The Clean Paper

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

إلى متى يمكن أن تبقى الأرض خضراء؟ نموذج مناخي يقدّم نطاقات، لا موعدًا لنهاية العالم

تضع تسع وعشرون محاكاة مناخية ثلاثية الأبعاد حدودًا مختلفة للغلاف الحيوي القائم على التمثيل الضوئي على الأرض بين نحو 35.1 و87.1 مليار سنة من الآن. تعتمد القيم على مسارات مبسطة عمدًا لتجوية الصخور والحرارة وأدنى مستويات ثاني أكسيد الكربون التي قد تستطيع النباتات استخدامها. وهي لا تتنبأ بموعد نهاية جميع النباتات أو جميع أشكال الحياة أو الحضارة أو الكوكب.

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 Lfietime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wofl, Journal of Geophysical Research: Atmospheres ,131 e2025JD045586 (2026) · DOI: 1029/2025JD045586.10

إلى متى يمكن أن تبقى الأرض خضراء؟ نموذج مناخي يقدّم نطاقات، لا موعدًا لنهاية العالم

تعيش الورقة النباتية ضمن توازن ضيق. فهي تحتاج إلى الضوء والماء وثاني أكسيد الكربون ودرجة حرارة تستطيع كيمياؤها تحمّلها. وعلى مدى عمر الإنسان يبدو أن الشمس هي الجزء الثابت من هذا التوازن. أما على مدى مليار سنة، فالأمر ليس كذلك.

مع تقدّم الشمس في عمرها على النسق الأساسي، يزداد سطوعها ببطء. ويؤدي ازدياد ضوء الشمس إلى تسخين الأرض، لكن للكوكب استجابة طويلة الأمد: يمكن للتفاعلات بين مياه الأمطار وثاني أكسيد الكربون وصخور السيليكات أن تزيل ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. وهذا يضعف تأثير الاحتباس الحراري ويعادل جزءًا من الاحترار. لكن الاستجابة نفسها التي تبرد الكوكب قد تحرم الكائنات التي تقوم بالتمثيل الضوئي في نهاية المطاف من الكربون الذي تستخدمه لبناء أنسجتها الحية.

تسأل ورقة جديدة في Atmospheres Research: Geophysical of Journal أي الحدّين قد يأتي أولًا: حرارة مفرطة أم كمية غير كافية من ثاني أكسيد الكربون. وإجابتها ليست تاريخًا لموت الأرض. فعبر مسارين مستقبليين مبسطين عمدًا، تقع الحدود المعتمدة للحياة القائمة على التمثيل الضوئي بين نحو **35.1 و87.1 مليار سنة من الآن.**

يتعلق هذا النطاق بـ **الغلاف الحيوي النباتي**: الجزء من منظومة الحياة على الأرض الذي تدعمه الكائنات القائمة بالتمثيل الضوئي، ولا سيما النباتات وأشكال الحياة الأخرى التي تحول الضوء وثاني أكسيد الكربون إلى مادة حيوية. وهو ليس توقعًا لكل ميكروب. وليس عمر الحضارة البشرية. وليس عمر الكوكب.

لمنظّم حرارة الكوكب إعدادان غير مؤكدين

مصدر عدم اليقين المركزي هو **تجوية السيليكات**. يذوب ثاني أكسيد الكربون في مياه الأمطار ويتفاعل مع صخور السيليكات، ثم تُنقل نواتج التفاعل في نهاية المطاف نحو المحيطات والرواسب. وتعيد البراكين ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي على المقاييس الزمنية الجيولوجية. وتشكل هذه العمليات معًا جزءًا من دورة الكربونات والسيليكات، التي توصف غالبًا بأنها منظّم حرارة للكوكب.

