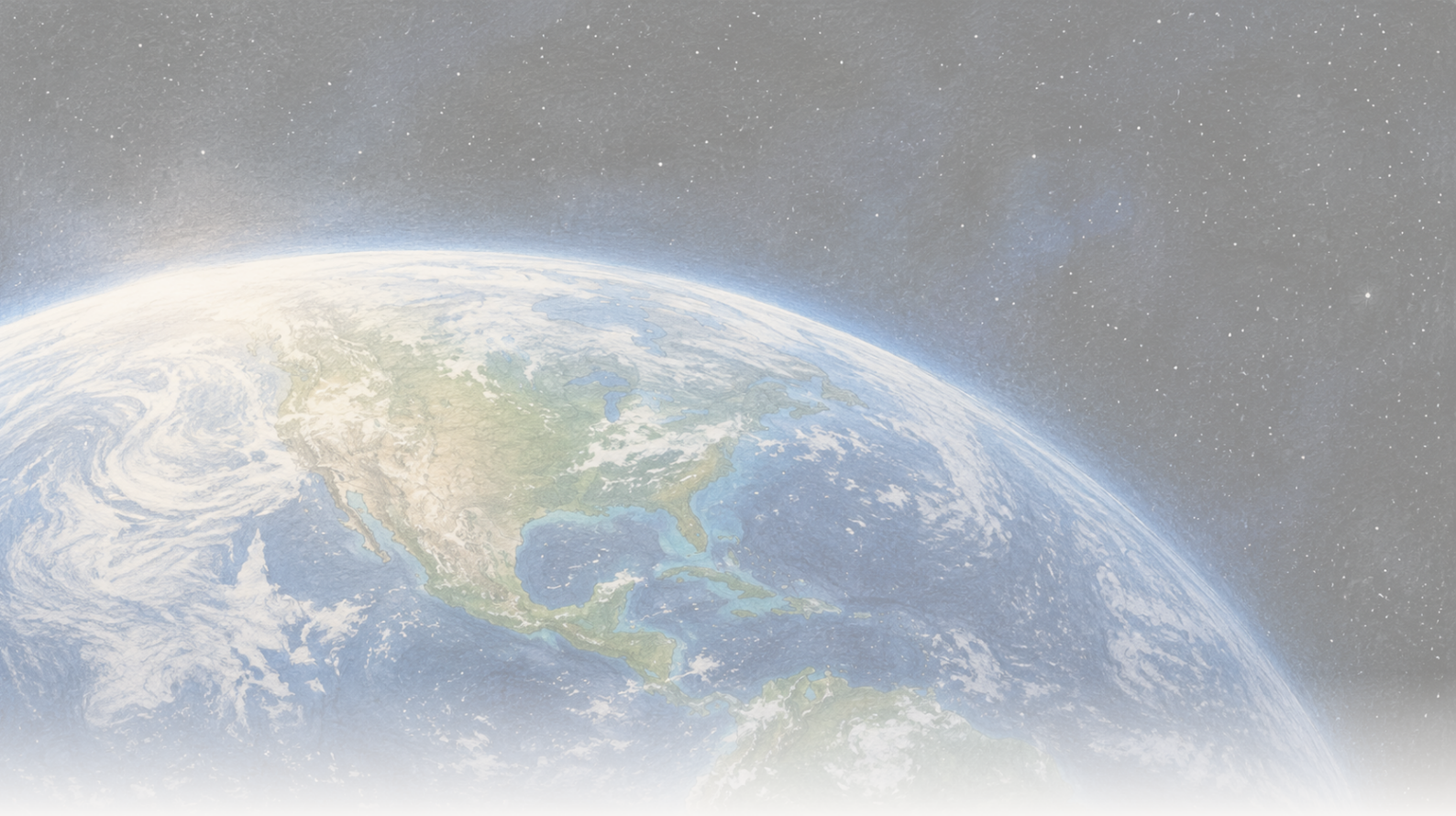




The CLEAN PAPER

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

زمین تا چه مدت می‌تواند سبز بماند؟ یک مدل اقلیمی بازه می‌دهد، نه تاریخ آخرالزمان

یست‌ونه شبیه‌سازی اقلیمی سه‌بعدی، بسته به فرض‌ها، محدودیت‌های متفاوتی برای زیست کره فتوسنتزی زمین در بازه‌ای تقریباً میان 35.1 تا 87.1 میلیارد سال از امروز قرار می‌دهند. این مقادیر به مسیرهای عمداً ساده‌شده برای هوازدگی سنگ‌ها، گرما و پایین‌ترین سطح دی‌اکسید کربنی که گیاهان شاید بتوانند استفاده کنند وابسته‌اند. آن‌ها پیش‌بینی نمی‌کنند همه گیاهان، همه حیات، تمدن یا خود سیاره چه زمانی پایان خواهند یافت.

