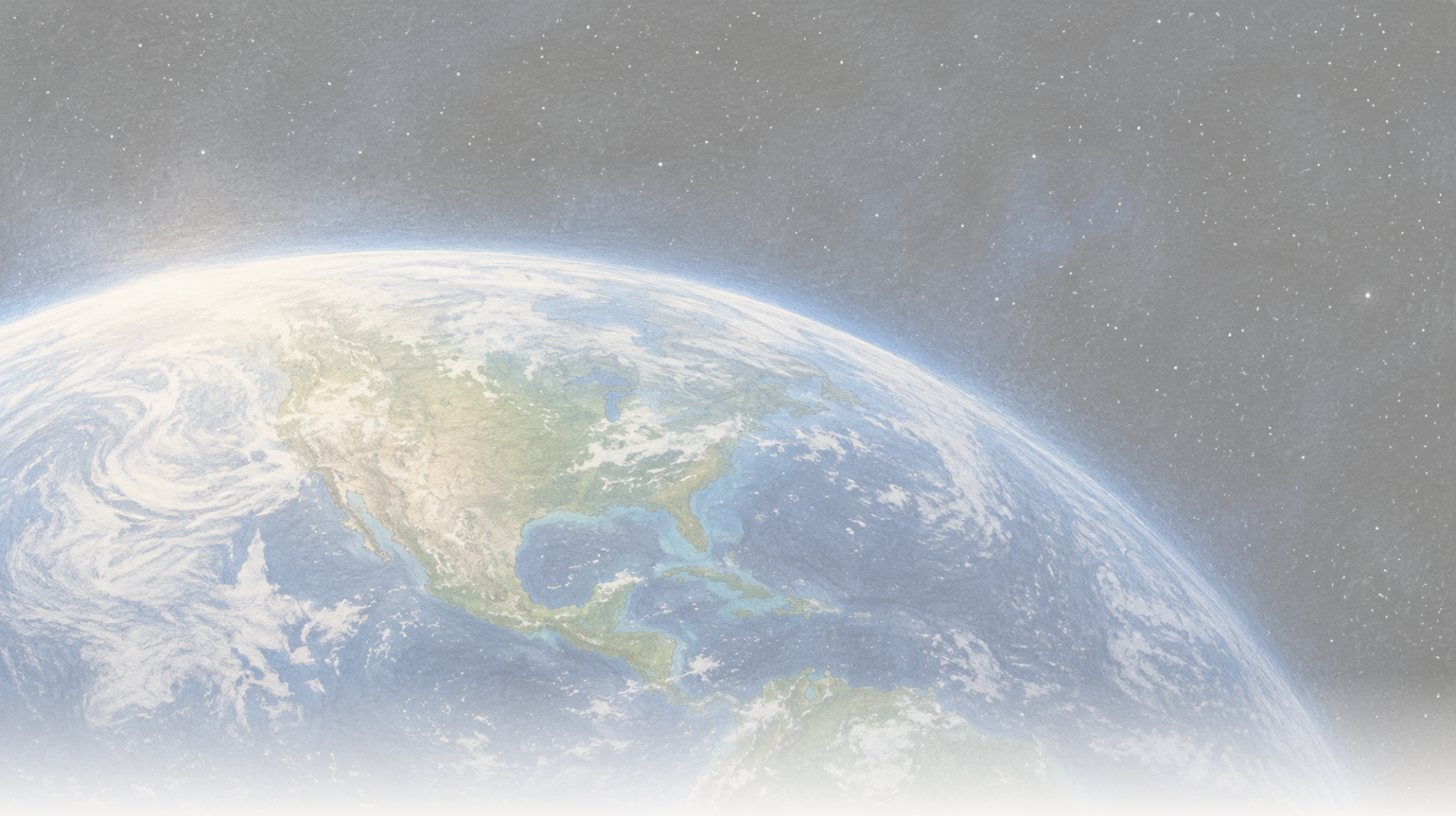




The CLEAN PAPER

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

지구는 얼마나 오래 푸르게 남을까? 기후모델은 종말의 날짜가 아니라 범위를 제시한다

29 개의 3 차원 기후 시뮬레이션은 지구의 광합성 생물권에 서로 다른 한계를 지금부터 약 13 억 5 천만 ~18 억 7 천만 년 후로 놓는다. 값은 의도적으로 단순화한 암석 풍화 경로, 열 한계, 식물이 사용할 수 있다고 가정한 최저 이산화탄소 농도에 따라 달라진다. 모든 식물, 모든 생명, 문명 또는 행성이 끝나는 시점을 예측하는 결과가 아니다.

