The Clean Paper

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

地球还能保持绿色多久？气候模型给出的是范围，不是“末日日期”

29 组三维气候模拟在不同假设下，把地球光合生物圈的极限放在距今约 *13.5* 亿到 *18.7* 亿年之间。具体数值取决于人为简化的岩石风化路径、热极限，以及植物可能利用的最低二氧化碳浓度。它们并不是对所有植物、所有生命、人类文明或地球本身何时终结的预测。

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

地球还能保持绿色多久？气候模型给出的是范围，不是“末日日期”

一片叶子的生存建立在一组狭窄条件之上。它需要光、水、二氧化碳，以及自身化学过程能够承受的温度。在一个人的一生里，太阳似乎是这组条件中最稳定的一项。把时间拉长到十亿年尺度，就不是这样了。

太阳在主序星阶段逐渐老化时，会慢慢变亮。更多阳光会让地球升温，但地球也有一个长期响应：雨水、二氧化碳与硅酸盐岩石之间的反应，会从大气中移除二氧化碳。温室效应因此减弱，抵消一部分升温。但正是这种帮助降温的反馈，最终也可能把光合生物“饿”到没有足够碳来制造自身组织。

一篇新的 Journal of Geophysical Research: Atmospheres 论文问的是：哪一种限制会先到来——太热，还是二氧化碳太少？它给出的答案不是“地球死亡的日期”。在两条刻意简化的未来路径中，论文采用的光合生命极限落在距今约 **13.5 亿到 18.7 亿年**之间。

这个范围讨论的是**植被—光合生物圈**：地球生命系统中由光合生物维持的部分，尤其是利用光和二氧化碳合成生物物质的植物及其他生物。它不是对所有微生物的预测，也不是人类文明的寿命，更不是地球本身的寿命。

行星“恒温器”有两个都不确定的旋钮

核心不确定性是**硅酸盐风化**。二氧化碳溶入雨水，与硅酸盐岩石反应，最终以溶解物、矿物和沉积物等形式被带向海洋和沉积环境；在地质时间尺度上，火山又会把二氧化碳释放回大气。这些过程共同构成碳酸盐—硅酸盐循环的一部分，人们常把它比作行星尺度的恒温器。

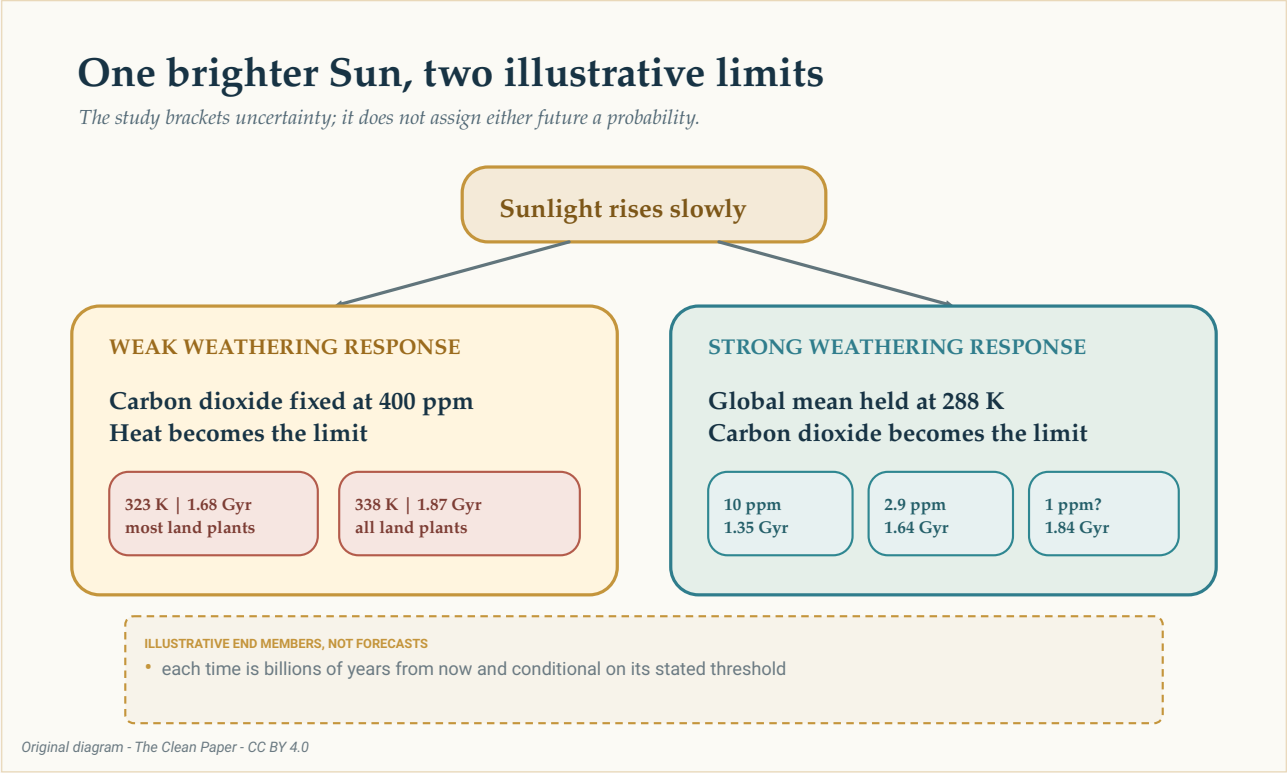
在更温暖、更湿润的世界里，风化可能加快，更快从大气中移除二氧化碳。但科学家并不知道，未来太阳更亮以后，这种反馈会在多大程度上控制地球气候。因此 Jacob Haqq-Misra 和 Eric Wolf 没有挑一条自称“正确”的未来路径，而是模拟两个**端元**：有意选择的极端情况，用来给不确定性划范围。