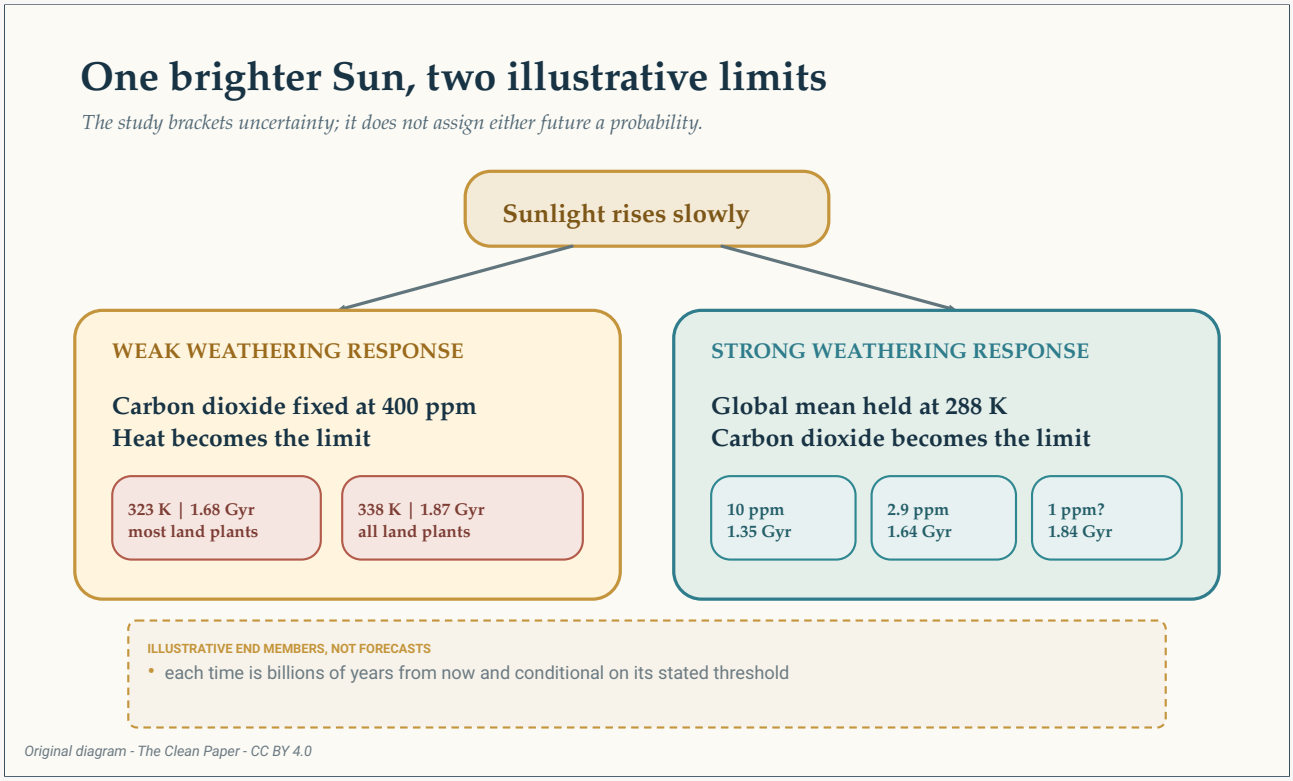
في عالم أكثر دفئًا ورطوبة قد تتسارع التجوية وتزيل ثاني أكسيد الكربون بسرعة أكبر. لكن العلماء لا يعرفون مدى القوة التي ستحكم بها هذه الاستجابة الأرض تحت شمس مستقبلية أكثر سطوعًا. لذلك لم يختر Haqq-Misra Jacob وWofl Eric مسارًا واحدًا يفترض أنه الصحيح. بل نمذجا حالتين **حدّيتين**: حالتين متطرفتين عمدًا تُستخدمان لتطويق نطاق عدم اليقين.

- في **الحالة الحدّية ذات التجوية الضعيفة**، يبقى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عند 400 جزء في المليون، بينما ترفع الشمس المتزايدة السطوع درجة الحرارة.
- في **الحالة الحدّية ذات التجوية القوية**، يبقى متوسط درجة حرارة سطح الأرض عالميًا عند 288 كلفن، أي نحو 15 درجة مئوية، بينما يخفض ثاني أكسيد الكربون مع ازدياد ضوء الشمس.

لا يُعرض أي من الفرعين بوصفه مستقبل الأرض الفعلي. يسأل الأول ماذا ستفعل الحرارة إذا ظل ثاني أكسيد الكربون مرتفعًا. ويسأل الثاني ماذا سيفعل نقص الكربون إذا أبقت التجوية متوسط درجة الحرارة العالمية قريبًا من قيمته الحالية.

