

# 第二章：地球系统及其演化

Jintai Lin 林金泰

Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

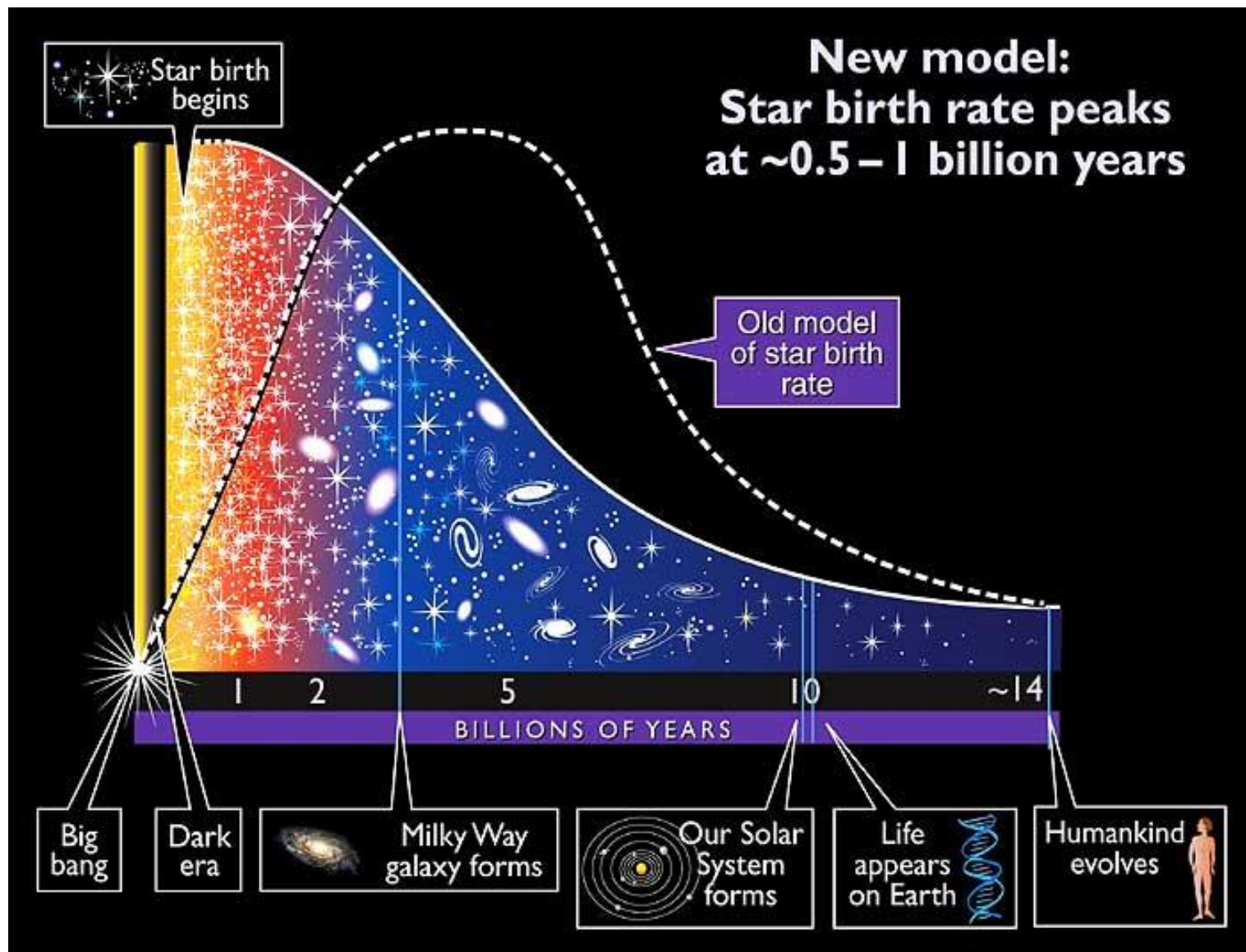