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

지구는 얼마나 오래 푸른 상태로 남을 수 있을까? 기후 모델은 종말의 날짜가 아니라 범위를 제시한다

잎 한 장의 삶은 좁은 조건의 타협 위에 놓여 있다. 빛과 물, 이산화탄소가 필요하고, 생화학 반응이 견딜 수 있는 온도도 필요하다. 인간의 한 생애에서 보면 태양은 이 조건들 가운데 고정된 요소처럼 보인다. 하지만 10 억 년의 시간척도에서는 그렇지 않다.

태양은 주계열성으로 나이가 들면서 서서히 더 밝아진다. 더 많은 햇빛은 지구를 덥히지만, 행성에는 장기적인 반응도 있다. 빗물, 이산화탄소, 규산염 암석 사이의 반응은 대기에서 이산화탄소를 제거할 수 있다. 그러면 온실효과가 약해져 일부 온난화를 상쇄한다. 하지만 행성을 식히는 바로 그 반응이 언젠가는 광합성 생물이 살아 있는 조직을 만드는 데 쓰는 탄소를 부족하게 만들 수도 있다.

새로운 Journal of Geophysical Research: Atmospheres 논문은 어느 한계가 먼저 올지를 묻는다. 너무 뜨거워지는 것일까, 아니면 이산화탄소가 너무 적어지는 것일까? 답은 지구가 죽는 날짜가 아니다. 의도적으로 단순화한 두 미래 경로에서 채택한 광합성 생명 한계는 지금부터 대략 **13 억 5 천만 ~ 18 억 7 천만 년** 후에 놓인다.

이 범위는 **식생 생물권 (vegetative biosphere)**에 관한 것이다. 특히 빛과 이산화탄소를 생물학적 물질로 바꾸는 식물과 다른 광합성 생물에 의해 유지되는 지구 생명계의 부분을 뜻한다. 모든 미생물의 수명 예측이 아니다. 인간 문명의 수명도 아니다. 행성 자체의 수명도 아니다.

행성의 온도조절기에는 불확실한 설정이 두 개 있다

핵심 불확실성은 **규산염 풍화 (silicate weathering)**다. 이산화탄소는 빗물에 녹아 규산염 암석과 반응하고, 결국 해양과 퇴적물 쪽으로 운반된다. 화산은 지질학적 시간척도에서 다시 이산화탄소를 내놓는다. 이 과정들은 탄산염-규산염 순환의 일부를 이루며 흔히 행성의 온도조절기에 비유된다.

더 따뜻하고 습한 세계에서는 풍화가 빨라져 이산화탄소를 더 빠르게 제거할 수 있다. 하지만 훨씬 밝아진 미래 태양 아래에서 이 반응이 지구를 얼마나 강하게 지배할지는 모른다. 그래서 Jacob Haqq-Misra와 Eric Wolf는 하나의 “정답” 경로를 고르지 않았다. 대신 불확실성의 범위를 잡기 위해 의도적으로 극단적인 두 **끝단 시나리오 (end members)**를 모델링했다.

- **약한 풍화 끝단**에서는 대기 이산화탄소를 400 ppm으로 유지한 채 태양이 밝아지면서 온도가 올라간다.
- **강한 풍화 끝단**에서는 전지구 평균 표면온도를 288 K, 약 15°C로 유지하면서 일사량이 늘수록 이산화탄소를 낮춘다.

어느 경로도 지구의 실제 미래라고 제시되지 않는다. 첫 번째는 이산화탄소가 높게 유지된다면 열이 어떤 일을 하는지 묻는다. 두 번째는 풍화가 지구 평균온도를 오늘 수준에 가깝게 유지한다면 탄소 부족이 어떤 일을 하는지 묻는다.