كيف يمكن للتجوية أن تعمل كمنظّم حرارة؟

مزيد ينتهي أن يمكن الكيميائية، التجوية دفئًا الأكثر المناخ يسرّع فعندما حقيقي. تحكم بمقبض لا الراجعة، بالتغذية يتعلق التشبيه من جزءًا تعاكس الحراري للاحتباس المسبب الغاز هذا وإزالة والرواسب. والمعادن المذابة المواد في الجوي الكربون أكسيد ثاني من الجوي. الغلاف إلى الكربون أكسيد ثاني البركانية الغازات انبعاث يعيد جدًا الطويلة الزمنية المقاييس وعلى الأصلي. الاحترار تعتمد قوة كل حلقة في هذه السلسلة على الهطول والصخور المكشوفة والتعرية والأحياء والتكتونيات وكيمياء المحيطات. ولهذا تختبر الورقة استجابات حدّية بدلًا من التعامل مع منظّم الحرارة كما لو كان آلة معروفة السلوك.



تطوّق الورقة مستقبلًا غير مؤكد بحالتين حدّيتين توضيحيتين. إذا استجابت التجوية بضعف، تصل الحرارة المتزايدة إلى عتبات معتمدة للنباتات البرية. وإذا استجابت بقوة، يصل انخفاض ثاني أكسيد الكربون إلى عتبات معتمدة للتمثيل الضوئي. هذه فروع نموذجية مشروطة، وليست احتمالات أو تواريخ عدّ تنازلي.

The Clean Paper CC BY 0.4

تسعة وعشرون عالمًا نموذجيًا مستقرًا، لا فيلمًا واحدًا يمتد ملياري سنة

استخدم الباحثان ExoCAM، وهو نموذج مناخ عالمي ثلاثي الأبعاد، لحساب **29 مناخًا في حالة مستقرة** عبر توليفات مختلفة من ضوء شمس أقوى ومستويات أقل من ثاني أكسيد الكربون. شُغّلت كل حالة لمدة 70 سنة نموذجية. وهنا تعني السنة النموذجية دورة سنوية واحدة مُحاكاة تحت شروط ثابتة: إنها مدة تشغيل تُستخدم للسماح للمناخ الاصطناعي بالاستقرار، وليست خطوة في توقع سنة بعد سنة لمستقبل الأرض. وبعد أن أُتيح للمناخ المحاكى وقت للاستقرار، أُخذ متوسط السنوات العشرين الأخيرة.

هذه الحالات التسع والعشرون عوالم نموذجية منفصلة. كل تشغيل هو نقطة واحدة في شبكة، يجيب عن السؤال: «أي مناخ مستقر يلائم هذا الزوج المختار من ضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون؟». لم يبدأ الحاسوب بأرض اليوم ثم يطوّر غلافها الجوي وصخورها ومحيطاتها وكائناتها الحية بصورة مستمرة على مدى المليارى سنة القادمتين. وبدلًا من ذلك تتبع الباحثان مساري التجوية التخطيطيين عبر هذه النقاط المحسوبة مسبقًا، أما المسار بين النقاط فلم تتم محاكاته بحد ذاته.

يعيد الجدول أدناه عرض توليفات ضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون الموجودة في أرشيف بيانات النموذج الرسمي. أُضيفت معرفات الحالات هنا لتسهيل القراءة، وبترتيب الأرشيف. تمثل **S/S0** الثابت الشمسي النسبي: الطاقة الشمسية الواردة المستخدمة في النموذج مقسومة على قيمتها الحالية .S0 لذلك تعني القيمة 2.1 طاقة شمسية واردة أعلى بنسبة 20 بالمئة من اليوم. وتمثل **CO2 (ppm)** نسبة خلط ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بوحدة الجزيئات لكل مليون جزيء من الغلاف الجوي.