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 Wofl, Journal of Geophysical Research: Atmospheres
131 e2025JD045586 (2026) · DOI: 1029/2025JD045586.10

زمین تا چه مدت می‌تواند سبز بماند؟ یک مدل اقلیمی بازه می‌دهد، نه تاریخ آخرازمان

یک برگ در چارچوب توافقی باریک زنده می‌ماند. به نور، آب، دی‌اکسید کربن و دمایی نیاز دارد که شیمی آن بتواند تحمل کند. در طول عمر یک انسان، خورشید بخش تقریباً ثابت این توافق به نظر می‌رسد. در مقیاس یک میلیارد سال، چنین نیست.

خورشید با پیر شدن روی رشته اصلی به آرامی پرنورتر می‌شود. نور بیشتر، زمین را گرم می‌کند، اما سیاره پاشنی بلندمدت دارد: واکنش میان آب باران، دی‌اکسید کربن و سنگ‌های سیلیکاتی می‌تواند دی‌اکسید کربن را از جو خارج کند. این کار اثر گلخانه‌ای را ضعیف می‌کند و بخشی از گرم شدن را خنثی می‌سازد. اما همان پاشنی که سیاره را خنک می‌کند، در نهایت می‌تواند جانداران فتوسنتزکننده را از کربنی که برای ساخت بافت زنده به آن نیاز دارند محروم کند.

یک مقاله تازه در *Atmospheres Research: Geophysical of Journal* می‌پرسد کدام محدودیت ممکن است زودتر برسد: گرمای بیش از حد، یا دی‌اکسید کربن بسیار کم. پاسخ آن تاریخی برای «مرگ زمین» نیست. در دو مسیر آینده که عمداً ساده‌سازی شده‌اند، محدودیت‌های فرض شده برای حیات فتوسنتزی تقریباً بین 35.1 تا 87.1 میلیارد سال از امروز قرار می‌گیرند.

این بازه درباره زیست کره گیاهی است: بخشی از سامانه زنده زمین که با جانداران فتوسنتزکننده پایدار می‌ماند، به‌ویژه گیاهان و دیگر موجوداتی که نور و دی‌اکسید کربن را به ماده زیستی تبدیل می‌کنند. این پیش‌بینی برای همه میکروب‌ها نیست. عمر تمدن انسانی نیست. عمر خود سیاره هم نیست.

ترموستات سیاره دو تنظیم نامطمئن دارد

عدم قطعیت اصلی هوازدگی سیلیکات‌ها است. دی‌اکسید کربن در آب باران حل می‌شود، با سنگ‌های سیلیکاتی واکنش می‌دهد و در نهایت به سوی اقیانوس‌ها و رسوبات حمل می‌شود. آتشفشان‌ها در مقیاس زمانی زمین‌شناختی دوباره دی‌اکسید کربن را به جو بازمی‌گردانند. این فرایندها در کنار هم بخشی از چرخه کربنات-سیلیکات را تشکیل می‌دهند که اغلب به‌عنوان ترموستات سیاره‌ای توصیف می‌شود.

در جهانی گرم‌تر و مرطوب‌تر، هوازدگی ممکن است سریع‌تر شود و دی‌اکسید کربن را با سرعت بیشتری از جو بگیرد. اما دانشمندان نمی‌دانند این پاسخ در آینده، زیر خورشیدی پرنورتر، تا چه اندازه بر اقلیم زمین مسلط خواهد بود. به همین دلیل Haqq-Misra Jacob و Wofl Eric یک مسیر را به‌عنوان مسیر «درست» انتخاب نکردند. آن‌ها دو حالت حدی را مدل کردند: دو حالت عمداً افراطی برای محصور کردن عدم قطعیت.

- در حالت حدی هوازدگی ضعیف، دی‌اکسید کربن جو در 400 قسمت در میلیون ثابت می‌ماند، در حالی که خورشید پرنورتر دما را بالا می‌برد.
- در حالت حدی هوازدگی قوی، میانگین جهانی دمای سطح در 288 کلوین، حدود 15 درجه سلسیوس، ثابت نگه داشته می‌شود و با افزایش نور خورشید، دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