linjt@pku.edu.cn

<http://www.pku-atmos-acm.org/>

课件改编自俞妍老师课件

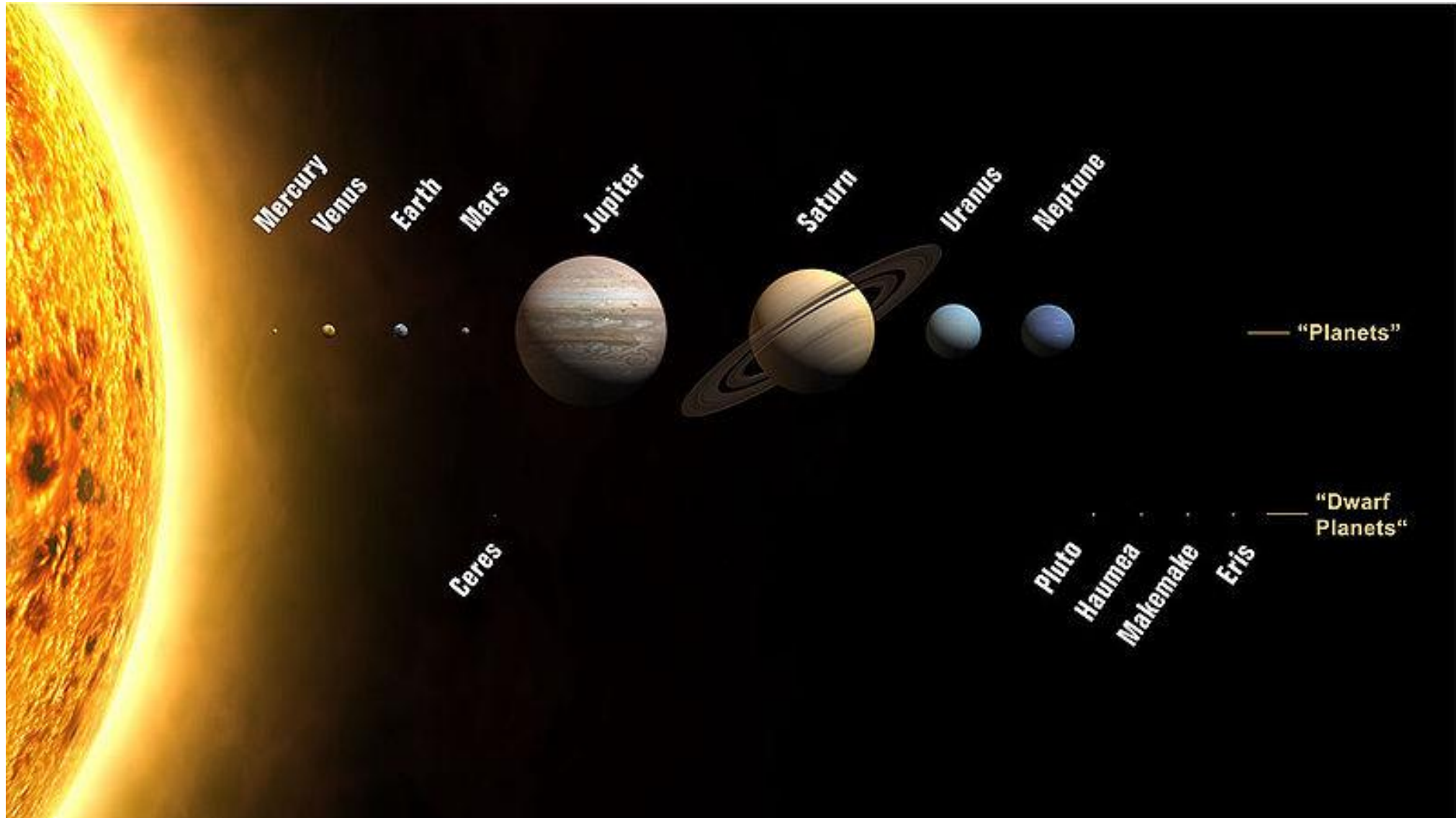