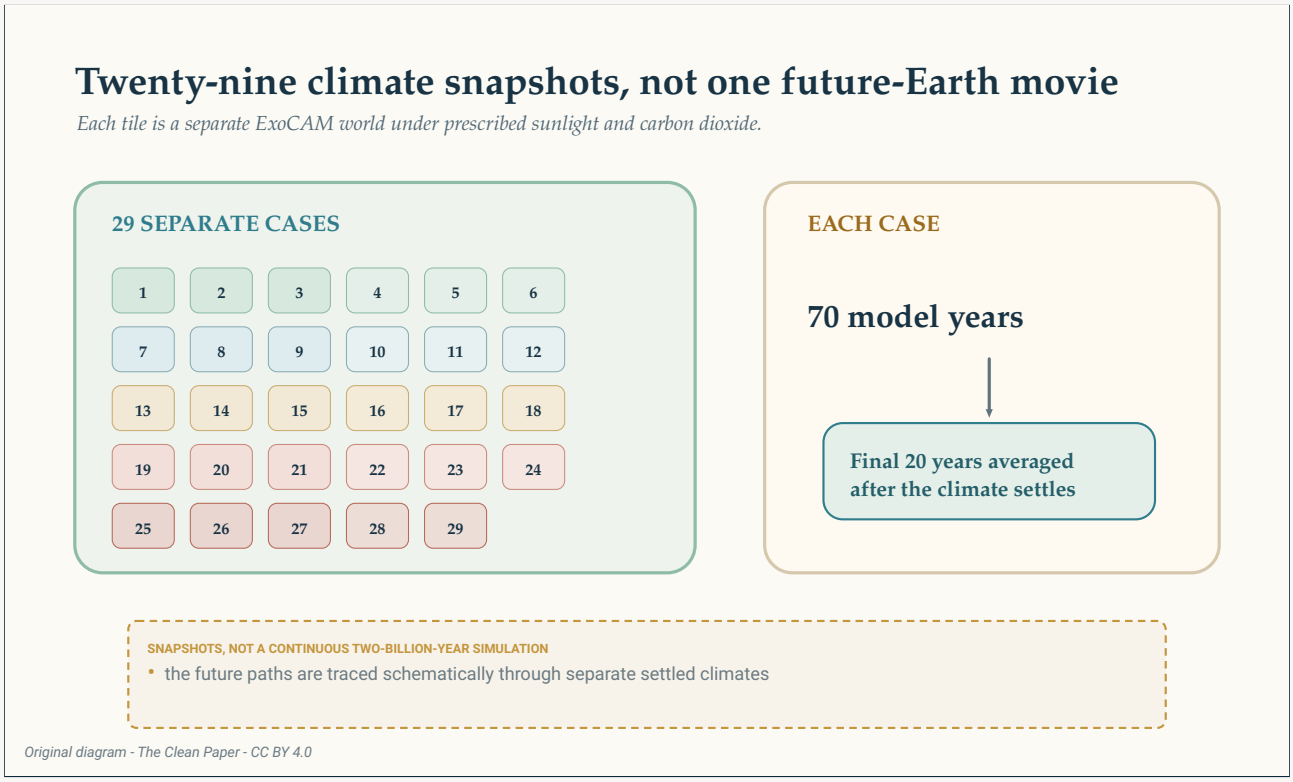
معرف الحالة	S/S0	CO2 (ppm)
1	0.1	400
2	0.1	180
3	0.1	25.11
4	0.1	40625.1
5	044.1	400
6	044.1	180
7	044.1	135
8	044.1	25.11
9	044.1	40625.1
10	081.1	400
11	081.1	180
12	081.1	25.11
13	081.1	40625.1
14	091.1	400
15	091.1	180
16	091.1	34
17	091.1	25.11
18	091.1	40625.1
19	143.1	400
20	143.1	180
21	143.1	25.11
22	143.1	6
23	143.1	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

الأرض في النموذج يمكن التعرف إليها، لكنها محدودة عمدًا. فهي بحجم الأرض وتستخدم الجغرافيا الحالية. ولديها محيط مبسط من نوع «slab ocean» بدلًا من محيط ذي دوران كامل، وضغط جوي مضبوط تقريبًا على القيمة الحالية للأرض، أي بار واحد، وكمية ميثان ثابتة.

مدارها دائري تمامًا، أي بانحراف مداري صفري، ومحور دورانها بلا ميل، أي بميل محوري صفري. ولا يتضمن النموذج تربة أو غطاء نباتيًا صريحين، ولا تغذية راجعة من غلاف حيوي متغير. والأهم أن نموذج المناخ غير مقترن ديناميكيًا بنموذج لتجوية الصخور. وبعبارة أخرى، لا يحسب ExoCAM التجوية ثم يستخدمها لتحديث ثاني أكسيد الكربون ثم يشغّل المناخ التالي في حلقة تغذية راجعة. وبدلًا من ذلك حدّد الباحثان مسبقًا المسارين الحدّيين وتتبعاهما عبر شبكة المناخ المكوّنة من 29 حالة.

ماذا تعني «الحالة المستقرة» في نموذج مناخي؟

ومن يوم إلى يوم من يتغير الطقس يظل مختارين. جوي وغلاف شمس تحت بالاستقرار له يُسمح نموذجي مناخ هي الاستقرار حالة بقوة. الانجراف عن تتوقف الأمد طويلة متوسطاته لكن المحاكاة، داخل أخرى إلى سنة
هذا مفيد لطرح السؤال: «أي مناخ يلائم هذه الشروط؟». لكنه يختلف عن توقع المسار الدقيق الذي تنتقل عبره الأرض الحقيقية من مجموعة شروط إلى أخرى.