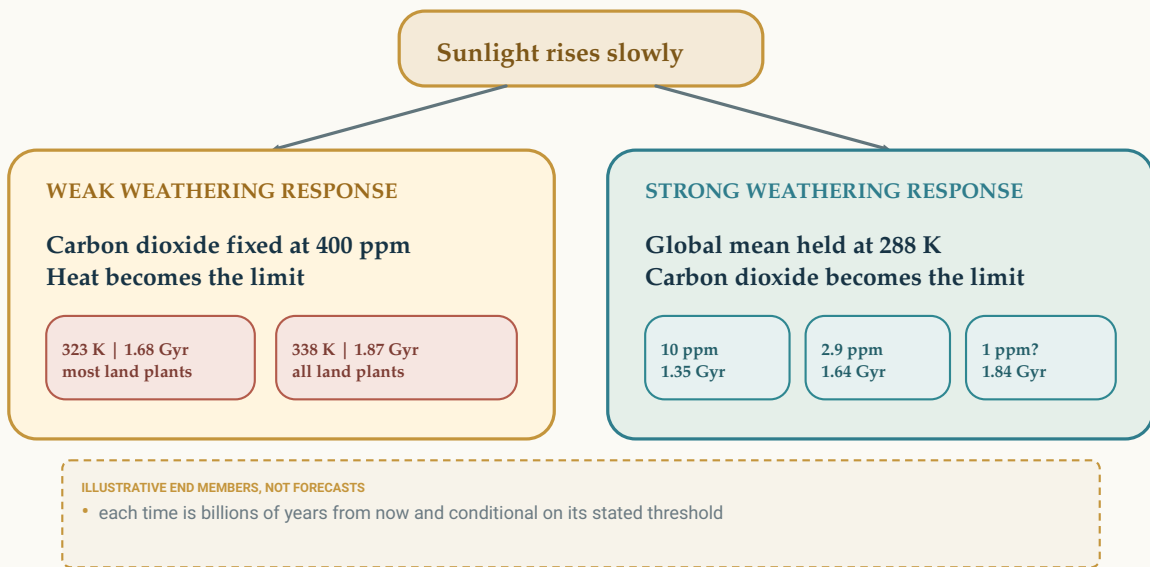
풍화가 어떻게 온도조절기처럼 작동할 수 있을까?

비유의 핵심은 문자 그대로의 조절 손잡이가 아니라 피드백이다. 따뜻한 기후가 화학적 풍화를 가속하면 더 많은 대기 이산화탄소가 용존 물질, 광물, 퇴적물에 들어갈 수 있다. 온실가스를 제거하면 원래의 온난화를 일부 상쇄한다. 매우 긴 시간척도에서는 화산 탈가스가 이산화탄소를 다시 공급한다.

각 연결고리의 강도는 강수량, 노출된 암석, 침식, 생물, 판구조, 해양화학에 따라 달라진다. 그래서 논문은 이 온도조절기를 잘 알려진 기계로 취급하지 않고 극단적인 반응을 시험한다.

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

논문은 불확실한 미래를 두 개의 예시적 끝단으로 묶는다. 풍화 반응이 약하면 상승하는 열이 채택한 육상식물 임계값에 도달하고, 강하면 감소하는 이산화탄소가 채택한 광합성 임계값에 도달한다. 이는 조건부 모델 경로이지 확률이나 카운트다운 날짜가 아니다.

The Clean Paper CC BY 4.0

20 억 년짜리 영화 하나가 아니라, 안정화된 모델 세계 29 개

연구진은 3 차원 전지구 기후모델 ExoCAM을 사용해 더 강한 일사량과 더 낮은 이산화탄소의 조합에서 **29 개의 정상상태 기후**를 계산했다. 각 경우는 모델 시간으로 70 년 동안 실행됐다. 여기서 모델의 1 년은 조건을 고정한 상태에서 인공 기후가 안정되도록 돌리는 한 번의 연간 주기다. 지구의 미래를 해마다 예측하는 한 단계가 아니다. 모의 기후가 충분히 안정된 뒤 마지막 20 년의 평균을 냈다.

