The CLEAN PAPER

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

โลกจะยังคงเขียวได้นานแค่ไหน? แบบจำลองภูมิอากาศให้เป็นช่วง ไม่ใช่วันสิ้นโลก

การจำลองภูมิอากาศสามมิติ 29 แบบให้ผลจำกัดต่างกันต่อชีวมณฑลสังเคราะห์แสงของโลก ระหว่างประมาณ 1.35 ถึง 1.87 พันล้านปีจากนี้ ค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเส้นทางที่จงใจทำให้ง่ายสำหรับการผุพังของหิน ความร้อน และระดับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดที่พืชอาจใช้ได้ มันไม่ได้ทำนายว่าพืชทั้งหมด ชีวิตทั้งหมด อารยธรรม หรือโลกจะสิ้นสุดเมื่อใด

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

โลกจะยังคงเขียวได้นานแค่ไหน? แบบจำลองภูมิอากาศให้เป็นช่วง ไม่ใช่วันสิ้นโลก

ใบไม้ดำรงอยู่ภายใต้ข้อตกลงที่แคบมาก มันต้องการแสง น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิที่เคมีของมันรับได้ ในช่วงชีวิตของมนุษย์ ดวงอาทิตย์ดูเหมือนเป็นส่วนที่คงที่ของข้อตกลงนี้ แต่ในช่วงเวลาหนึ่งพันล้านปี มันไม่คงที่

เมื่อดวงอาทิตย์มีอายุมากขึ้นบนลำดับหลัก มันจะค่อย ๆ สว่างขึ้น แสงอาทิตย์ที่มากขึ้นทำให้โลกร้อนขึ้น แต่โลกมีการตอบสนองระยะยาวอย่างหนึ่ง: ปฏิกิริยาระหว่างน้ำฝน คาร์บอนไดออกไซด์ และหินซิลิเกตสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากบรรยากาศได้ ซึ่งทำให้ปรากฏการณ์เรือนกระจกอ่อนลงและชดเชยความร้อนบางส่วน การตอบสนองเดียวกันที่ช่วยทำให้โลกเย็นลง ในที่สุดอาจทำให้สิ่งมีชีวิตสังเคราะห์แสงขาดคาร์บอนที่ใช้สร้างเนื้อเยื่อมีชีวิต

บทความใหม่ใน Journal of Geophysical Research: Atmospheres ถามว่าขีดจำกัดใดอาจมาถึงก่อน: ร้อนเกินไป หรือคาร์บอนไดออกไซด์น้อยเกินไป คำตอบไม่ใช่วันที่โลก "ตาย" ภายใต้เส้นทางอนาคตสองแบบที่จงใจทำให้ง่าย ขีดจำกัดที่เลือกใช้สำหรับชีวิตที่สังเคราะห์แสงอยู่ที่ประมาณ **1.35 ถึง 1.87 พันล้านปีนับจากปัจจุบัน**

ช่วงนี้กล่าวถึง **ชีวมณฑลพืช (vegetative biosphere)**: ส่วนของระบบสิ่งมีชีวิตบนโลกที่ดำรงอยู่ด้วยสิ่งมีชีวิตสังเคราะห์แสง โดยเฉพาะพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นที่เปลี่ยนแสงและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสสารชีวภาพ มันไม่ใช่การพยากรณ์สำหรับจุลชีพทุกชนิด ไม่ใช่อายุขัยของอารยธรรมมนุษย์ และไม่ใช่อายุขัยของโลก

เทอร์โมสแตตของโลกมีค่าตั้งที่ไม่แน่นอนสองตัว

ความไม่แน่นอนหลักคือ **การผุพังของหินซิลิเกต (silicate weathering)** คาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำฝน ทำปฏิกิริยากับหินซิลิเกต และท้ายที่สุดถูกพาไปสู่มหาสมุทรและตะกอน ภูเขาไฟคืนคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในช่วงเวลาทางธรณีวิทยา กระบวนการเหล่านี้ร่วมกันเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอเนต-ซิลิเกต ซึ่งมักถูกอธิบายว่าเป็นเทอร์โมสแตตของดาวเคราะห์