- 在**弱风化端元**中，大气二氧化碳保持 400 ppm，太阳逐渐变亮并推动温度升高。
- 在**强风化端元**中，全球平均地表温度保持 288 K，也就是约 15°C；随着太阳辐照增强，二氧化碳不断被抽走。

两条分支都没有被论文当作地球实际未来。第一条问的是：如果二氧化碳一直保持较高，升温最终会怎样限制生命？第二条问的是：如果风化把全球平均温度维持在接近今天的水平，碳匮乏最终会怎样限制生命？

> **风化为什么能像“恒温器”？**
>
> 这个类比说的是反馈，不是说地球真有一个控制旋钮。气候变暖如果加速化学风化，就可能让更多大气二氧化碳最终进入溶解物、矿物和沉积物。移除这种温室气体，会抵消一部分最初的升温。在很长的时间尺度上，火山逸气又会把二氧化碳补回大气。

> 但每一环的强弱都取决于降雨、裸露岩石、侵蚀、生物、构造活动和海洋化学。因此论文测试的是限制性响应，而不是把这个 “恒温器” 当成一台已知机器。



论文用两个示意端元给不确定的未来划范围。如果风化响应弱，持续升温会碰到作者采用的陆生植物热阈值；如果风化响应强，持续下降的二氧化碳会碰到作者采用的光合作用阈值。这些是有条件的模型分支，不是概率，也不是倒计时日期。

The Clean Paper CC BY 4.0

29 个已经稳定下来的模型世界，不是一部连续两十亿年的 “电影”

研究人员使用三维全球气候模型 ExoCAM，在不同太阳辐照和不同二氧化碳浓度组合下计算了 **29 个稳态气候**。每个案例运行 70 个模型年。这里一个模型年是固定外部条件下模拟的一次年度循环，用来让人工气候逐渐稳定；它不是把真实地球未来逐年向前推进的一步。模型达到稳定后，对最后 20 年取平均。

这 29 个案例是彼此分开的模型世界。每一次运行只是网格中的一个点，回答：“给定这一组太阳辐照和二氧化碳，这个世界稳定下来后是什么气候？” 计算机并没有从今天的地球开始，把未来 20 亿年中的大气、岩石、海洋和生命连续演化下去。作者做的是在这些预先算好的点之间，沿两条示意风化路径取值；点与点之间的真实演化过程并没有被模拟。