29 개 사례는 서로 별도의 모델 세계다. 각 실행은 격자의 한 점으로서 “이 일사량과 이산화탄소 조합에서 안정된 기후는 어떤가?”에 답한다. 컴퓨터가 오늘의 지구에서 시작해 앞으로 20 억 년 동안 대기, 암석, 바다, 생물을 계속 진화시킨 것이 아니다. 저자들은 미리 계산한 이 점들을 따라 두 개의 도식적 풍화 경로를 그었다. 점과 점 사이의 경로 자체를 시뮬레이션한 것은 아니다.

아래 표는 공식 모델 데이터 저장소에 있는 일사량과 이산화탄소 조합을 재현한다. 사례 ID 는 여기서 저장소 순서대로 읽기 쉽게 붙인 것이다. **S/S0** 는 상대 태양상수다. 모델에 넣은 들어오는 태양에너지를 현재 값 S0 로 나눈 값이다. 따라서 1.2 는 오늘보다 들어오는 태양에너지가 20% 많다는 뜻이다. **CO2 (ppm)** 는 대기 분자 백만 개당 이산화탄소 분자의 혼합비다.

Case ID	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

모델의 지구는 알아볼 수 있지만 의도적으로 제한돼 있다. 지구 크기이고 현재의 지리를 사용한다. 완전히 순환하는 해양 대신 단순화한 슬랩 해양을 사용하며, 대기압은 현재 지구와 비슷한 약 1 bar 로 고정하고 메탄 농도도 고정한다. 궤도는 완전한 원 (이심률 0) 이고 자전축 기울기도 없다 (경사각 0). 토양이나 식생을 명시적으로 포함하지 않고, 변화하는 생물권의 피드백도 없다. 가장 중요하게는 기후모델이 암석 풍화

모델과 동적으로 결합돼 있지 않다. 즉 ExoCAM 이 풍화를 계산해 이산화탄소를 업데이트한 뒤 다음 기후를 다시 계산하는 피드백 고리를 돌린 것이 아니다. 연구진이 두 개의 제한 경로를 미리 정해 놓고 29 개 기후 격자를 따라 추적했다.

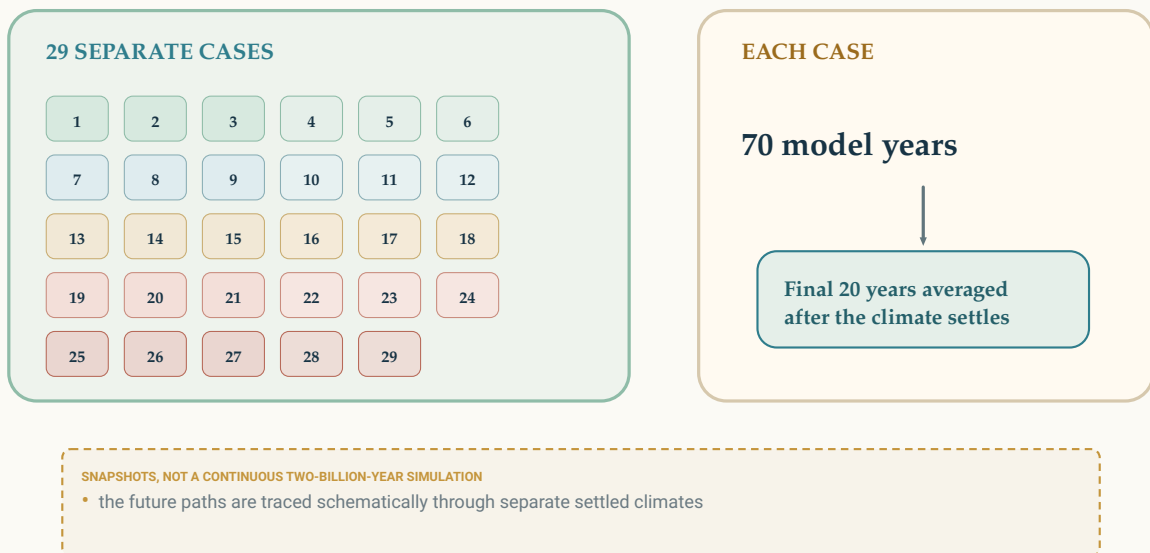
기후모델에서 “정상상태” 란 무엇인가?