كل مربع يمثل تشغيلًا منفصلًا لمناخ ExoCAM لمدة 70 سنة نموذجية، مع أخذ متوسط السنوات العشرين الأخيرة. أخذت الدراسة عينات من 29 مناخًا مستقرًا عبر شروط محددة مسبقًا لضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون، ولم تحاكِ أرضًا واحدة تتطور بصورة مستمرة على مدى ملياري سنة.

The Clean Paper CC BY 0.4

الحالة الحدّية الأولى: ثاني أكسيد كربون كافٍ، لكن حرارة مفرطة

في فرع التجوية الضعيفة يبقى ثاني أكسيد الكربون ثابتًا عند 400 جزء في المليون. ومع ازدياد الطاقة الشمسية الواردة تصبح الحرارة هي العامل المحدِّد.

تستخدم الورقة عتبتين لمتوسط درجة الحرارة العالمية مأخوذتين من أعمال سابقة:

- عند **323 كلفن**، أي نحو **50 درجة مئوية** كمتوسط سنوي عالمي، يُعامل العالم على أنه شديد الحرارة بالنسبة إلى معظم النباتات البرية. ويصل النموذج إلى هذه العتبة بعد نحو **68.1 مليار سنة**.
- عند **338 كلفن**، أي نحو **65 درجة مئوية** كمتوسط سنوي عالمي، يُعامل العالم على أنه شديد الحرارة بالنسبة إلى جميع النباتات البرية. ويصل النموذج إلى هذه العتبة بعد نحو **87.1 مليار سنة**.

هذه حدود بيولوجية معتمدة في الدراسة، وليست درجات حرارة كونية يفشل عندها بالضرورة كل كائن يقوم بالتمثيل الضوئي. كما أن المتوسط العالمي يخفي اختلافات إقليمية كبيرة. وتفحص الدراسة بصورة منفصلة الأماكن التي قد تبقى فيها توليفات الحرارة والماء ملائمة، لكن تسمية على خريطة مناخية لا تستطيع حصر كل ملجأ مستقبلي أو كل تكيف محتمل.

الحالة الحدّية الثانية: حرارة محتملة، لكن ثاني أكسيد كربون قليل جدًا

في فرع التجوية القوية يُحافَظ على متوسط درجة حرارة السطح العالمية عند 288 كلفن، أي نحو 15 درجة مئوية، بينما ينخفض ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وهنا تعتمد الإجابة على أقل كمية من الكربون قد تستطيع مسارات التمثيل الضوئي المختلفة استخدامها.

- عند العتبة التقليدية البالغة **10 أجزاء في المليون** — أي 10 جزيئات من ثاني أكسيد الكربون لكل مليون جزيء من الغلاف الجوي — يصل الحد الخاص بالتمثيل الضوئي من نوع C4 بعد نحو **35.1 مليار سنة**. تستخدم نباتات منها الذرة وقصب السكر التمثيل الضوئي C4، وهو يركز ثاني أكسيد الكربون حول الإنزيم الذي يثبته.
- استخدام عتبة بديلة قدرها **9.2 جزء في المليون** لـC4، نوقشت في أعمال سابقة، يؤخر هذا الحد إلى نحو **64.1 مليار سنة**.
- أما عتبة **1 جزء في المليون** المؤقتة، المرتبطة باحتمال استمرار بعض نباتات CAM — أي النباتات التي تستخدم أيض حمض الكراسولاسين، الذي يفصل التقاط ثاني أكسيد الكربون ليلًا عن استخدامه نهارًا — أو النباتات المائية القادرة على استخدام البيكربونات المذابة، فتؤخر الحد إلى نحو **84.1 مليار سنة**.

يرتبط بالرقم الأخير أكبر تحفظ بيولوجي. فالمؤلفان يصفان صراحة حد الجزء الواحد في المليون بأنه مؤقت. وهو ليس عتبة بقاء مثبتة تجريبيًا لجميع نباتات CAM أو للنباتات المائية تحت ظروف الأرض المستقبلية.