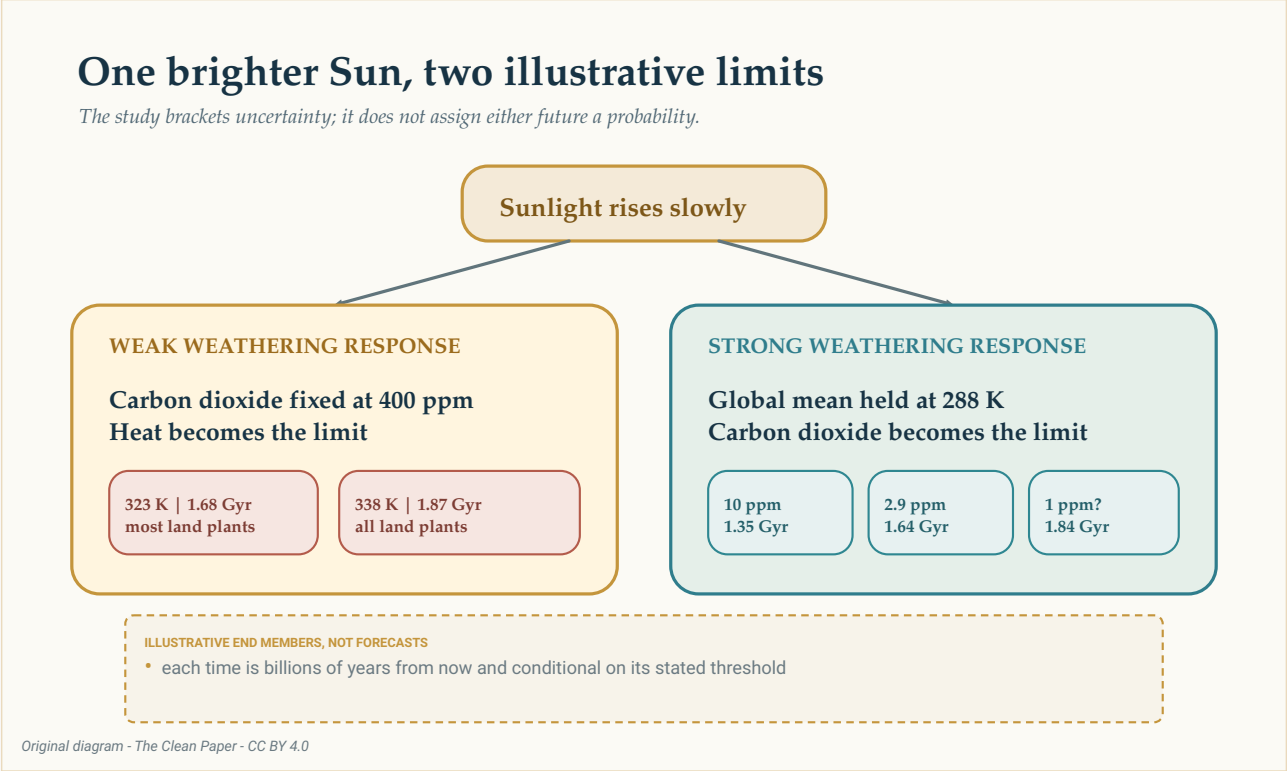
ในโลกที่อุ่นและชื้นขึ้น การผุพังอาจเร็วขึ้นและดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกได้เร็วกว่า แต่เราไม่รู้ว่าการตอบสนองนี้จะควบคุมโลกภายใต้ดวงอาทิตย์ที่สว่างขึ้นในอนาคตแรงเพียงใด Jacob Haqq-Misra และ Eric Wolf จึงไม่ได้เลือกเส้นทางหนึ่งแล้วอ้างว่าเป็นเส้นทางที่ "ถูกต้อง" พวกเขาจำลอง **กรณีปลายสุด (end members)** สองแบบ: กรณีสุดขั้วที่ตั้งใจใช้เพื่อครอบช่วงความไม่แน่นอน

- ในกรณี **การผุพังอ่อน** คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศคงที่ที่ 400 ส่วนในล้านส่วน ขณะที่ดวงอาทิตย์ที่สว่างขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น
- ในกรณี **การผุพังแรง** อุณหภูมิผิวเฉลี่ยทั่วโลกคงที่ที่ 288 เคลวิน หรือประมาณ 15 องศาเซลเซียส ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดึงลงเมื่อแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

ไม่มีกรณีใดถูกนำเสนอว่าเป็นอนาคตจริงของโลก กึ่งแรกถามว่าความร้อนจะทำอะไรหากคาร์บอนไดออกไซด์ยังสูง ส่วนกึ่งที่สองถามว่าการขาดคาร์บอนจะทำอะไรหากการผุพังช่วยรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยโลกไว้ใกล้ค่าปัจจุบัน

> **การผุพังของหินทำหน้าที่เหมือนเทอร์โมสแตตได้อย่างไร?**
>
> คำเปรียบเทียบนี้หมายถึงวงจรป้อนกลับ ไม่ใช่ปุ่มควบคุมจริง ๆ เมื่อภูมิอากาศที่อุ่นขึ้นเร่งการผุพังทางเคมี คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมากขึ้นอาจไปอยู่ในสารละลาย แร่ และตะกอน การเอาก๊าซเรือนกระจกนี้ออกจึง

> ต้านความร้อนเดิมบางส่วน ในช่วงเวลาที่ยาวมาก การปล่อยก๊าซจากภูเขาไฟจะนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมา ความแรงของแต่ละขั้นขึ้นอยู่กับฝน หินที่โผล่พ้นผิว การกัดเซาะ ชีววิทยา ธรณีแปรสัณฐาน และเคมีของมหาสมุทร นั่นคือเหตุผลที่บทความทดสอบการตอบสนองแบบขีดจำกัด แทนที่จะถือว่าเทอร์โมสแตตนี้เป็นเครื่องจักรที่รู้พฤติกรรมแน่นอน