정상상태 사례는 선택한 태양과 대기 조건 아래에서 충분히 안정화하도록 둔 모델 기후다. 시뮬레이션 안에서도 날씨는 매일, 매년 달라지지만 장기 평균이 크게 떠돌지 않게 된다.

이는 “이 조건에 맞는 기후는 무엇인가?” 를 묻는 데 유용하다. 실제 지구가 한 조건에서 다음 조건으로 정확히 어떤 경로를 거쳐 이동할지 예측하는 것과는 다르다.

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

각 타일은 모델 시간 70 년 동안 별도로 실행한 ExoCAM 기후이며 마지막 20 년을 평균했다. 연구는 미리 정한 일사량과 이산화탄소 조건에서 안정화된 기후 29 개를 샘플링했지, 20 억 년 동안 연속적으로 진화하는 하나의 지구를 시뮬레이션하지 않았다.

The Clean Paper CC BY 4.0

끝단 I: 이산화탄소는 충분하지만 너무 뜨겁다

약한 풍화 경로에서는 이산화탄소를 400 ppm 으로 고정한다. 태양에너지가 증가하면서 열이 제한 요인이 된다.

논문은 이전 연구에서 가져온 전지구 평균온도 임계값 두 개를 사용한다.

- 전지구 연평균 **323 K**, 약 **50°C**에서는 세계가 대부분의 육상식물에 너무 뜨겁다고 간주한다. 모델은 약 **16억 8천만 년** 후 이 임계값에 도달한다.
- 전지구 연평균 **338 K**, 약 **65°C**에서는 모든 육상식물에 너무 뜨겁다고 간주한다. 모델은 약 **18억 7천만 년** 후 이 임계값에 도달한다.

이는 채택한 생물학적 한계이지 모든 광합성 생물이 반드시 실패하는 보편적 온도는 아니다. 전지구 평균 온 지역별 큰 차이도 숨긴다. 연구는 온도와 물의 조합이 적합할 수 있는 지역도 따로 살펴지만, 기후지도 위의 한 표시가 미래의 모든 피난처나 적응을 목록화할 수는 없다.

끝단 2: 온도는 견딜 만하지만 이산화탄소가 너무 적다

강한 풍화 경로에서는 전지구 평균온도를 288 K, 약 15°C로 유지하면서 대기 이산화탄소가 감소한다. 여기서는 서로 다른 광합성 경로가 얼마나 적은 탄소로도 작동할 수 있다고 가정하느냐에 따라 답이 달라진다.

- 전통적인 **10 ppm** 임계값, 즉 대기 분자 백만 개당 이산화탄소 10 개를 사용하면 C4 광합성의 한계는 약 **13억 5천만 년** 후에 온다. C4 광합성은 옥수수와 사탕수수 같은 식물이 사용하며, 탄소를 고정하는 효소 주변에 이산화탄소를 농축한다.
- 이전 연구에서 논의된 대안적인 **2.9 ppm** C4 임계값을 사용하면 약 **16억 4천만 년** 후로 이동한다.
- 일부 CAM 식물 — 밤에 이산화탄소를 흡수하고 낮에 사용하는 과정을 분리하는 크라솔라산 대사 (crassulacean acid metabolism) 를 쓰는 식물 — 또는 용해된 중탄산염을 이용할 수 있는 수생식물이 버틸 가능성과 관련해 잠정적인 **1 ppm** 임계값을 쓰면 약 **18억 4천만 년** 후가 된다.

마지막 숫자는 생물학적 단서가 가장 크다. 저자들은 1 ppm 한계를 명시적으로 잠정적이라고 부른다. 미래 지구 조건에서 모든 CAM 식물이나 수생식생이 견딜 수 있다고 실험적으로 확립한 임계값이 아니다.