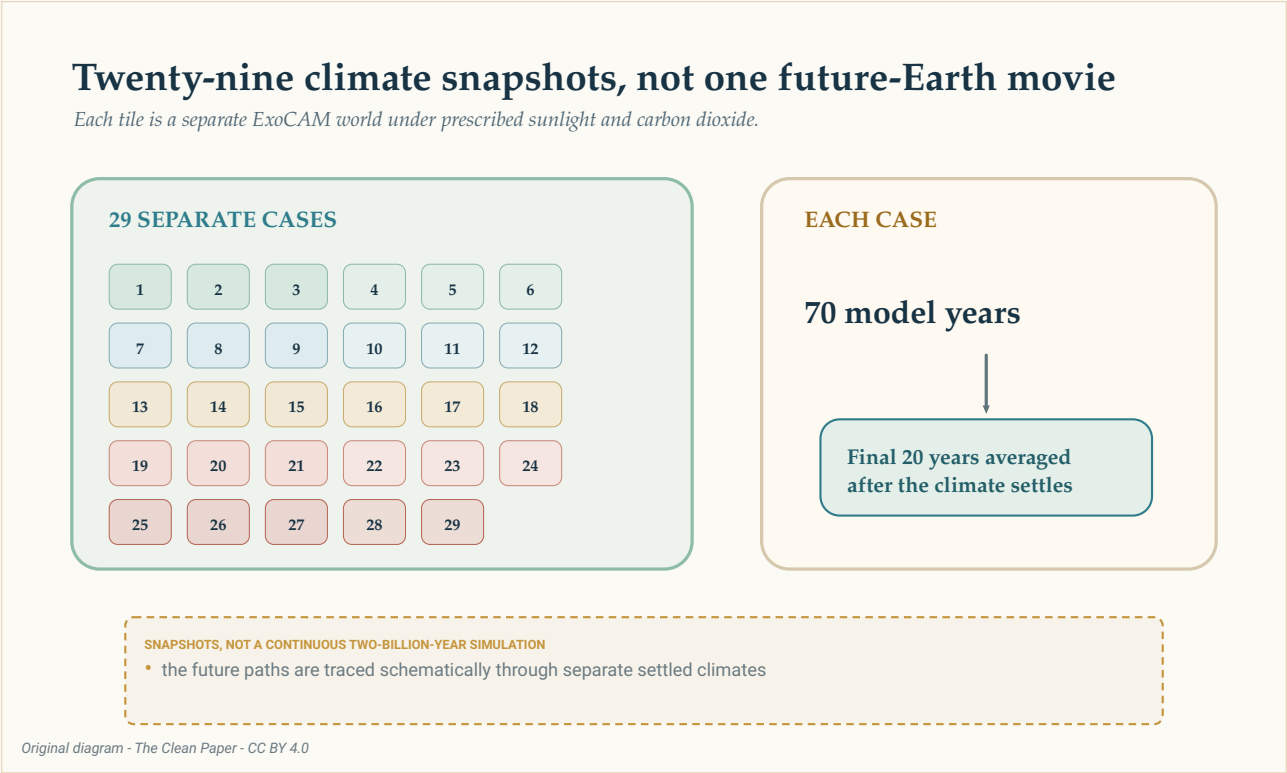
下表复现了官方模型数据档案中的太阳辐照和二氧化碳组合。案例编号只是本文按档案顺序加入的阅读辅助。**S/S0** 是相对太阳常数：模型使用的入射太阳能除以今天的数值 S0。因此 1.2 代表入射太阳能比今天高 20%。**CO2（ppm）**表示每一百万个大气分子中二氧化碳分子的数量。

案例编号	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

这个模型地球仍然很像地球，但它有意做了许多限制。行星大小与地球相同，使用今天的地理分布；海洋是简化的平板/混合层海洋，不是完整环流海洋；大气压约设为今天地球水平（1 bar）；甲烷固定不变。轨道是完全圆形的（偏心率为 0），自转轴没有倾角（倾角为 0）。模型中没有显式土壤、植被，也没有会随生物圈变化而产生的反馈。最重要的是，气候模型并没有与岩石风化模型动态耦合。也就是说，ExoCAM 不是先计算风化、用风化结果更新二氧化碳，再把新二氧化碳送入下一轮气候计算。研究人员是预先规定两条限制路径，再让它们穿过这 29 个气候案例组成的网格。

气候模型里的 “稳态” 是什么意思?