บทความครอบอนาคตที่ไม่แน่นอนด้วยกรณีปลายสุดสองแบบเพื่อการอธิบาย หากการผุพังตอบสนองอ่อน ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะถึงเกณฑ์ที่เลือกไว้สำหรับพืชบก หากตอบสนองแรง คาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจะถึงเกณฑ์ที่เลือกไว้สำหรับการสังเคราะห์แสง ทั้งเหล่านี้เป็นผลแบบมีเงื่อนไข ไม่ใช่ความน่าจะเป็นหรือเวลานับถอยหลัง

The Clean Paper CC BY 4.0

โลกจำลองที่เข้าสู่สมดุล 29 แบบ ไม่ใช่ภาพยนตร์สองพันล้านปีเรื่องเดียว

ผู้วิจัยใช้ ExoCAM ซึ่งเป็นแบบจำลองภูมิอากาศโลกสามมิติ คำนวณ **ภูมิอากาศสภาวะคงตัว 29 แบบ** จากการจับคู่ระดับแสงอาทิตย์ที่แรงขึ้นกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง แต่ละกรณีถูกรันเป็นเวลา 70 ปีของแบบจำลอง ในที่นี้ หนึ่งปีของแบบจำลองคือหนึ่งรอบปีที่จำลองภายใต้เงื่อนไขคงที่ เป็นเวลาการรันเพื่อให้ภูมิอากาศเทียมเข้าสู่สภาวะคงตัว ไม่ใช่หนึ่งขั้นของการพยากรณ์อนาคตโลกแบบปีต่อปี จากนั้นจึงนำ 20 ปีสุดท้ายมาเฉลี่ยหลังระบบมีเวลาปรับตัวแล้ว

กรณีทั้ง 29 เป็นโลกจำลองแยกจากกัน การรันแต่ละครั้งคือหนึ่งจุดในกริด และตอบคำถามว่า “ภูมิอากาศที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแบบใดเข้ากับคู่ค่าของแสงอาทิตย์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เลือกนี้?” คอมพิวเตอร์ไม่ได้เริ่มจากโลกวันนี้แล้วปล่อยให้บรรยากาศ หิน มหาสมุทร และสิ่งมีชีวิตวิวัฒน์ต่อเนื่องไปอีกสองพันล้านปี ผู้วิจัยเพียงลากเส้นทางการผุพังเชิงแผนภาพทั้งสอง

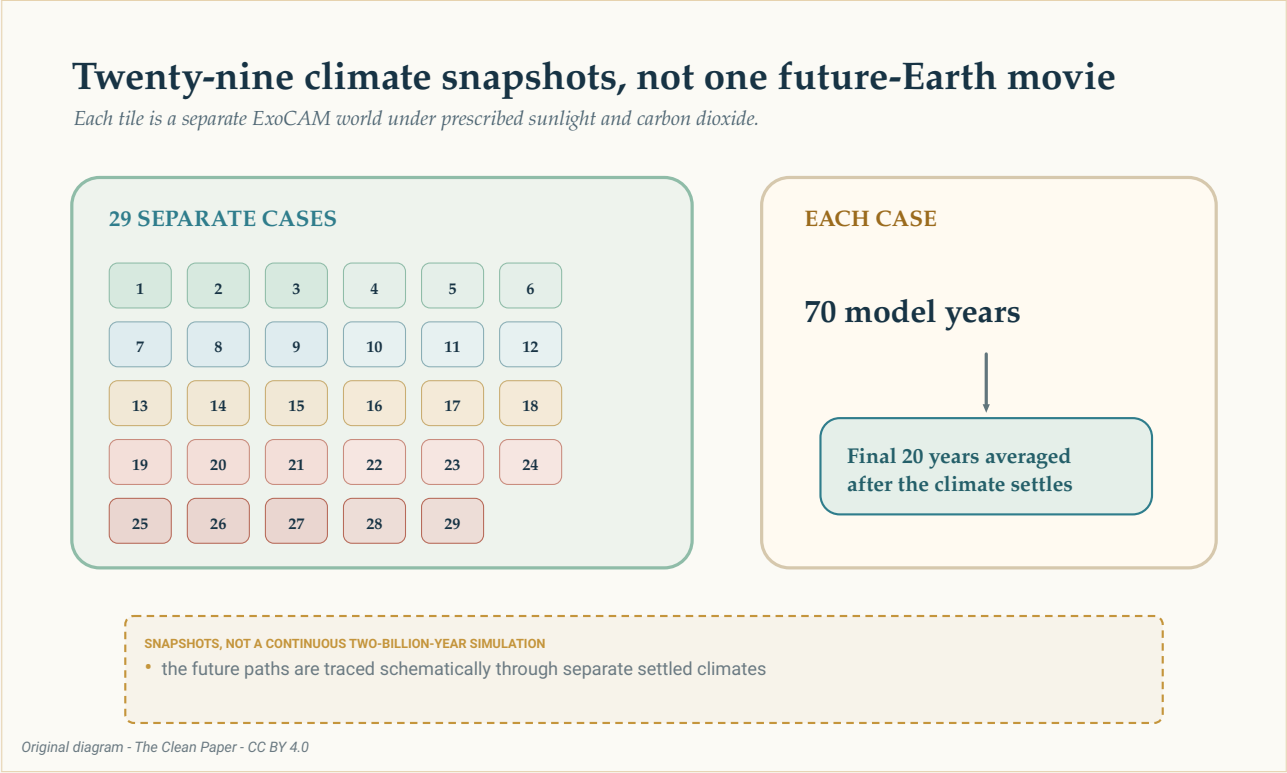
ผ่านจุดที่คำนวณไว้ล่วงหน้าเหล่านี้ ส่วนเส้นทางระหว่างจุดไม่ได้ถูกจำลองโดยตรง