C3, C4, CAM 은 순위가 아니라 전략이다

식물은 탄소를 포획하는 서로 다른 생화학 경로를 사용한다. **C3 광합성**이 가장 흔하다. 옥수수와 사탕수수 등이 쓰는 **C4 광합성**은 탄소를 고정하는 효소 주변에 이산화탄소를 농축하며 이산화탄소가 적을 때 더 잘 작동할 수 있다. **크라솔라산 대사 (CAM)** 는 밤과 낮 사이에 탄소 흡수와 사용을 분리해 많은 식물이 물을 아끼게 한다.

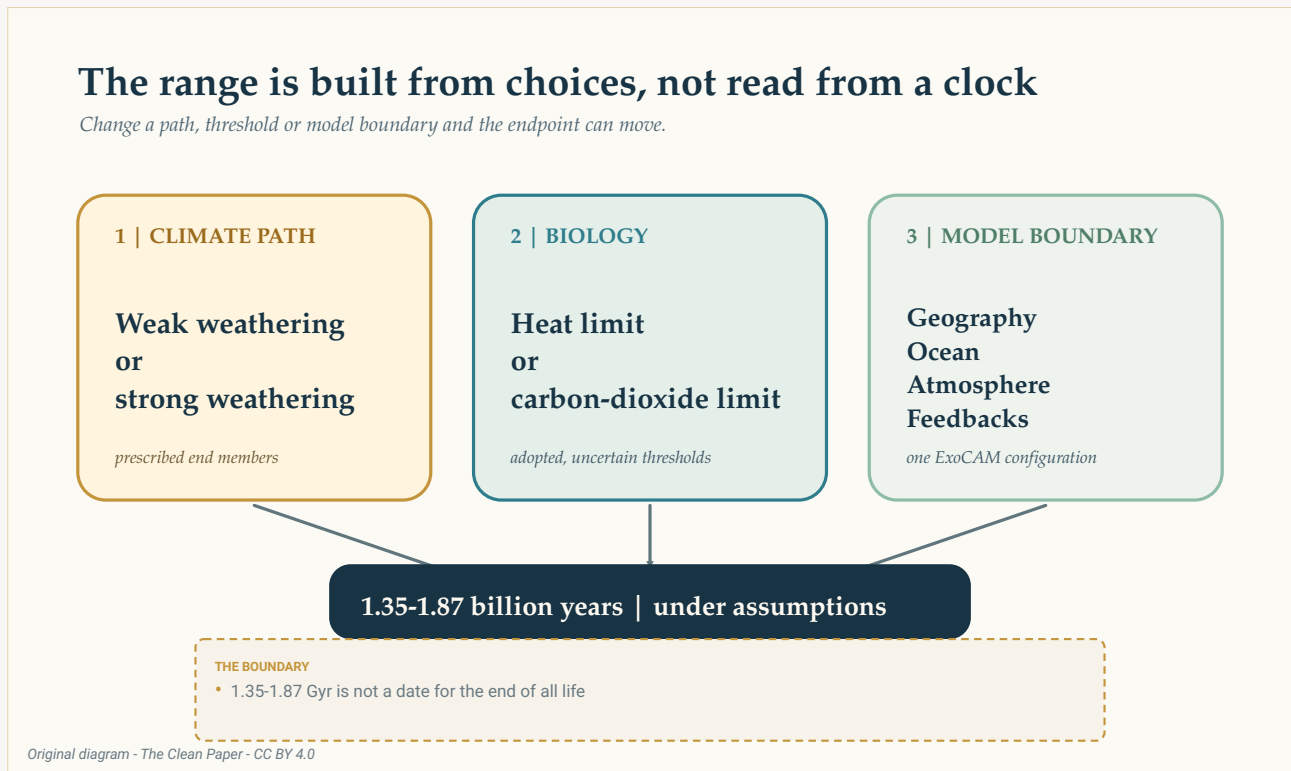
이는 종마다 큰 차이가 있는 전략의 계열이지 “더 우수한” 식물로 올라가는 단계가 아니다. 논문의 매우 낮은 이산화탄소 임계값은 가능한 한계를 탐색하기 위한 가정이며, 미래 생태계가 반드시 그런 능력을 진화시킨다는 보장은 아니다.