C3 وC4 وCAM استراتيجيات وليست درجات على سلم

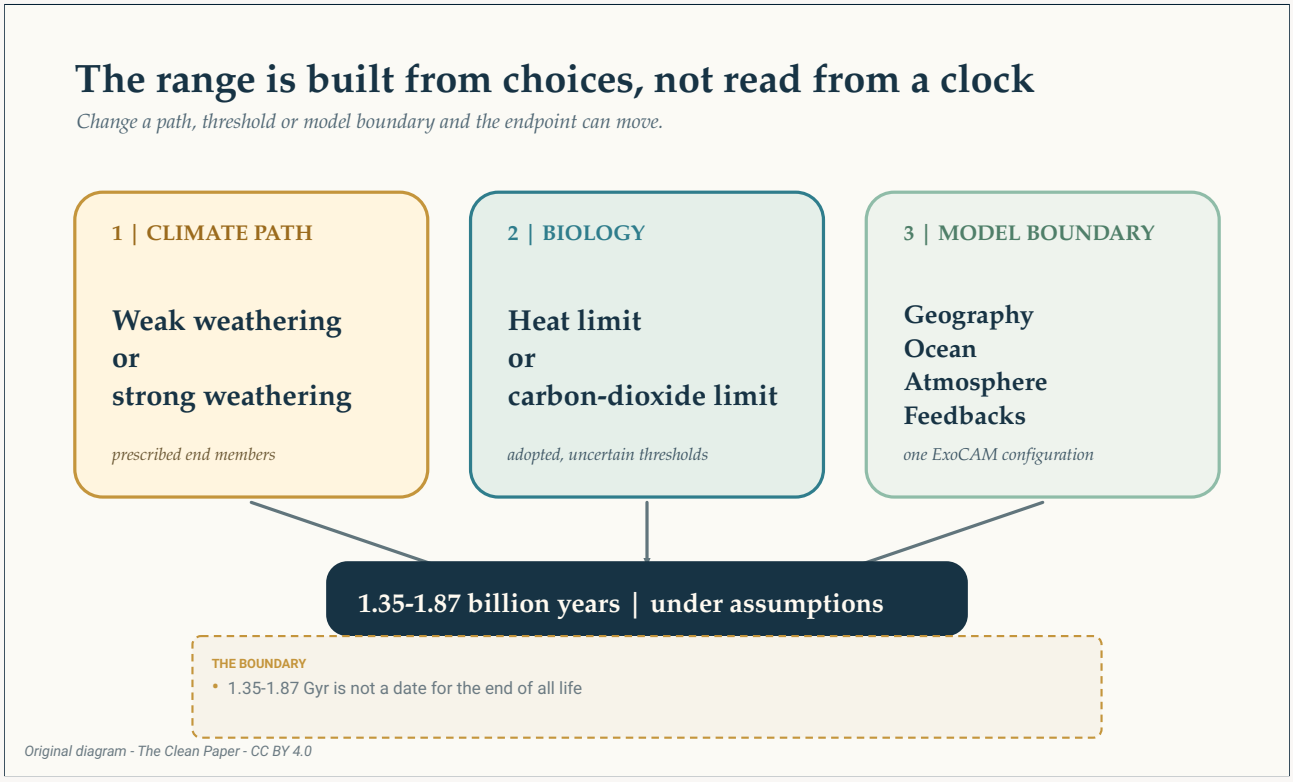
C3 الضوئي التمثيل أما شيوعًا. الأكثر هو **C4**، الضوئي التمثيل الكربون. لالتقاط مختلفة حيوية كيميائية مسارات النباتات تستخدم بصورة يعمل أن ويمكن الكربون يثبت الذي الإنزيم حول الكربون أكسيد ثاني فيركز السكر، وقصب الذرة منها نباتات تستخدمه الذي بين استخدامه عن الكربون التقاط **(CAM) الكراسولاسين حمض أيض** ويفصل نادرًا. الكربون أكسيد ثاني يكون عندما أفضل

الماء. حفظ على النباتات من كثيرًا يساعد مما والنهار، الليل
هذه عائلات من الاستراتيجيات، وبين الأنواع داخلها اختلافات كثيرة، وليست رتبًا متعاقبة لنباتات «أفضل». إن عتبات ثاني أكسيد الكربون المنخفضة جدًا في الورقة افتراضات لاستكشاف حدود محتملة، وليست ضمانًا بأن نظامًا بيئيًا مستقبليًا سيتطور لاستخدامها.