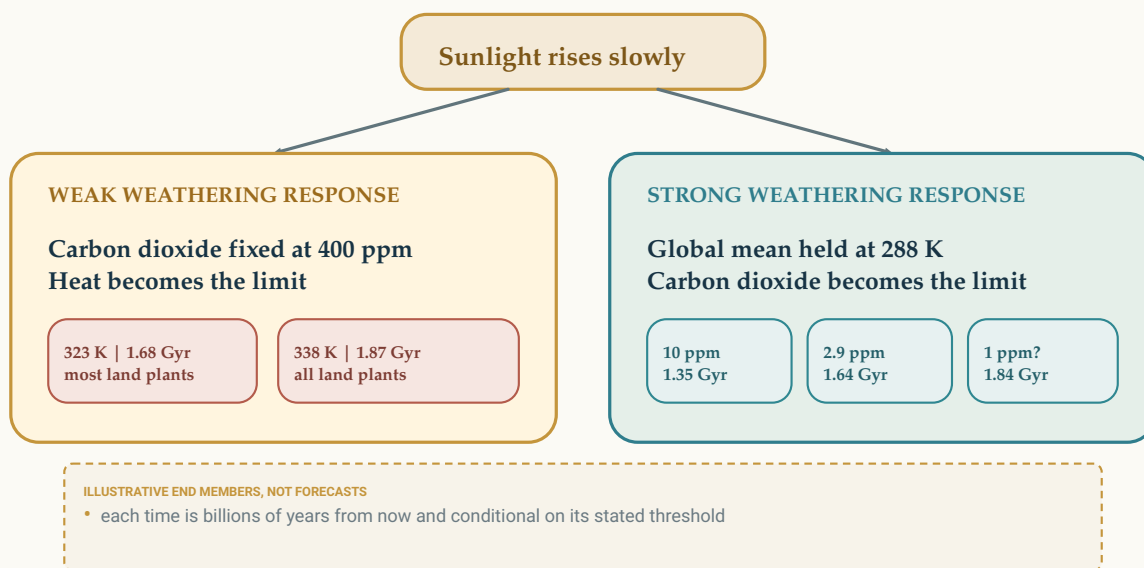
هیچ کدام از این شاخه‌ها به‌عنوان آینده واقعی زمین ارائه نشده‌اند. اولی می‌پرسد اگر دی‌اکسید کربن بالا بماند، گرما چه خواهد کرد. دومی می‌پرسد اگر هوازدگی دمای میانگین جهانی را نزدیک مقدار امروز نگه دارد، کمبود کربن چه اثری خواهد داشت.

هوازدگی چگونه می‌تواند مانند ترموستات عمل کند؟

کربن دی‌اکسید می‌کند، سریع‌تر را شیمیایی هوازدگی گرم‌تر اقلیم وقتی واقعی. تنظیم پیچ یک نه است، بازخورد درباره تشبیه این گرم‌شدن از بخشی برابر در گلخانه‌ای گاز این حذف درآورد. رسوبات و کانی‌ها حل‌شده، مواد از سر می‌تواند جواز بیشتری باز می‌گرداند. را کربن دی‌اکسید دوباره آتشفشانی گازدهی بلند، بسیار زمانی مقیاس‌های در می‌کند. عمل اولیه قدرت هر حلقه به بارش، سنگ‌های در معرض هوا، فرسایش، زیست‌شناسی، زمین‌ساخت و شیمی اقیانوس بستگی دارد. به همین دلیل مقاله پاسخ‌های حدی را آزمایش می‌کند، نه این که با ترموستات به‌عنوان ماشینی شناخته‌شده برخورد کند.

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

مقاله آینده نامطمئن را با دو حالت حدی نمونه محصور می‌کند. اگر هوازدگی پاسخ ضعیفی داشته باشد، افزایش گرما به آستانه‌های فرض شده برای گیاهان خشکی می‌رسد. اگر پاسخ هوازدگی قوی باشد، کاهش دی‌اکسید کربن به آستانه‌های فرض شده فتوسنتز می‌رسد. این‌ها شاخه‌های شرطی مدل هستند، نه احتمال‌ها یا شمارش معکوس تا یک تاریخ مشخص.

The Clean Paper CC BY 0.4

بیست‌ونه جهان مدل‌شده پایدار، نه یک فیلم دو میلیارد ساله

پژوهشگران از ExoCAM، یک مدل اقلیمی جهانی سه‌بعدی، استفاده کردند تا 29 اقلیم حالت پایدار را در ترکیب‌های مختلف نور خورشید بیشتر و دی‌اکسید کربن کمتر محاسبه کنند. هر حالت برای 70 سال مدل اجرا شد. در این‌جا یک سال مدل یعنی یک چرخه سالانه شبیه‌سازی شده در شرایط ثابت: زمان اجرای لازم برای رسیدن اقلیم مصنوعی به حالت پایدار است، نه یک گام از پیش‌بینی سال به سال آینده زمین. پس از آن که اقلیم شبیه‌سازی شده فرصت یافت پایدار شود، 20 سال پایانی میانگین‌گیری شدند.