18억 6천만 년이 만료일이 아닌 이유

논문에서 자주 인용되는 약 **18억 6천만 년**이라는 값은 두 낙관적 상단값의 평균이다. 이산화탄소 제한 경로의 18억 4천만 년과 열 제한 경로의 18억 7천만 년을 평균한 것이다. 서로 다른 두 시나리오를 압축해

요약한 숫자다. 더 정밀한 세 번째 모델 결과도 아니고 최선 추정 날짜도 아니다.

더 넓은 13 억 5 천만 ~18 억 7 천만 년 범위조차 하나의 확률분포를 갖지 않는다. 하한과 상한은 서로 다른 풍화 가정, 서로 다른 생물학적 임계값, 하나의 기후모델 설정에 의존한다. 이 범위는 시간을 측정하는 만 큼이나 실험에서 선택한 가정들을 측정한다.



13 억 5 천만 ~18 억 7 천만 년이라는 범위는 풍화 경로, 생물학적 임계값, 모델 경계를 선택한 뒤에야 나온다. 모든 생명의 멸종으로 끝나는 시계가 아니라 가정의 지도다.

The Clean Paper CC BY 4.0

다른 한계가 먼저 올 수도 있다

가장 긴 식생 생물권 추정치는 별도의 불확실한 경계, 즉 대규모 해양 손실을 일으킬 수 있는 습윤 온실 또는 폭주 온실 상태에 가까워진다. 일사량이 증가할 때 이런 상태가 언제 시작되는지, 특히 현재와 매우 다른 조건에서는 기후모델들이 크게 엇갈린다. 일부 추정은 가장 낙관적인 광합성 한계보다 먼저 도달할 수 있다고 본다.

그래서 상단 경로를 “지구가 앞으로 18 억 7 천만 년 동안 바다, 익숙한 대륙, 거주 가능한 표면 환경을 유지한다”는 약속으로 읽을 수 없다. 모델에는 미래의 판구조 변화, 육지 면적 변화, 진화하는 생태계, 완전한 동적 해양도 없다. 대기가 에너지를 흡수하고 방출하는 계산 역시 강한 일사량과 극도로 낮은 이산화탄소라는, 서로 다른 모델이 크게 갈라지는 영역까지 밀려 들어간다.

진화적 적응과 기술적 개입은 논문의 토론에서 가능성으로 언급된다. 29 개 기후 시뮬레이션의 출력은 아니다. 모델은 미래 생물이 1 ppm 광합성 경로를 진화시키는 것을 보여 주지 않으며, 문명이 10 억 년 동안

대기를 관리하는 것도 보여 주지 않는다.

이것은 오늘날의 기후위기에 대한 결과가 아니다

태양 밝기 증가는 수억 ~ 수십억 년에 걸쳐 작용한다. 현대의 인간 유발 온난화는 수십 ~ 수백 년 동안 온실 가스가 빠르게 증가하면서 생긴다. 서로 다른 원인이고, 시간척도도 극단적으로 다르며, 답하는 질문도 다르다.

이 연구의 어떤 내용도 현재 기후변화에 대한 증거를 약화시키거나 행동을 미뤄도 된다고 주장하지 않는다. 먼 미래의 어떤 모델 시나리오에서 일부 광합성 생명이 남을 수 있다는 것과, 오늘날의 사회와 생태계가 안전하게 유지되는 기후는 같은 말이 아니다.

논문의 가치는 먼 미래의 질문을 더 엄격하게 만든다는 데 있다. 일사량이 증가할 때 이산화탄소를 고정해 둔 이전의 단순 모델이 과도하게 뜨거워졌을 수 있음을 보여 주고, 광합성 생명이 하나의 전통적 탄소 임계값보다 더 많은 생존 경로를 가질 수 있음을 제안한다. 동시에 수억 년을 더 늘릴 때마다 일련의 가정이 붙는다는 사실도 보여 준다.