ตารางนี้ทำซ้ำชุดค่าของแสงอาทิตย์และคาร์บอนไดออกไซด์ใน คลังข้อมูลแบบจำลองอย่างเป็นทางการ หมายเลขกรณีเป็นตัวช่วยอ่านที่เพิ่มไว้ที่นี่ตามลำดับในคลัง **S/S0** คือค่าคงที่สุริยะสัมพัทธ์: พลังงานแสงอาทิตย์ขาเข้าที่ใช้ในแบบจำลองหารด้วยค่าปัจจุบัน S0 ดังนั้นค่า 1.2 จึงหมายถึงพลังงานแสงอาทิตย์ขาเข้ามากกว่าปัจจุบัน 20 เปอร์เซ็นต์ **CO2 (ppm)** คืออัตราส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นจำนวนโมเลกุลต่อโมเลกุลบรรยากาศหนึ่งล้านโมเลกุล

รหัสกรณี	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
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

โลกในแบบจำลองยังดูเป็นโลกของเรา แต่ถูกจำกัดโดยตั้งใจ มันมีขนาดเท่าโลกและใช้ภูมิศาสตร์ปัจจุบัน มีมหาสมุทรแบบ slab ที่ทำให้ง่ายแทนมหาสมุทรที่หมุนเวียนเต็มรูปแบบ ความดันบรรยากาศตั้งไว้ใกล้ค่าปัจจุบันของโลกประมาณหนึ่งบาร์ และมีเทนคงที่ วงโคจรเป็นวงกลมสมบูรณ์ (ความเยื้องศูนย์เป็นศูนย์) และแกนหมุนไม่มีความเอียง (มุมเอียงแกนเป็นศูนย์) ไม่มีดินหรือพืชพรรณอย่างชัดเจน และไม่มีวงจรป้อนกลับจากชีวมณฑลที่เปลี่ยนแปลง สิ่งสำคัญที่สุดคือ แบบจำลองภูมิอากาศไม่ได้เชื่อมแบบไดนามิกกับแบบจำลองการผุพังของหิน กล่าวอีกอย่างคือ ExoCAM ไม่ได้คำนวณการผุพัง ใช้ผลนั้นอัปเดตคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วรันภูมิอากาศถัดไปเป็นวงจรป้อนกลับ ผู้วิจัยเป็นผู้กำหนดเส้นทางขีดจำกัดสองเส้นเอง แล้วลากผ่านกริดภูมิอากาศ 29 กรณี

> **“สภาวะคงตัว” หมายถึงอะไรในแบบจำลองภูมิอากาศ?**
>
> กรณีสภาวะคงตัวคือภูมิอากาศจำลองที่ได้รับเวลาปรับตัวภายใต้ดวงอาทิตย์และบรรยากาศชุดหนึ่ง สภาพอากาศภายในแบบจำลองยังเปลี่ยนจากวันต่อวันและปีต่อปี แต่ค่าเฉลี่ยระยะยาวไม่เลื่อนอย่างมากอีก
> วิธีนี้มีประโยชน์สำหรับถามว่า “ภูมิอากาศแบบใดเข้ากับเงื่อนไขเหล่านี้?” ซึ่งต่างจากการทำนายเส้นทางที่แน่นอนว่าโลกจริงจะเคลื่อนจากเงื่อนไขชุดหนึ่งไปอีกชุดอย่างไร



แต่ละช่องคือการรันภูมิอากาศ ExoCAM แยกต่างหากเป็นเวลา 70 ปีของแบบจำลอง โดยเฉลี่ย 20 ปีสุดท้าย การศึกษาสุ่มตัวอย่างภูมิอากาศที่เข้าสู่สภาวะคงตัว 29 แบบภายใต้ค่าของแสงอาทิตย์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่กำหนดไว้ ไม่ได้จำลองโลกหนึ่งใบที่วิวัฒน์ต่อเนื่องนานสองพันล้านปี

The Clean Paper CC BY 4.0

กรณีปลายสุดที่หนึ่ง: คาร์บอนไดออกไซด์พอ แต่ร้อนเกินไป

ในกึ่งการผุพังอ่อน คาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 400 ส่วนในล้านส่วน เมื่อพลังงานจากดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ความร้อนกลายเป็นปัจจัยจำกัด

บทความใช้เกณฑ์อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกสองค่าจากงานก่อนหน้า:

- ที่ **323 เคลวิน** หรือประมาณ **50 องศาเซลเซียส** เป็นค่าเฉลี่ยรายปีทั่วโลก โลกถูกจัดว่าร้อนเกินไปสำหรับพืชบกส่วนใหญ่ แบบจำลองถึงเกณฑ์นี้ในประมาณ **1.68 พันล้านปี**
- ที่ **338 เคลวิน** หรือประมาณ **65 องศาเซลเซียส** เป็นค่าเฉลี่ยรายปีทั่วโลก โลกถูกจัดว่าร้อนเกินไปสำหรับพืชบกทั้งหมด

แบบจำลองถึงเกณฑ์นี้ในประมาณ **1.87 พันล้านปี**

สิ่งเหล่านี้เป็นขีดจำกัดทางชีววิทยาที่รับมาใช้ ไม่ใช่อุณหภูมิสากลที่สิ่งมีชีวิตสังเคราะห์แสงทุกชนิดจะต้องล้มเหลวอย่างแน่นอน ค่าเฉลี่ยทั่วโลกยังซ่อนความแตกต่างระดับภูมิภาคอย่างมาก การศึกษายังตรวจแยกว่าบริเวณใดอาจยังมีชุดอุณหภูมิและน้ำที่เหมาะสม แต่ป้ายบนแผนที่ภูมิอากาศไม่สามารถแจกแจงแหล่งหลบภัยในอนาคตหรือการปรับตัวได้ทุกแบบ

กรณีปลายสุดที่สอง: อุณหภูมิทนได้ แต่คาร์บอนไดออกไซด์น้อยเกินไป

ในกึ่งการผุพังแรง อุณหภูมิเฉลี่ยผิวโลกถูกคงไว้ที่ 288 เคลวิน หรือประมาณ 15 องศาเซลเซียส ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศลดลง ในกรณีนี้คำตอบขึ้นอยู่กับว่าเส้นทางการสังเคราะห์แสงต่าง ๆ จะใช้คาร์บอนได้ต่ำเพียงใด

- ที่เกณฑ์ดั้งเดิม **10 ส่วนในล้านส่วน** — คาร์บอนไดออกไซด์ 10 โมเลกุลต่อโมเลกุลบรรยากาศหนึ่งล้านโมเลกุล — ขีดจำกัดของการสังเคราะห์แสงแบบ C4 มาถึงในประมาณ **1.35 พันล้านปี** การสังเคราะห์แสงแบบ C4 พบในพืชอย่างข้าวโพดและอ้อย และเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รอบเอนไซม์ที่ตรึงคาร์บอน
- หากใช้เกณฑ์ C4 ทางเลือกที่ **2.9 ส่วนในล้านส่วน** ซึ่งมีการอภิปรายในงานก่อนหน้า ขีดจำกัดจะขยับไปประมาณ **1.64 พันล้านปี**
- เกณฑ์ชั่วคราวที่ **1 ส่วนในล้านส่วน** ซึ่งเชื่อมโยงกับความเป็นไปได้ที่พืช CAM บางชนิด — พืชที่ใช้ crassulacean acid metabolism ซึ่งแยกการรับคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลากลางคืนออกจากการใช้ในเวลากลางวัน — หรือพืชน้ำที่สามารถใช้ไบคาร์บอเนตละลายน้ำได้ อาจขยับขีดจำกัดไปประมาณ **1.84 พันล้านปี**