این 29 حالت، جهان‌های مدل‌شده جداگانه‌اند. هر اجرا یک نقطه از یک شبکه است و به این پرسش پاسخ می‌دهد: «برای این جفت انتخابی از نور خورشید و دی‌اکسید کربن، چه اقلیم پایداری به دست می‌آید؟» رایانه از زمین امروز شروع نکرد و سپس جو، سنگ‌ها، اقیانوس‌ها و موجودات زنده را به‌طور پیوسته برای دو میلیارد سال آینده تکامل نداد. نویسندگان در عوض دو مسیر شماتیک هوازگی را میان این نقاط از پیش محاسبه‌شده دنبال کردند؛ خود مسیر بین نقاط شبیه‌سازی نشده بود.

جدول، ترکیب‌های نور خورشید و دی‌اکسید کربن موجود در آرشیو رسمی داده‌های مدل را بازتولید می‌کند. شناسه‌های حالت برای آسان‌تر شدن خواندن و مطابق ترتیب آرشیو در این جا افزوده شده‌اند. S/S_0 ثابت خورشیدی نسبی است: انرژی خورشیدی ورودی مورد استفاده در مدل تقسیم بر مقدار امروزی آن، S_0 . بنابراین مقدار 2.1 یعنی 20 درصد انرژی خورشیدی ورودی بیشتر از امروز. CO_2 (ppm) نسبت اختلاط دی‌اکسید کربن جو بر حسب تعداد مولکول در هر یک میلیون مولکول جو است.

شناسه حالت	S/S_0	CO_2 (ppm)
1	0.1	400
2	0.1	180
3	0.1	25.11
4	0.1	40625.1
5	0.44.1	400
6	0.44.1	180
7	0.44.1	135
8	0.44.1	25.11
9	0.44.1	40625.1
10	0.81.1	400
11	0.81.1	180
12	0.81.1	25.11
13	0.81.1	40625.1
14	0.91.1	400
15	0.91.1	180
16	0.91.1	34
17	0.91.1	25.11
18	0.91.1	40625.1
19	1.43.1	400
20	1.43.1	180
21	1.43.1	25.11
22	1.43.1	6
23	1.43.1	40625.1
24	2.1	400
25	2.1	180
26	2.1	25.11
27	2.1	40625.1
28	2.1	45.0
29	2.1	0

زمین مدل‌شده قابل تشخیص است، اما عمداً محدود شده است. اندازه‌اش مانند زمین است و از جغرافیای امروزی استفاده می‌کند. به‌جای اقیانوسی با گردش کامل، اقیانوس لایه‌ای ساده‌شده دارد؛ فشار جو تقریباً برابر مقدار کنونی زمین (یک بار) تنظیم شده و متان ثابت است. مدار کاملاً دایره‌ای است (خروج از مرکز صفر) و محور چرخش هیچ میل محوری ندارد (انحراف محوری صفر). خاک،

پوشش گیاهی یا بازخورد ناشی از تغییر زیست کره به طور صریح در آن وجود ندارد. مهم تر از همه، مدل اقلیمی به طور پویا به مدل هوازدگی سنگ ها متصل نیست. به بیان دیگر، ExoCAM هوازدگی را محاسبه نمی کند، سپس با آن دی اکسید کربن را به روز نمی کند و بعد اقلیم بعدی را در یک حلقه بازخوردی اجرا نمی کند. پژوهشگران در عوض دو مسیر حدی را از پیش تعیین کردند و آن ها را در شبکه 29 حالت اقلیمی دنبال کردند.

«حالت پایدار» در مدل اقلیمی یعنی چه؟

درون آب و هوا برسد. تثبیت شده نسبتاً وضعیت به انتخابی جو و خورشید یک زیر شده داده اجازه که اقلیمی یعنی پایدار حالت ندارند. شدید رانش دیگر بلندمدت میانگین های اما می کند، تغییر دیگر سال به سالی و دیگر روز به روزی از همچنان شبیه سازی این روش برای پرسیدن «چه اقلیمی با این شرایط سازگار است؟» مفید است. اما با پیش بینی مسیر دقیق حرکت زمین واقعی از یک مجموعه شرایط به مجموعه بعدی تفاوت دارد.

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

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

29 SEPARATE CASES

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	

EACH CASE

70 model years

Final 20 years averaged
after the climate settles

SNAPSHOTS, NOT A CONTINUOUS TWO-BILLION-YEAR SIMULATION

- the future paths are traced schematically through separate settled climates

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

هر کاشی یک اجرای جداگانه ExoCAM است که 70 سال مدل ادامه یافته و 20 سال پایانی آن میانگین گیری شده است. مطالعه 29 اقلیم پایدار را در شرایط از پیش تعیین شده نور خورشید و دی اکسید کربن نمونه برداری کرد؛ یک زمین واحد را که به طور پیوسته طی دو میلیارد سال تکامل یابد شبیه سازی نکرد.