# 宇宙中的地球

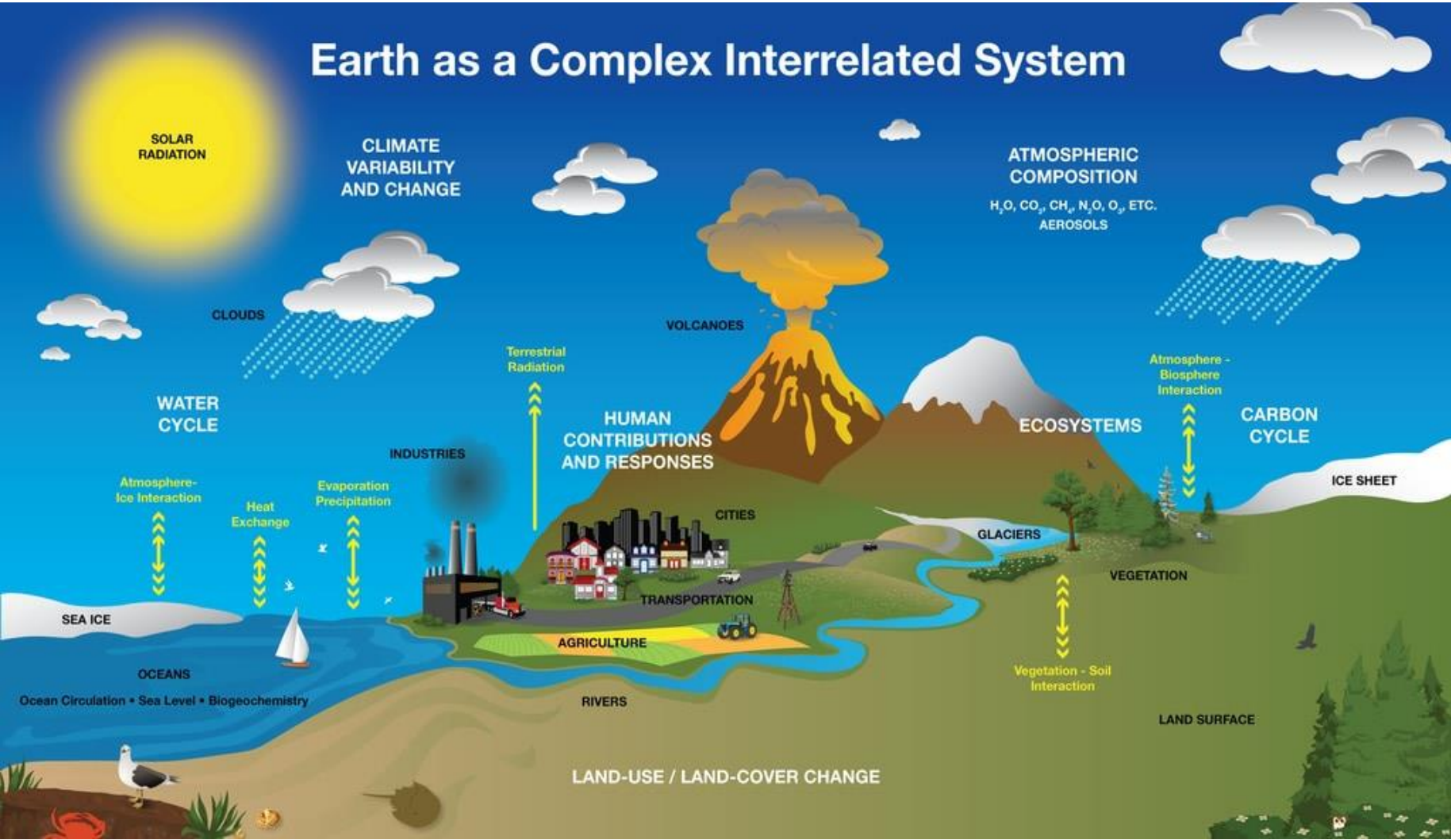


- 宇宙大爆炸大约在138亿年前；
- 银河系形成大约在130亿年前；
- 太阳系形成大约在46亿年前；
- 地球形成大约在45-46亿年前；
- 地球生命出现在38亿年前？