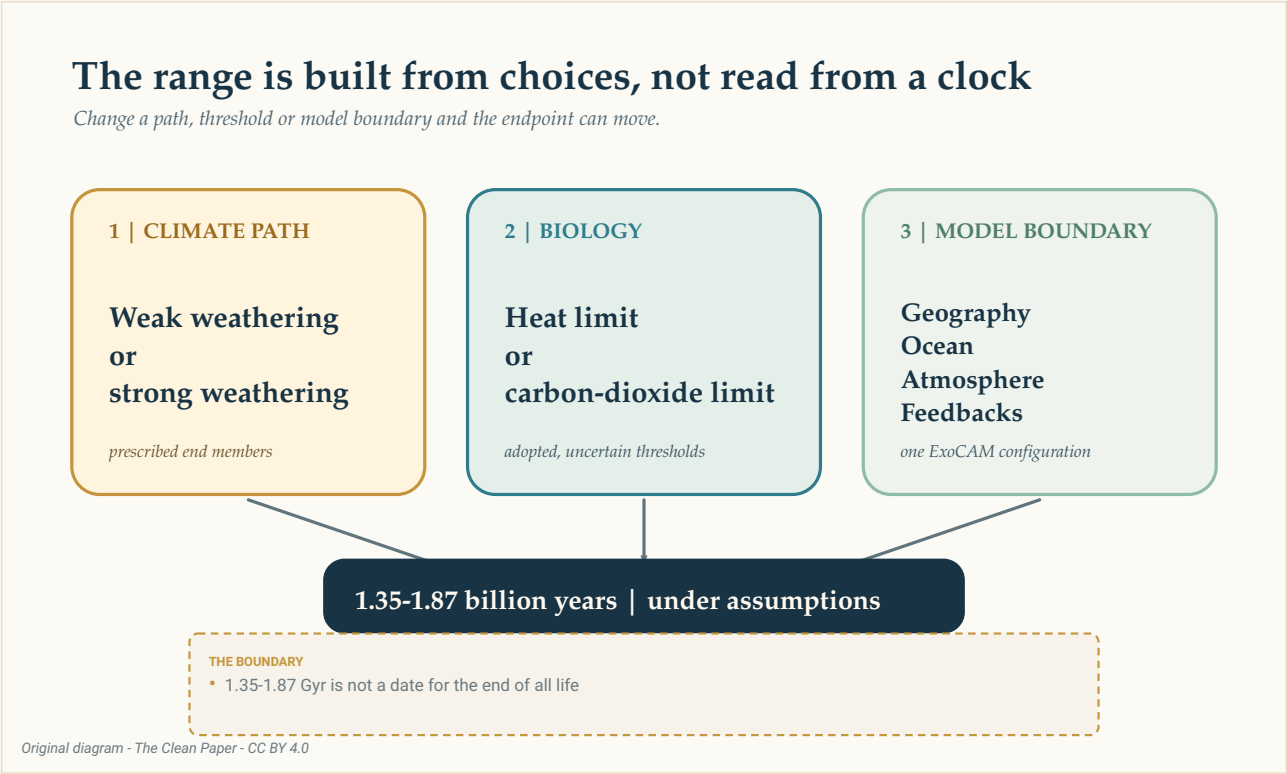
ตัวเลขสุดท้ายมีข้อสงวนทางชีววิทยามากที่สุด ผู้วิจัยระบุชัดว่าเกณฑ์หนึ่งส่วนในล้านส่วนเป็นเพียงค่าชั่วคราว ไม่ใช่เกณฑ์การอยู่รอดที่พิสูจน์ด้วยการทดลองแล้วสำหรับพืช CAM ทุกชนิดหรือพืชน้ำทั้งหมดภายใต้สภาพโลกในอนาคต

> **C3, C4 และ CAM เป็นกลยุทธ์ ไม่ใช่บันไดลำดับขั้น**
>
> พืชใช้เส้นทางชีวเคมีต่างกันในการจับคาร์บอน **การสังเคราะห์แสงแบบ C3** พบได้มากที่สุด **การสังเคราะห์แสงแบบ C4** ซึ่งพบในพืชอย่างข้าวโพดและอ้อย เพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รอบเอนไซม์ที่ตรึงคาร์บอน และอาจทำงานได้ดีกว่าเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ขาดแคลน **Crassulacean acid metabolism (CAM)** แยกช่วงรับคาร์บอนกับช่วงใช้คาร์บอนระหว่างกลางคืนและกลางวัน ช่วยให้พืชจำนวนมากประหยัดน้ำ
> ทั้งหมดนี้เป็นตระกูลของกลยุทธ์ที่มีความแตกต่างระหว่างชนิดมากมาย ไม่ใช่ลำดับต่อเนื่องของพืชที่ "ดีกว่า" กัน เกณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำมากของบทความเป็นสมมุติฐานเพื่อสำรวจขีดจำกัดที่เป็นไปได้ ไม่ใช่การรับประกันว่าระบบนิเวศในอนาคตจะวิวัฒน์จนใช้ค่าเหล่านั้นได้

เหตุใด 1.86 พันล้านปีจึงไม่ใช่วันหมดอายุ

ค่าพาดหัวของบทความที่ประมาณ **1.86 พันล้านปี** คือค่าเฉลี่ยของปลายบนที่มองโลกในแง่ดีที่สุดสองค่า: 1.84 พันล้านปีในกึ่งที่ถูกจำกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และ 1.87 พันล้านปีในกึ่งที่ถูกจำกัดด้วยความร้อน มันเป็นเพียงสรุปกระชับของสองฉากจำลองต่างกัน ไม่ใช่ผลแบบจำลองลำดับที่สามที่มีความแม่นยำมากกว่า และไม่ใช่วันที่เป็น "ค่าประมาณดีที่สุด"

แม้ช่วงกว้าง 1.35 ถึง 1.87 พันล้านปีก็ไม่ได้มีความน่าจะเป็นค่าเดียว ค่าต่ำและสูงขึ้นอยู่กับสมมุติฐานการผุพังต่างกัน เกณฑ์ชีววิทยาต่างกัน และการตั้งค่าแบบจำลองภูมิอากาศหนึ่งแบบ ช่วงนี้จึงวัดการเลือกในการทดลองพอ ๆ กับที่วัดเวลา



ช่วง 1.35 ถึง 1.87 พันล้านปีเกิดขึ้นหลังจากเลือกเส้นทางการผุพัง เกณฑ์ชีววิทยา และขอบเขตของแบบจำลองแล้ว มันเป็นแผนที่ของสมมุติฐาน ไม่ใช่นาฬิกาที่ลงท้ายด้วยการสูญพันธุ์ของชีวิตทั้งหมด