The Clean Paper CC BY 0.4

حالت حدی اول: دی اکسید کربن کافی، گرمای بیش از حد

در شاخه هوازدگی ضعیف، دی اکسید کربن در 400 قسمت در میلیون ثابت می ماند. با افزایش انرژی خورشیدی، گرما به عامل محدودکننده تبدیل می شود.

مقاله از دو آستانه میانگین جهانی دما که از پژوهش‌های قبلی گرفته شده‌اند استفاده می‌کند:

- در 323 کلون، یعنی حدود 50 درجه سلسیوس به‌عنوان میانگین سالانه جهانی، جهان برای بیشتر گیاهان خشکی بیش از حد گرم در نظر گرفته می‌شود. مدل این آستانه را حدود 68.1 میلیارد سال دیگر می‌رسد.
- در 338 کلون، یعنی حدود 65 درجه سلسیوس به‌عنوان میانگین سالانه جهانی، جهان برای همه گیاهان خشکی بیش از حد گرم در نظر گرفته می‌شود. مدل این آستانه را حدود 87.1 میلیارد سال دیگر می‌رسد.

این‌ها محدودیت‌های زیستی پذیرفته‌شده برای مدل‌اند، نه دماهای جهان‌شمولی که در آن‌ها همه جانداران فتوسنتزکننده الزاماً از کار می‌افتند. میانگین جهانی تفاوت‌های منطقه‌ای بزرگ را نیز پنهان می‌کند. مطالعه جداگانه بررسی می‌کند کجا ترکیب دما و آب ممکن است همچنان مناسب بماند، اما برچسب روی یک نقشه اقلیمی نمی‌تواند همه پناهگاه‌های احتمالی یا سازگاری‌های آینده را فهرست کند.

حالت حدی دوم: دمای قابل تحمل، دی‌اکسید کربن بسیار کم

در شاخه هوازدگی قوی، میانگین جهانی دمای سطح در 288 کلون، حدود 15 درجه سلسیوس، ثابت نگه داشته می‌شود و دی‌اکسید کربن جو کاهش می‌یابد. در این‌جا پاسخ به این بستگی دارد که مسیرهای مختلف فتوسنتزی تا چه حد می‌توانند با کربن کم کار کنند.

- با آستانه سنتی 10 قسمت در میلیون – یعنی 10 مولکول دی‌اکسید کربن به ازای هر یک میلیون مولکول جو – محدودیت برای فتوسنتز C4 حدود 35.1 میلیارد سال دیگر فرا می‌رسد. فتوسنتز C4 در گیاهانی مانند ذرت و نیشکر به کار می‌رود و دی‌اکسید کربن را پیرامون آزمایی که کربن را تثبیت می‌کند متمرکز می‌سازد.
- استفاده از آستانه جایگزین 9.2 قسمت در میلیون برای C4 که در پژوهش‌های پیشین مطرح شده، زمان را به حدود 64.1 میلیارد سال می‌برد.
- آستانه آزمایشی 1 قسمت در میلیون که با امکان باقی‌ماندن بعضی گیاهان CAM – گیاهانی با متابولیسم اسید کراسولاسه که جذب دی‌اکسید کربن در شب را از استفاده آن در روز جدا می‌کنند – یا گیاهان آبری قادر به استفاده از بی‌کربنات حل‌شده مرتبط است، زمان را به حدود 84.1 میلیارد سال می‌رساند.

عدد آخر بزرگ‌ترین احتیاط زیستی را دارد. نویسندگان صریحاً آستانه یک قسمت در میلیون را موقتی و فرضی می‌نامند. این یک آستانه بقای تجربی و تثبیت‌شده برای همه گیاهان CAM یا پوشش گیاهی آبری در شرایط آینده زمین نیست.