잎을 먹여 살리는 태양은 아주 천천히 변하고 있다. 지구가 앞으로 13 억 5 천만 년, 18 억 7 천만 년, 혹은 다른 어느 시간까지 푸르게 남을지는 암석, 물, 대기, 생명이 함께 어떻게 반응하느냐에 달렸다. 정직한 결과는 날짜가 아니다. 그 타협을 더 넓게 바라본 그림이다.

핵심 요약

3 차원 기후 연구는 태양이 서서히 밝아질 때 지구의 식생, 즉 광합성 생물권이 얼마나 오래 지속될 수 있는지를 묻는다. 연구진은 서로 독립적인 정상상태 기후 29 개를 계산하고 그 위로 두 개의 예시적 끝단 경로를 추적했다. 풍화가 약하고 이산화탄소가 400 ppm 으로 고정되면 채택된 육상식물의 열 한계가 지금부터 약 16 억 8 천만 년과 18 억 7 천만 년 후에 온다. 풍화가 강하고 전지구 평균온도가 288 K, 약 15°C 로 고정되면 채택한 광합성 이산화탄소 한계가 약 13 억 5 천만 년, 16 억 4 천만 년, 그리고 잠정적 임계값을 사용할 경우 18 억 4 천만 년 후에 온다. 흔히 인용되는 18 억 6 천만 년은 두 낙관적 상단값의 반올림 평균일 뿐이다. 이는 시나리오에 의존하는 모델 범위이지 지구, 인류, 모든 생명이 끝나는 날짜가 아니다. 모델은 미리 정한 경로, 현재 지리, 슬랩 해양을 사용하고 토양-식생 또는 기후-풍화의 명시적 결합을 포함하지 않으며, 가장 긴 추정치는 불확실한 온실 및 해양 손실 한계에 접근한다.

과장 없이 보면

논문이 보여 주는 것: 이 ExoCAM 설정에서 일사량을 늘리고 이산화탄소를 고정한 3 차원 기후는 비교에 사용된 단순 모델보다 대체로 덜 뜨거워진다. 미리 정한 두 풍화 끝단과 여러 생물학적 임계값을 조합하면 식생 생물권의 한계는 지금부터 약 13 억 5 천만 ~ 18 억 7 천만 년 후에 놓인다.

그렇듯하지만 확립되지 않은 것: 일부 CAM 식물이나 용해 중탄산염을 쓰는 수생식물이 대기 이산화탄소

약 1 ppm 에서도 광합성을 유지할 수 있다는 것, 적응이나 기술이 광합성 생명의 시간을 더 늘릴 수 있다는 것, 실제 기후-풍화 경로가 두 끝단 사이에 머물 것이라는 것.

보여 주지 않는 것: 모든 식물, 모든 생명, 인간 문명, 지구의 바다 또는 행성 자체가 끝나는 고정 날짜, 앞으로 20 억 년을 연속적으로 시뮬레이션한 결과, 현재 인간 유발 기후변화를 가볍게 볼 어떤 이유.

주요 한계: 하나의 기후모델 계열에서 얻은 정상상태 사례 29 개, 동적으로 결합되지 않고 미리 정해진 풍화 경로, 현재 지리, 슬랩 해양, 고정 메탄, 자전축 경사와 궤도 이심률 0, 명시적 토양·식생·생물권 피드백의 부재, 불확실한 열 및 이산화탄소 임계값, 습윤·폭주 온실 조건 근처에서의 큰 모델 간 불일치.

일반 독자는 얼마나 신뢰해야 하는가? 연구가 가능한 모델 범위를 넓히고 이를 지배하는 가정을 명확히 했다는 점에는 높은 신뢰가 적절하다. 이 모델 안에서 수치 범위를 유용한 괄호로 보는 데는 중간 정도의 신뢰가 맞다. 정확한 날짜에는 낮은 신뢰가 적절하다. 가장 먼 끝단은 의도적으로 극단적인 기후 경로와 불확실한 생물학에 의존하기 때문이다.

출처

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>