The Clean Paper CC BY 4.0

ขีดจำกัดอื่นอาจมาถึงก่อน

ค่าประมาณอายุของชีวมณฑลพืชที่ยาวที่สุดเข้าใกล้ขอบเขตอื่นที่ไม่แน่นอน นั่นคือภาวะเรือนกระจกชื้นหรือเรือนกระจกแบบ runaway ซึ่งอาจทำให้มหาสมุทรสูญเสียน้ำอย่างมาก แบบจำลองภูมิอากาศให้ผลไม่ตรงกันมากว่าเงื่อนไขเหล่านี้เริ่มเมื่อใดภายใต้แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อไกลจากสภาวะปัจจุบัน แบบจำลองบางชุดวางจุดเริ่มต้นไว้ก่อนขีดจำกัดการสังเคราะห์แสงที่มองโลกในแง่ดีที่สุด

ดังนั้นกึ่งบนจึงอ่านไม่ได้ว่าเป็นคำรับประกันว่าโลกจะยังคงมีมหาสมุทร ทวีปที่คุ้นเคย หรือสภาพผิวที่อยู่อาศัยได้จนถึง 1.87 พันล้านปีจากนี้ แบบจำลองยังไม่รวมธรณีแปรสัณฐานในอนาคต การเปลี่ยนพื้นที่แผ่นดิน ระบบนิเวศที่วิวัฒน์ หรือมหาสมุทรแบบไดนามิกเต็มรูปแบบการคำนวณว่าบรรยากาศดูดซับและปล่อยพลังงานอย่างไรยังถูกผลักเข้าไปในช่วงที่แสงอาทิตย์รุนแรงและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำมาก ซึ่งแบบจำลองต่าง ๆ เริ่มให้ผลแตกต่างกัน

การปรับตัวทางวิวัฒนาการและการแทรกแซงด้วยเทคโนโลยีปรากฏในส่วนอภิปรายของบทความในฐานะความเป็นไปได้ ไม่ใช่ผลลัพธ์จากการจำลองภูมิอากาศ 29 แบบจำลองไม่ได้แสดงว่าสิ่งมีชีวิตในอนาคตวิวัฒน์เส้นทางสังเคราะห์แสงที่ทำงานได้ที่หนึ่งส่วนในล้านส่วน และไม่ได้แสดงว่าอารยธรรมหนึ่งจะบริหารบรรยากาศได้นานหนึ่งพันล้านปี

นี่ไม่ใช่ผลการศึกษาเกี่ยวกับวิกฤตภูมิอากาศปัจจุบัน

การสว่างขึ้นของดวงอาทิตย์เกิดในช่วงหลายร้อยล้านถึงหลายพันล้านปี ส่วนภาวะโลกร้อนที่มนุษย์ก่อในปัจจุบันมาจากการเพิ่มก๊าซเรือนกระจกอย่างรวดเร็วในช่วงหลายทศวรรษถึงหลายศตวรรษ ทั้งสองเป็นแรงบังคับที่ต่างกัน บนสเกลเวลาที่ต่างกันอย่างสุดขั้ว และตอบคำถามคนละข้อ

ไม่มีสิ่งใดในการศึกษานี้ลดทอนหลักฐานเรื่องการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในปัจจุบันหรือสนับสนุนให้ชะลอการลงมือ ชีวมณฑลที่อาจรักษาชีวิตสังเคราะห์แสงบางส่วนไว้ได้ในฉากจำลองอันห่างไกลหนึ่งแบบ ไม่เหมือนกับภูมิอากาศที่สังคมและระบบนิเวศปัจจุบันยังปลอดภัย

คุณค่าของบทความคือทำให้คำถามที่ไกลมากนี้มีกรอบที่เคร่งครัดขึ้น มันแสดงว่าแบบจำลองรุ่นก่อนที่เรียบง่ายกว่าอาจทำให้โลกร้อนมากเกินไปเมื่อเพิ่มแสงอาทิตย์แต่คงคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ และชีวิตที่สังเคราะห์แสงอาจมีเส้นทางคงอยู่ได้มากกว่าที่เกณฑ์คาร์บอนมาตรฐานเพียงค่าเดียวชี้ นอกจากนี้ยังแสดงว่าทุกเศษส่วนของพันล้านปีที่เพิ่มขึ้นมาพร้อมห่วงโซ่สมมุติฐาน

ดวงอาทิตย์ที่หล่อเลี้ยงใบไม้กำลังเปลี่ยนอย่างช้า ๆ โลกจะยังเขียวต่อไปอีก 1.35, 1.87 หรือจำนวนพันล้านปีอื่นหรือไม่ จะขึ้นอยู่กับหิน น้ำ บรรยากาศ และชีวิตตอบสนองร่วมกัน ผลลัพธ์ที่ซื่อตรงไม่ใช่วันที่ แต่คือมุมมองที่กว้างขึ้นของข้อตกลงนี้