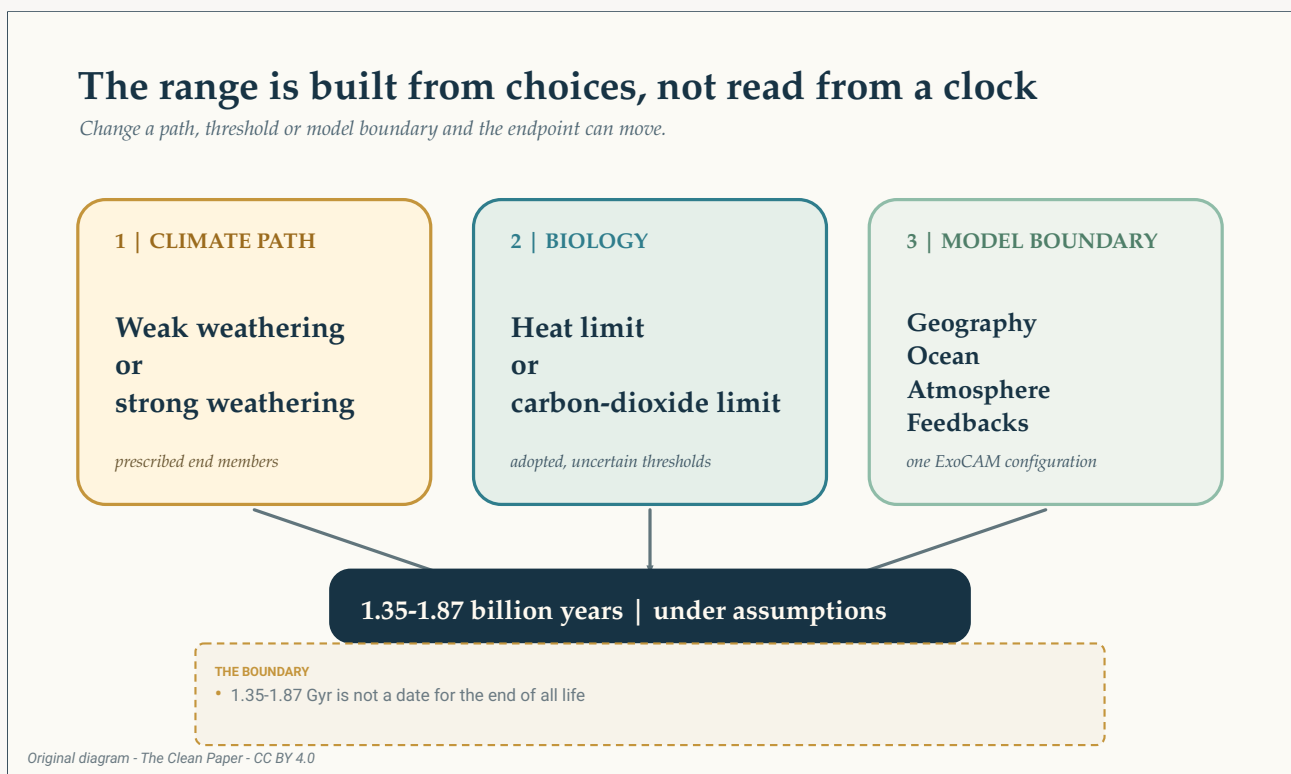
، C3، C4 و CAM پله‌های یک نردبان نیستند، بلکه راهبردها

گیاهانی در که C4 فتوسنتز است. نوع رایج‌ترین C3 فتوسنتز دارند. کربن گرفتن برای متفاوتی زیست‌شیمیایی مسیرهای گیاهان دی‌اکسید کمبود شرایط در و می‌کند متمرکز کربن تثبیت‌کننده آنزیم پیرامون را کربن دی‌اکسید می‌شود، دیده نیشکر و ذرت مانند و می‌کند جدا روز و شب میان را کربن از استفاده و جذب (CAM) کراسولاسه اسید متابولیسم کند. عمل بهتر می‌تواند کربن می‌کند. کمک آب حفظ در گیاهان از بسیاری به این‌ها خانواده‌هایی از راهبردها با تفاوت‌های فراوان در سطح گونه‌اند، نه رتبه‌های پیاپی از گیاهان «بهتر». آستانه‌های بسیار پایین دی‌اکسید کربن در مقاله فرض‌هایی برای بررسی محدودیت‌های ممکن‌اند، نه تضمین این که یک اکوسیستم آینده برای استفاده از آن‌ها تکامل پیدا خواهد کرد.

چرا 86.1 میلیارد سال تاریخ انقضا نیست؟

برآورد شاخص مقاله، یعنی حدود 86.1 میلیارد سال، میانگین دو نقطه پایانی خوش بینانه است: 84.1 میلیارد سال در شاخه محدود شده با دی اکسید کربن و 87.1 میلیارد سال در شاخه محدود شده با گرما. این فقط خلاصه ای فشرده از دو سناریوی متفاوت است. نتیجه سوم مدل با دقت بیشتر نیست و بهترین برآورد زمانی هم محسوب نمی شود.