لماذا لا يمثل 86.1 مليار سنة تاريخ انتهاء صلاحية

التقدير البارز في الورقة، البالغ نحو **86.1 مليار سنة**، هو متوسط النهايتين العلويتين المتفائلتين: 84.1 مليار سنة في الفرع المحدود بثاني أكسيد الكربون و87.1 مليار سنة في الفرع المحدود بالحرارة. إنه تلخيص مضغوط لسيناريوهين مختلفين. وليس نتيجة نموذجية ثالثة ذات دقة أعلى، وليس تاريخًا يُعد أفضل تقدير.

وحتى النطاق الأوسع، من 35.1 إلى 87.1 مليار سنة، لا يحمل احتمالًا واحدًا. فقيمتاه الدنيا والعليا تعتمدان على افتراضات مختلفة للتجوية وعتبات بيولوجية مختلفة وإعداد واحد لنموذج المناخ. ويقيس هذا النطاق اختيارات التجربة بقدر ما يقيس الزمن.



لا يظهر النطاق من 35.1 إلى 87.1 مليار سنة إلا بعد اختيار مسار للتجوية وعتبة بيولوجية وحدود للنموذج. إنه خريطة للافتراضات، لا ساعة تنتهي بانقراض جميع أشكال الحياة.

The Clean Paper CC BY 0.4

قد تصل حدود أخرى أولًا

تقترب أطول تقديرات عمر الغلاف الحيوي النباتي من حد منفصل وغير مؤكد: احتباس حراري رطب أو جامح قد يؤدي إلى فقدان كبير للمحيطات. وتختلف نماذج المناخ اختلافًا واسعًا في توقيت بدء هذه الحالات مع ازدياد ضوء الشمس، ولا سيما بعيدًا عن ظروف الحاضر. وتضع بعض التقديرات حدوثها قبل أكثر حدود التمثيل الضوئي تفاؤلًا.

وهذا يعني أن الفرع العلوي لا يمكن قراءته بوصفه وعدًا بأن الأرض ستحتفظ بمحيطاتها وقاراتها المألوفة أو بشروط سطح صالحة للسكن حتى 87.1 مليار سنة من الآن. كما أن النموذج لا يتضمن تكتونيات الصفائح المستقبلية أو تغيرات مساحة اليابسة أو النظم البيئية المتطورة أو محيطًا كامل الديناميكية. كذلك تُدفع حساباته لكيفية امتصاص الغلاف الجوي للطاقة وإشعاعها إلى أنظمة ذات ضوء شمسي شديد وثاني أكسيد كربون بالغ الانخفاض، وهي مناطق تتباعد فيها النماذج المختلفة.

يظهر التكيف التطوري والتدخل التكنولوجي في مناقشة الورقة بوصفهما احتمالين. لكنهما ليسا من مخرجات المحاكيات المناخية التسع والعشرين. فالنموذج لا يُظهر كائنات مستقبلية تطور مسارًا للتمثيل الضوئي يعمل عند جزء واحد في المليون، ولا يُظهر حضارة تدير الغلاف الجوي لمليار سنة.

هذه ليست نتيجة عن أزمة المناخ الحالية

يعمل ازدياد سطوع الشمس على مدى مئات الملايين إلى مليارات السنين. أما الاحترار الحديث الناتج عن البشر فيأتي من الارتفاع السريع في غازات الاحتباس الحراري خلال عقود وقرون. هذان مؤثران مختلفان، يعملان على مقاييس زمنية مختلفة جذريًا ويجيبان عن أسئلة مختلفة.

لا شيء في هذه الدراسة يضعف الأدلة على تغير المناخ الحالي أو يدعو إلى تأخير العمل. إن غلافًا حيويًا قد يحتفظ ببعض أشكال الحياة القائمة على التمثيل الضوئي في سيناريو نموذجي بعيد ليس هو نفسه مناخًا تبقى فيه مجتمعات اليوم ونظمه البيئية آمنة.

تكمن قيمة الورقة في أنها تجعل سؤالًا بعيدًا أكثر انضباطًا. فهي تبين أن نماذج أقدم وأبسط ربما بالغت في الاحترار عندما ازداد ضوء الشمس وبقي ثاني أكسيد الكربون ثابتًا، وأن الحياة القائمة على التمثيل الضوئي قد تملك مسارات للبقاء أكثر مما توحي به عتبة كربون معيارية واحدة. كما توضح لماذا يأتي كل جزء إضافي من مليار سنة مرتبطًا بسلسلة من الافتراضات.