稳态案例指的是：在固定太阳和大气条件下，让模型气候充分稳定。模拟内部每天、每年仍然会有天气变化，但长期平均值不再明显漂移。
这种方法适合问 “在这些条件下，什么气候能稳定存在？” 它与预测真实地球究竟沿着什么精确路径从一组条件走向下一组条件，是两回事。



每个方块都是一次独立的 ExoCAM 气候模拟，运行 70 个模型年，并对最后 20 年取平均。研究在预设的太阳辐照与二氧化碳条件下抽取 29 个稳定气候；它没有连续模拟一颗地球演化 20 亿年。

The Clean Paper CC BY 4.0

端元一：二氧化碳够用，但越来越热

在弱风化分支中，二氧化碳固定为 400 ppm。随着太阳输入增加，热成为限制因素。

论文采用了两个来自既有研究的全球平均温度阈值：

- 全球年平均达到 **323 K**，约 **50°C** 时，模型把世界视为对大多数陆生植物过热。到达这一阈值约在距今 **16.8 亿年**。
- 全球年平均达到 **338 K**，约 **65°C** 时，模型把世界视为对所有陆生植物过热。到达这一阈值约在距今 **18.7 亿年**。

这些是作者采用的生物学极限，不是所有光合生物都必然在同一个温度失效的普适阈值。全球平均值也会掩盖很大的地区差异。研究另外分析了哪些地方的温度和水分组合可能仍然适合生命，但气候图上的一个 “适宜” 标签，不可能穷尽所有未来避难区或适应方式。

端元二：温度还能承受，但二氧化碳太少

在强风化分支中，全球平均温度保持 288 K，约 15°C，而大气二氧化碳不断下降。此时，结果取决于不同光合途径最低能利用多少碳。

- 采用传统的 **10 ppm** 阈值——每一百万个大气分子中有 10 个二氧化碳分子——C4 光合作用的限制约在距今 **13.5 亿年**到来。C4 光合作用见于玉米、甘蔗等植物，它能在固碳酶周围浓缩二氧化碳。
- 如果采用既有研究讨论的另一项 **2.9 ppm** C4 阈值，这一极限会推迟到约 **16.4 亿年**。
- 如果采用一个暂定的 **1 ppm** 阈值——与部分 CAM 植物（采用景天酸代谢，在夜间吸收二氧化碳、白天再使用）或能够利用溶解碳酸氢根的水生植物可能继续存活有关——则会推迟到约 **18.4 亿年**。