حتی بازه گسترده تر 35.1 تا 87.1 میلیارد سال نیز یک احتمال واحد ندارد. حد پایین و بالای آن به فرض های متفاوت هوازدگی، آستانه های زیستی متفاوت و یک پیکربندی مدل اقلیمی وابسته اند. این بازه به همان اندازه که زمان را اندازه می گیرد، انتخاب های آزمایش را نیز منعکس می کند.



سه لایه فرض روی هم به یک بازه شرطی منتهی می شوند: مسیر از پیش تعیین شده هوازدگی، آستانه زیستی پذیرفته شده و مرزهای مدل. نتیجه، 35.1 تا 87.1 میلیارد سال تحت این فرض هاست. یادداشت تأکید می کند که این بازه تاریخ انقراض همه حیات نیست.

The Clean Paper CC BY 0.4

ممکن است محدودیت های دیگری زودتر برسند

طولانی ترین برآوردهای زیست کره گاهی به مرز دیگری نزدیک می شوند که خود نامطمئن است: گلخانه مرطوب یا گلخانه فرار که می تواند به از دست رفتن گسترده اقیانوس ها منجر شود. مدل های اقلیمی درباره زمان آغاز این حالت ها زیر نور خورشیدی رو به افزایش اختلاف زیادی دارند، به ویژه در شرایطی بسیار دور از امروز. برخی برآوردها آن ها را پیش از خوش بینانه ترین محدودیت فتوسنتز قرار می دهند.

بنابراین شاخه بالایی را نمی توان وعده ای دانست که زمین تا 87.1 میلیارد سال دیگر اقیانوس ها، قاره های آشنا یا شرایط سطحی زیست پذیر خود را حفظ خواهد کرد. مدل همچنین زمین ساخت صفحه ای آینده، تغییر مساحت خشکی، اکوسیستم های در حال تکامل یا اقیانوسی

کاملاً پویا را شامل نمی‌شود. محاسبات آن درباره جذب و گسیل انرژی جو نیز به رژیم‌هایی با نور شدید خورشید و دی‌اکسید کربن بسیار کم کشیده می‌شوند که مدل‌های مختلف در آن‌ها از هم فاصله می‌گیرند.

سازگاری تکاملی و مداخله فناورانه در بخش بحث مقاله به عنوان امکان مطرح می‌شوند. آن‌ها خروجی 29 شبیه‌سازی اقلیمی نیستند. مدل نشان نمی‌دهد جانداران آینده واقعاً مسیر فتوسنتزی یک قسمت در میلیون را تکامل می‌دهند، و نشان نمی‌دهد تمدنی بتواند جو را برای یک میلیارد سال مدیریت کند.

این نتیجه درباره بحران اقلیمی امروز نیست

پرنور شدن خورشید طی صدها میلیون تا میلیارد‌ها سال رخ می‌دهد. گرم شدن امروزی ناشی از فعالیت انسان از افزایش سریع گازهای گلخانه‌ای طی دهه‌ها و سده‌ها ناشی می‌شود. این دو نیروی محرک متفاوت‌اند، در مقیاس‌های زمانی کاملاً متفاوت عمل می‌کنند و به پرسش‌های متفاوت پاسخ می‌دهند.

هیچ چیز در این مطالعه شواهد تغییر اقلیم کنونی را تضعیف نمی‌کند و دلیلی برای به تعویق انداختن اقدام ارائه نمی‌دهد. زیست کره‌ای که شاید در یک سناریوی مدل بسیار دور مقداری حیات فتوسنتزی را حفظ کند، همان چیزی نیست که اقلیمی امن برای جوامع و اکوسیستم‌های امروز باشد.

ارزش مقاله در این است که پرسشی بسیار دوردست را منضبط‌تر می‌کند. نشان می‌دهد مدل‌های قدیمی‌تر و ساده‌تر ممکن است هنگام افزایش نور خورشید با ثابت نگه داشتن دی‌اکسید کربن، گرمایش را بیش از حد برآورد کرده باشند و حیات فتوسنتزی شاید راه‌های بیشتری برای دوام آوردن نسبت به یک آستانه کلاسیک کربن داشته باشد. در عین حال نشان می‌دهد هر کسر اضافی از یک میلیارد سال به زنجیره‌ای از فرض‌ها وابسته است.

خورشیدی که به برگ انرژی می‌دهد به آرامی در حال تغییر است. این که زمین 35.1، 87.1 یا عدد دیگری میلیارد سال سبز بماند، به پاسخ مشترک سنگ‌ها، آب، جو و حیات بستگی خواهد داشت. نتیجه صادقانه یک تاریخ نیست؛ تصویری گسترده‌تر از این بده‌بستان است.