สรุป

การศึกษาภูมิอากาศสามมิตินี้ถามว่าชีวมณฑลพืช — ส่วนของชีวมณฑลที่อาศัยการสังเคราะห์แสง — ของโลกอาจคงอยู่ได้นานเพียงใดเมื่อดวงอาทิตย์ค่อย ๆ สว่างขึ้น ผู้วิจัยคำนวณภูมิอากาศสภาวะคงตัวแยกกัน 29 แบบ และลากกรณีปลายสุดเพื่อการอธิบายสองแบบผ่านกริดเหล่านั้น ในกรณีการผุพังอ่อนและคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 400 ส่วนในล้านส่วน เกณฑ์ความร้อนที่เลือกไว้สำหรับพืชบกมาถึงในประมาณ 1.68 และ 1.87 พันล้านปีจากนี้ ในกรณีการผุพังแรงและอุณหภูมิเฉลี่ยโลกคงที่ที่ 288 เคลวิน หรือประมาณ 15 องศาเซลเซียส เกณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เลือกไว้สำหรับการสังเคราะห์แสงมาถึงในประมาณ 1.35, 1.64 และ — เมื่อใช้เกณฑ์ชั่วคราว — 1.84 พันล้านปี ค่า 1.86 พันล้านปีที่มักถูกอ้างถึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ยปัดเศษของปลายบนที่มองโลกในแง่ดีที่สุดสองค่า นี่คือช่วงของแบบจำลองที่ขึ้นกับฉากสมมุติ ไม่ใช่วันที่โลก มนุษยชาติ หรือชีวิตทั้งหมดจะสิ้นสุด แบบจำลองใช้เส้นทางที่กำหนดล่วงหน้า ภูมิศาสตร์ปัจจุบัน มหาสมุทรแบบ slab และไม่มีการเชื่อมดิน-พืชพรรณหรือภูมิอากาศ-การผุพังอย่างชัดเจน และค่าประมาณที่ยาวที่สุดเข้าใกล้ขีดจำกัดเรือนกระจกและการสูญเสียน้ำในมหาสมุทรที่ยังไม่แน่นอน

ประเมินแบบไม่เกินจริง

บทความแสดงอะไร: ในการตั้งค่า ExoCAM นี้ ภูมิอากาศสามมิติโดยทั่วไปอุ่นขึ้นน้อยกว่าเมื่อเพิ่มแสงอาทิตย์และคงคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ เมื่อเทียบกับแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ เมื่อพิจารณากรณีปลายสุดของการผุพังสองแบบและเกณฑ์ชีววิทยาหลายค่า ขีดจำกัดของชีวมณฑลพืชอยู่ระหว่างประมาณ 1.35 ถึง 1.87 พันล้านปีจากนี้

อะไรเป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์: พืช CAM บางชนิดหรือพืชน้ำที่ใช้ไบคาร์บอเนตละลายน้ำอาจรักษาการสังเคราะห์แสงไว้ได้ใกล้คาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งส่วนในล้านส่วน; การปรับตัวหรือเทคโนโลยีอาจยืดอายุของชีวิตสังเคราะห์แสงได้มากกว่านั้น; และเส้นทางจริงของภูมิอากาศ-การผุพังอาจอยู่ระหว่างกรณีปลายสุดทั้งสอง

มันไม่ได้แสดงอะไร: ไม่ได้ให้วันที่ตายตัวสำหรับจุดจบของพืชทั้งหมด ชีวิตทั้งหมด อารยธรรมมนุษย์ มหาสมุทรของโลก หรือดาวเคราะห์; ไม่ใช่การจำลองต่อเนื่องหนึ่งชุดสำหรับสองพันล้านปีข้างหน้า; และไม่ได้ให้เหตุผลใดที่จะลดความสำคัญของการ

เปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มนุษย์ก่อในปัจจุบัน

ข้อจำกัดหลัก: กรณีสภาวะคงตัว 29 กรณีจากตระกูลแบบจำลองภูมิอากาศหนึ่งชุด; เส้นทางการผุพังถูกกำหนดไว้แทนที่จะเชื่อมแบบไดนามิก; ภูมิศาสตร์ปัจจุบัน; มหาสมุทรแบบ slab; มีเทนคงที่; มุมเอียงแกนและความเยื้องศูนย์ของวงโคจรเป็นศูนย์; ไม่มีดิน พืชพรรณ หรือวงจรป้อนกลับจากชีวมณฑลอย่างชัดเจน; เกณฑ์ความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ไม่แน่นอน; และแบบจำลองให้ผลแตกต่างกันมากใกล้สภาวะเรือนกระจกชื้นและ runaway greenhouse

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? มั่นใจสูงว่าการศึกษานี้ขยายช่วงที่แบบจำลองมองว่าเป็นไปได้และระบุสมมุติฐานที่ควบคุมผล มั่นใจปานกลางว่าช่วงตัวเลขมีประโยชน์เป็นกรอบภายในแบบจำลองนี้ และมั่นใจต่ำในวันที่แน่นอนใด ๆ เพราะปลายช่วงที่ไกลที่สุดขึ้นอยู่กับเส้นทางภูมิอากาศสุดขั้วที่ตั้งใจเลือกและชีววิทยาที่ยังไม่แน่นอน

แหล่งข้อมูล

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