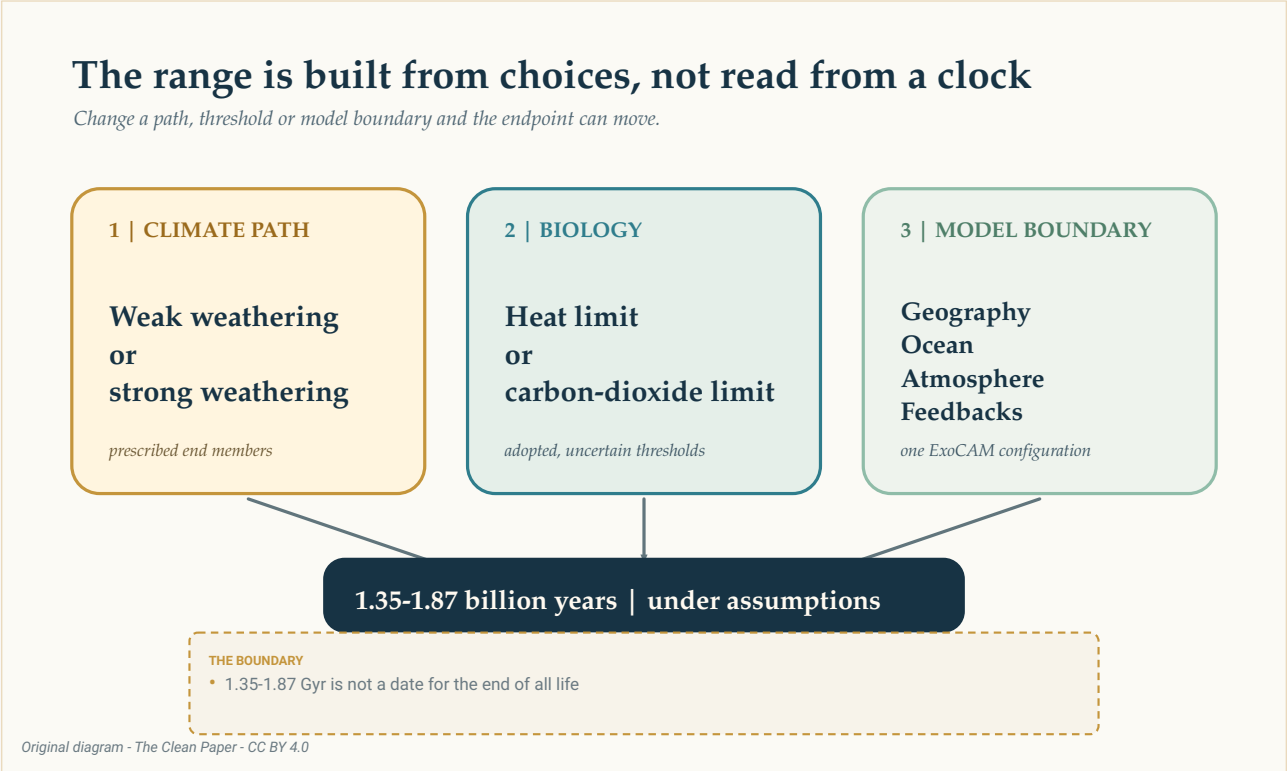
最后一个数字的生物学不确定性最大。作者明确把 1 ppm 称为暂定阈值。它并不是在 “未来地球条件” 下，通过实验确认所有 CAM 植物或水生植被都能存活的界线。

> **C3、C4 和 CAM 是不同策略，不是一架 “优劣阶梯”**
>
> 植物使用不同生化路线获取碳。**C3 光合作用**最常见。**C4 光合作用**见于玉米、甘蔗等植物，它会在固碳酶周围浓缩二氧化碳，在二氧化碳稀缺时可能更有优势。**景天酸代谢（CAM）**则把碳的吸收与利用分到夜间和白天进行，帮助许多植物节约水分。
> 这些是各自包含许多物种差异的策略家族，不是一代比一代 “更高级” 的植物。论文采用的极低二氧化碳阈值，是为了探索可能极限而设的假设，并不能保证未来生态系统一定会演化出利用这些条件的能力。

为什么 18.6 亿年不是 “保质期”

论文经常被引用的约 **18.6 亿年**，其实只是两个最乐观上限的平均值：二氧化碳受限分支的 18.4 亿年，与热受限分支的 18.7 亿年。它只是用一个数字概括两种不同情景，并不是第三个精度更高的模型结果，更不是 “最佳估计日期”。

即使把范围放宽到 13.5–18.7 亿年，也不能给它附上一个统一概率。上下限依赖不同的风化假设、不同的生物学阈值以及同一个气候模型配置。这个范围测量的是实验选择有多大，也同样是在 “测量时间”。



只有先选定一条风化路径、一个生物学阈值和一组模型边界，才会得到 13.5–18.7 亿年的范围。它更像一张 “假设地图”，不是一个最终指向所有生命灭绝的倒计时钟。

The Clean Paper CC BY 4.0

其他限制可能会更早到来

最长的植被生物圈估计已经接近另一个独立而不确定的边界：湿温室或失控温室状态，它们可能造成大规模海洋损失。在太阳辐照不断增加、尤其远离今天条件时，不同气候模型对这些状态何时开始存在明显分歧。有些估计把它们放在最乐观的光合作用极限之前。