خلاصه روشن

یک مطالعه اقلیمی سه‌بعدی می‌پرسد زیست کره گیاهی — یعنی بخش فتوسنتزی — زمین با پرنور شدن تدریجی خورشید تا چه مدت ممکن است دوام بیاورد. پژوهشگران 29 اقلیم حالت پایدار جداگانه محاسبه کردند و دو حالت حدی نمونه را در میان آن‌ها دنبال کردند. با هوازگی ضعیف و دی‌اکسید کربن ثابت در 400 قسمت در میلیون، آستانه‌های گرمایی فرض شده برای گیاهان خشکی حدود 68.1 و 87.1 میلیارد سال دیگر رخ می‌دهند. با هوازگی قوی و میانگین جهانی دما ثابت در 288 کلین، حدود 15 درجه سلسیوس، آستانه‌های دی‌اکسید کربن فرض شده برای فتوسنتز حدود 35.1، 64.1 و — با استفاده از آستانه‌ای موقتی — 84.1 میلیارد سال دیگر رخ می‌دهند. عدد پرتکرار 86.1 میلیارد سال فقط میانگین گردشده دو نقطه پایانی خوش‌بینانه است. این‌ها بازه‌های مدل وابسته به سناریو هستند، نه تاریخ پایان زمین، انسان یا همه حیات. مدل از مسیرهای از پیش تعیین شده، جغرافیای امروزی، اقیانوس لایه‌ای و بدون اتصال صریح خاک-پوشش گیاهی یا اقلیم-هوازگی استفاده می‌کند و طولانی‌ترین برآوردها نیز به مرزهای نامطمئن گلخانه‌ای و از دست رفتن اقیانوس نزدیک می‌شوند.

بررسی بدون اغراق

مقاله چه چیزی نشان می‌دهد: در این پیکربندی، ExoCAM اقلیم‌های سه‌بعدی با افزایش نور خورشید و دی‌اکسید کربن ثابت عموماً کمتر از مدل‌های ساده‌شده مقایسه‌ای گرم می‌شوند. در دو حالت حدی از پیش تعیین‌شده برای هوازگی و چند آستانه زیستی پذیرفته‌شده، محدودیت‌های زیست کره گیاهی تقریباً بین 35.1 تا 87.1 میلیارد سال دیگر قرار می‌گیرند.

چه چیزی معقول اما اثبات‌نشده است: این که برخی گیاهان CAM یا گیاهان آبی استفاده‌کننده از بی‌کربنات حل‌شده بتوانند نزدیک یک قسمت در میلیون دی‌اکسید کربن جو همچنان فتوسنتز کنند؛ این که سازگاری یا فناوری بتواند حیات فتوسنتزی را بیشتر گسترش دهد؛ و این که مسیر واقعی اقلیم-هوازگی میان دو حالت حدی مدل باقی بماند.

چه چیزی نشان داده نشده است: یک تاریخ ثابت برای پایان همه گیاهان، همه حیات، تمدن انسانی، اقیانوس‌های زمین یا خود سیاره؛ یک شبیه‌سازی پیوسته از دو میلیارد سال آینده؛ یا هر دلیل برای کم‌اهمیت شمردن تغییر اقلیم انسان‌ساخت امروز.

محدودیت‌های اصلی: 29 حالت پایدار از یک خانواده مدل اقلیمی؛ مسیرهای هوازگی از پیش تعیین‌شده به‌جای اتصال پویا؛ جغرافیای امروزی؛ اقیانوس لایه‌ای؛ متان ثابت؛ میل محوری و خروج از مرکز صفر؛ نبود خاک، پوشش گیاهی یا بازخورد زیست کره صریح؛ آستانه‌های نامطمئن گرما و دی‌اکسید کربن؛ و اختلاف گسترده مدل‌ها نزدیک شرایط گلخانه مرطوب و فرار.

یک خواننده عمومی تا چه حد باید اطمینان داشته باشد؟ اطمینان بالا که مطالعه دامنه مدل‌های ممکن را گسترش می‌دهد و فرض‌های کنترل‌کننده آن را روشن می‌کند. اطمینان متوسط به بازه عددی به‌عنوان یک چارچوب مفید در همین مدل. اطمینان پایین به هر تاریخ دقیق، زیرا دورترین نقاط پایانی به مسیرهای اقلیمی عمداً افراطی و زیست‌شناسی نامطمئن وابسته‌اند.

منابع

Atmospheres Research: Geophysical of Journal Biosphere, Vegetative the of Lfetime Maximum Wofl, & Haqq-Misra
(2026) e2025JD045586 ,131
<https://doi.org/10.1029/2025JD045586>

16584870 record Zenodo Data, Model Biosphere: Vegetative the of Lfetime Maximum Wofl, & Haqq-Misra
<https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870>