الشمس التي تغذي ورقة نبات تتغير ببطء. وما إذا كانت الأرض ستبقى خضراء 35.1 أو 87.1 مليار سنة أخرى، أو مدة أخرى، فسيتوقف على استجابة الصخور والماء والغلاف الجوي والحياة معًا. النتيجة الصادقة ليست تاريخًا، بل رؤية أوسع لهذا التوازن.

الخلاصة

تسأل دراسة مناخية ثلاثية الأبعاد إلى متى قد يستمر الغلاف الحيوي النباتي — القائم على التمثيل الضوئي — للأرض مع ازدياد سطوع الشمس ببطء. حسب الباحثان 29 مناخًا منفصلًا في حالة مستقرة وتتبعوا عبرها حالتين حدّيتين توضيحيتين. مع تجوية ضعيفة وثاني أكسيد كربون ثابت عند 400 جزء في المليون، تقع حدود الحرارة المعتمدة للنباتات البرية بعد نحو 68.1 و87.1 مليار سنة من الآن. ومع تجوية قوية ومتوسط عالمي لدرجة الحرارة ثابت عند 288 كلفن، أي نحو 15 درجة مئوية، تقع حدود ثاني أكسيد الكربون المعتمدة للتمثيل الضوئي عند نحو 35.1 و64.1، ومع استخدام عتبة مؤقتة، 84.1 مليار سنة. أما رقم 86.1 مليار سنة المتداول كثيرًا فهو مجرد المتوسط المدوّر للنهايتين

العلويتين المتفائلتين. هذه نطاقات نموذجية تعتمد على السيناريو، وليست تاريخًا لنهاية الأرض أو البشرية أو جميع أشكال الحياة. يستخدم النموذج مسارات محددة مسبقًا، والجغرافيا الحالية، ومحيطًا مبسطًا، ولا يتضمن اقترانًا صريحًا بين التربة والغطاء النباتي أو بين المناخ والتجوية، كما تقترب أطول التقديرات من حدود غير مؤكدة للاحتباس الحراري وفقدان المحيطات.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الورقة: في إعداد ExoCAM هذا، تسخن المناخات ثلاثية الأبعاد عمومًا بدرجة أقل مع ازدياد ضوء الشمس وثبات ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالنماذج المبسطة المستخدمة للمقارنة. وعبر حالتين حدّيتين محددتين مسبقًا للتجوية وعدة عتبات بيولوجية معتمدة، تقع حدود الغلاف الحيوي النباتي بين نحو 35.1 و87.1 مليار سنة من الآن.

ما هو معقول لكنه غير مثبت: أن بعض نباتات CAM أو النباتات المائية التي تستخدم البيكربونات المذابة قد تحافظ على التمثيل الضوئي قرب جزء واحد في المليون من ثاني أكسيد الكربون الجوي، وأن التكيف أو التكنولوجيا قد يمددان عمر الحياة القائمة على التمثيل الضوئي أكثر، وأن المسار الحقيقي للمناخ والتجوية سيبقى بين الحالتين الحدّيتين للنموذج.

ما الذي لا تُظهره: تاريخًا ثابتًا لنهاية جميع النباتات أو جميع أشكال الحياة أو الحضارة البشرية أو محيطات الأرض أو الكوكب، ولا محاكاة واحدة متصلة للمليارات سنة القادمتين، ولا أي سبب للتقليل من شأن تغير المناخ الحالي الناتج عن البشر.

أهم القيود: تسع وعشرون حالة مستقرة من عائلة واحدة من نماذج المناخ؛ مسارات تجوية محددة مسبقًا بدلًا من اقترانها ديناميكيًا بالمناخ؛ الجغرافيا الحالية، محيط مبسط، ميثان ثابت، ميل محوري وانحراف مداري صفريان، عدم وجود تربة أو غطاء نباتي أو تغذية راجعة صريحة من الغلاف الحيوي، عتبات غير مؤكدة للحرارة وثاني أكسيد الكربون، واختلاف واسع بين النماذج قرب حالات الاحتباس الحراري الرطب والجامح.

ما مقدار الثقة التي ينبغي للقارئ العام أن يضعها في النتيجة؟ ثقة عالية بأن الدراسة توسّع نطاق النماذج المعقولة وتحدد الافتراضات التي تتحكم فيه. وثقة متوسطة في النطاق العددي بوصفه قوسًا مفيدًا داخل هذا النموذج. وثقة منخفضة في أي تاريخ دقيق، لأن أبعد النهايات تعتمد على مسارات مناخية متطرفة عمدًا وبيولوجيا غير مؤكدة.

المصادر

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

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