay hay là lý do trì hoãn hành động. Một sinh quyển có thể giữ lại một phần sự sống quang hợp dưới một kịch bản mô hình xa xôi không đồng nghĩa với một khí hậu trong đó các xã hội và hệ sinh thái ngày nay vẫn an toàn.

Bài báo có giá trị vì nó khiến một câu hỏi rất xa trở nên có kỷ luật hơn. Nó cho thấy các mô hình đơn giản hơn trước đây có thể làm Trái Đất nóng quá mức khi ánh sáng Mặt Trời tăng trong lúc carbon dioxide được giữ cố định, và sự sống quang hợp có thể có nhiều con đường tồn tại hơn một ngưỡng carbon kinh điển duy nhất gợi ý. Nó cũng cho thấy vì sao mỗi phần tỷ năm được cộng thêm đều đi kèm một chuỗi giả định.

Mặt Trời nuôi một chiếc lá đang thay đổi rất chậm. Trái Đất còn xanh thêm 1,35, 1,87 hay một con số tỷ năm nào khác sẽ phụ thuộc vào đá, nước, khí quyển và sự sống cùng phản ứng. Kết quả trung thực không phải một ngày. Nó là một cái nhìn rộng hơn về thỏa thuận đó.

Tóm tắt gọn

Một nghiên cứu khí hậu ba chiều hỏi sinh quyển thực vật — tức quang hợp — của Trái Đất có thể tồn tại bao lâu khi Mặt Trời dần sáng hơn. Các nhà nghiên cứu tính 29 khí hậu trạng thái ổn định riêng biệt và lần theo hai trường hợp giới hạn minh họa qua chúng. Với phong hóa yếu và carbon dioxide cố định ở 400 phần triệu, các giới hạn nhiệt được chọn cho thực vật trên cạn xuất hiện sau khoảng 1,68 và 1,87 tỷ năm. Với phong hóa mạnh và nhiệt độ trung bình toàn cầu cố định ở 288 kelvin, khoảng 15 độ C, các giới hạn carbon dioxide được chọn cho quang hợp xuất hiện sau khoảng 1,35, 1,64 và — dùng một ngưỡng mang tính thăm dò — 1,84 tỷ năm. Con số thường được trích 1,86 tỷ năm chỉ là trung bình làm tròn của hai điểm cuối lạc quan nhất. Đây là các khoảng mô hình phụ thuộc kịch bản, không phải ngày Trái Đất, nhân loại hay toàn bộ sự sống kết thúc. Mô hình dùng các quỹ đạo được quy định trước, địa lý hiện tại, đại dương dạng lớp và không có ghép nối tường minh đất–thảm thực vật hay khí

hậu–phong hóa; các ước tính dài nhất cũng tiến gần những giới hạn chưa chắc chắn về hiệu ứng nhà kính và mất đại dương.

Đánh giá thẳng thắn

Bài báo cho thấy điều gì: Trong cấu hình ExoCAM này, khí hậu ba chiều nói chung ấm ít hơn dưới ánh sáng Mặt Trời tăng và carbon dioxide cố định so với các mô hình đơn giản hóa dùng để so sánh. Trên hai trường hợp giới hạn phong hóa được quy định và một số ngưỡng sinh học được chọn, giới hạn của sinh quyển thực vật nằm khoảng 1,35 đến 1,87 tỷ năm kể từ nay.

Điều hợp lý nhưng chưa được xác lập: Một số cây CAM hoặc thực vật thủy sinh dùng bicarbonate hòa tan có thể duy trì quang hợp gần một phần triệu carbon dioxide khí quyển; thích nghi hoặc công nghệ có thể kéo dài sự sống quang hợp hơn nữa; và quỹ đạo khí hậu–phong hóa thực sự sẽ nằm giữa hai trường hợp giới hạn của mô hình.

Điều nghiên cứu không cho thấy: Một ngày cố định cho sự kết thúc của mọi thực vật, mọi sự sống, nền văn minh nhân loại, đại dương Trái Đất hay hành tinh; một mô phỏng liên tục duy nhất của hai tỷ năm tiếp theo; hay bất kỳ lý do nào để xem nhẹ biến đổi khí hậu hiện nay do con người gây ra.

Các giới hạn chính: Hai mươi chín trường hợp trạng thái ổn định từ một họ mô hình khí hậu; các quỹ đạo phong hóa được quy định thay vì ghép động; địa lý hiện nay; đại dương dạng lớp; methane cố định; độ nghiêng trục và độ lệch tâm bằng 0; không có đất, thảm thực vật hay phản hồi sinh quyển tường minh; các ngưỡng nhiệt và carbon dioxide chưa chắc chắn; và bất đồng lớn giữa mô hình gần các điều kiện nhà kính ẩm và mất kiểm soát.

Một độc giả phổ thông nên tin tưởng đến mức nào? Tin tưởng cao rằng nghiên cứu mở rộng khoảng mô hình hợp lý và xác định các giả định chi phối nó. Tin tưởng vừa phải vào khoảng số như một khung hữu ích trong mô hình này. Tin tưởng thấp vào bất kỳ ngày chính xác nào, vì các điểm cuối xa nhất phụ thuộc vào các quỹ đạo khí hậu cực đoan có chủ ý và sinh học chưa chắc chắn.

Nguồn

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