这意味着，上限分支不能被理解成 “地球保证会一直保有海洋、熟悉的大陆和可居住表面环境直到 18.7 亿年以后”。模型也没有包含未来板块构造、陆地面积变化、演化中的生态系统或完整动力海洋。用于计算大气怎样吸收和发射能量的方法，也被推到了强太阳辐照和极低二氧化碳的区域，而不同模型在那里会开始显著分歧。

进化适应和技术干预在论文讨论中被提到作为可能性，但它们不是 29 个气候模拟的输出。模型并没有显示未来生物会演化出可在 1 ppm 二氧化碳下工作的光合作用途径，也没有显示某个文明能管理大气十亿年。

这不是一项关于今天气候危机的结果

太阳变亮发生在数亿到数十亿年尺度；今天由人类活动驱动的变暖，来自几十年至几百年间温室气体迅速增加。两者是完全不同的强迫，时间尺度也天差地别，回答的是不同问题。

这项研究没有任何内容会削弱今天气候变化的证据，也没有为拖延行动提供理由。在一个遥远模型情景下“某些光合生命也许仍能存活”，与“今天的社会和生态系统可以安全承受这种气候”完全不是一回事。

论文的价值在于，它让一个极遥远的问题变得更严谨。它显示：早期更简单的模型在太阳辐照增加、二氧化碳保持固定时，可能把升温估得过高；同时，光合生命继续存在的路径也可能比单一经典碳阈值暗示的更多。它同样清楚地说明，任何额外延长的几亿年后面，都跟着一整串假设。

供养一片叶子的太阳正在慢慢改变。地球究竟还能保持绿色 13.5 亿年、18.7 亿年，还是其他时间，取决于岩石、水、大气和生命怎样共同响应。更诚实的结论不是给出一个确定日期，而是更清楚地看到这些长期相互作用可能把结果推向多大的范围。

简明总结

这项三维气候研究问：随着太阳缓慢变亮，地球以植被和其他光合生物为主的生物圈还能持续多久？研究人员计算了 29 个彼此独立的稳态气候，再让两条示意端元路径穿过这些结果。弱风化情况下，二氧化碳固定为 400 ppm，论文采用的陆生植物热极限约在距今 16.8 亿和 18.7 亿年达到。强风化情况下，全球平均温度固定为 288 K（约 15°C），作者采用的光合作用二氧化碳极限约在距今 13.5 亿、16.4 亿，以及采用暂定阈值时 18.4 亿年达到。经常被引用的 18.6 亿年，只是两个最乐观上限的四舍五入平均值。这些都是依赖情景的模型范围，不是地球、人类或所有生命结束的日期。模型采用预设路径、现代地理、平板海洋，没有显式的土壤—植被或气候—风化耦合，而且最长估计已经接近不确定的温室与海洋损失边界。

不绕弯检查

论文真正显示了什么：在这个 ExoCAM 配置中，当太阳辐照增加而二氧化碳固定时，三维气候总体升温幅度低于论文用于比较的简化模型。在两条预设风化端元和多个采用的生物学阈值下，植被生物圈的限制落在距今约 13.5–18.7 亿年。

合理但尚未确立的部分：某些 CAM 植物或利用溶解碳酸氢根的水生植物，可能在大气二氧化碳接近 1 ppm 时仍能进行光合作用；适应或技术可能进一步延长光合生命；真实气候—风化路径会一直落在这两个模型端元之间。

论文没有显示什么：所有植物、所有生命、人类文明、地球海洋或地球本身结束的固定日期；未来 20 亿年的一段连续模拟；或任何可以轻视今天人为气候变化的理由。

主要局限：来自单一气候模型家族的 29 个稳态案例；风化路径是预设而不是动态耦合；使用现代地

理；平板海洋；固定甲烷；零轴倾和零轨道偏心率；没有显式土壤、植被或生物圈反馈；热与二氧化碳阈值不确定；而在湿温室和失控温室附近，不同模型存在很大分歧。

普通读者应该有多大信心？ 可以高度相信这项研究拓宽了合理的模型范围，也更明确地指出哪些假设在控制结果。对于这些假设内的数值区间作为一个有用“括号”，可以有中等信心。对于任何精确日期，则应该有很低信心，因为最遥远的端点依赖刻意极端的气候路径和不确定的生物学阈值。

来源

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