# 太阳系中的地球



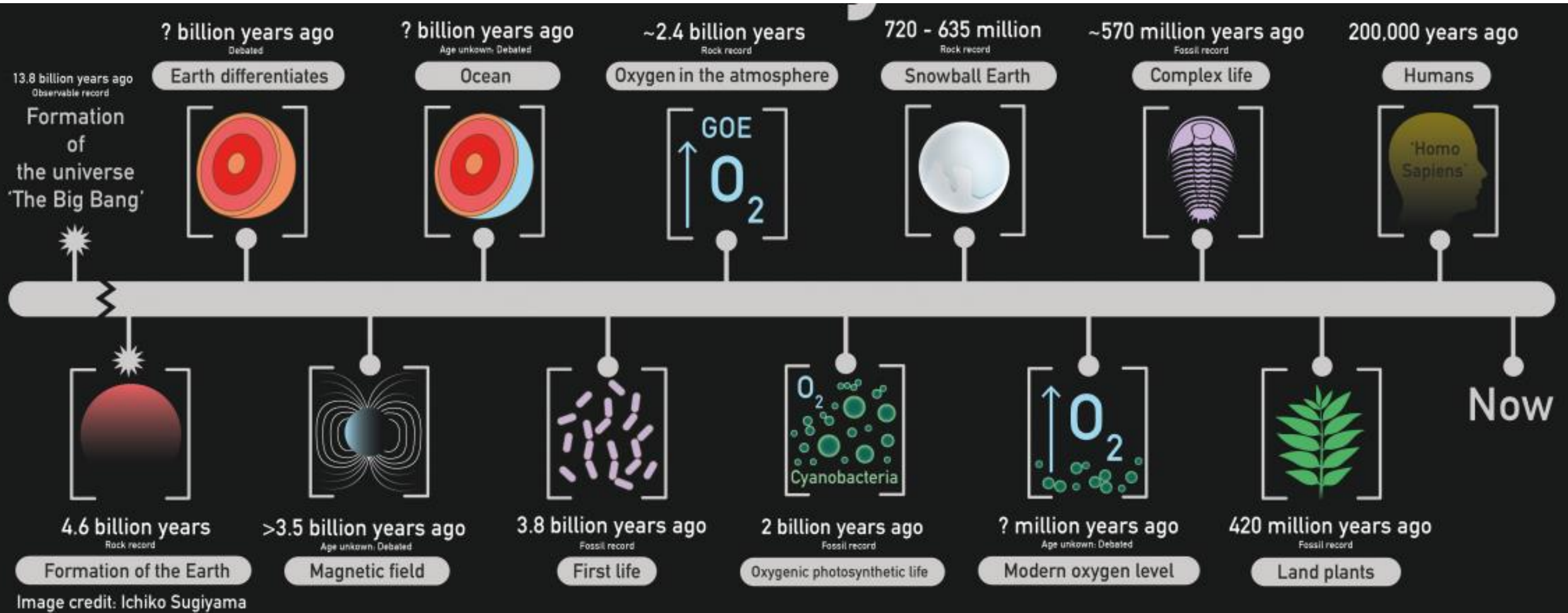
# 地球（气候）演化受到外强迫和圈层相互作用的影响



Source: NASA Goddard Space Flight Center



# 地球演化历史：与气候密切相关



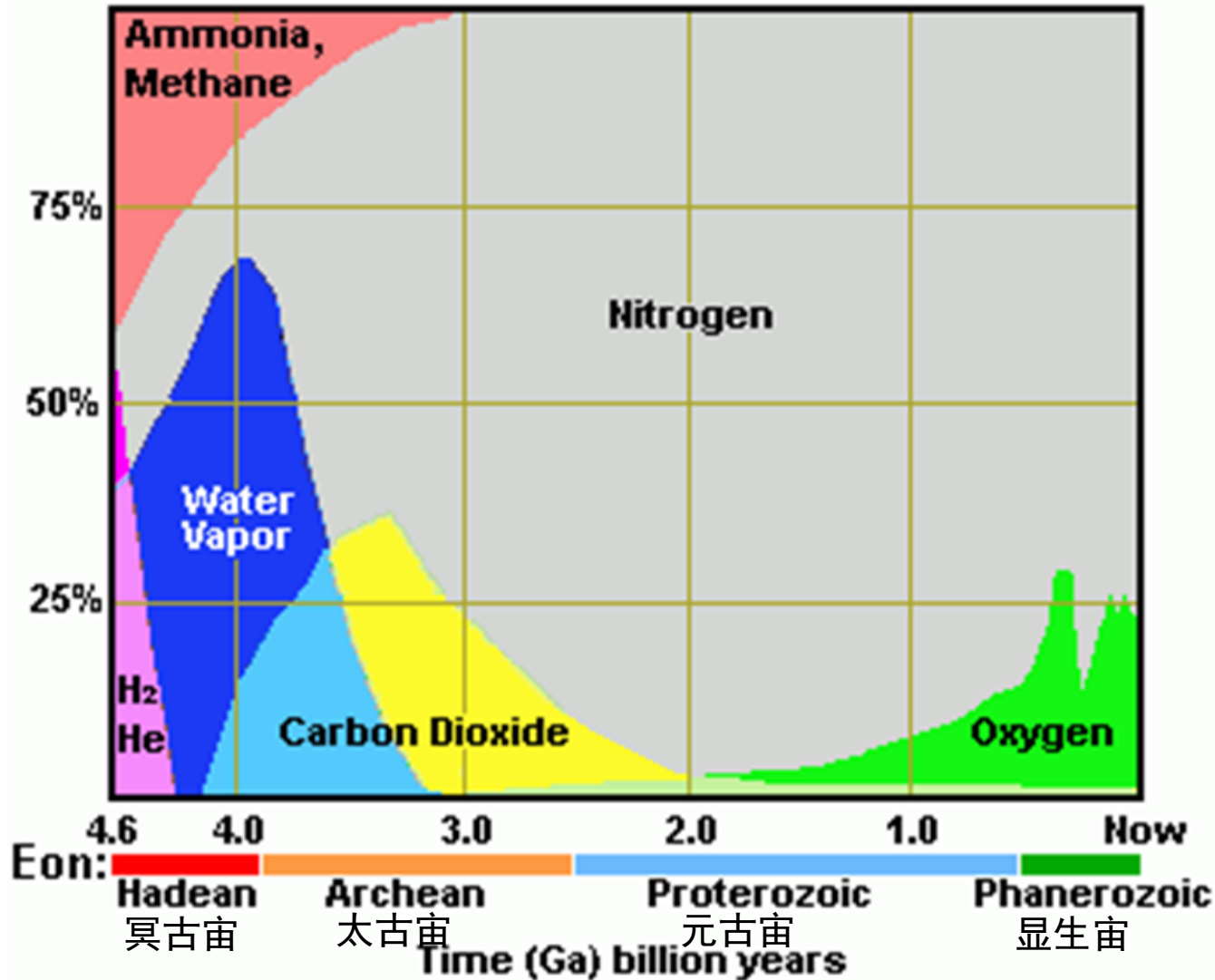
Holland, H.D., 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philos T R Soc B* 361, 903–915.

Kasting, J., 1993. Earth's early atmosphere. *Science* 259, 920–926.

Reddy and Evans, 2009. Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution. *Geological Society, London* 323, 1–26.

# 地球大气的演化

% of Atmosphere Composition of Earth's atmosphere

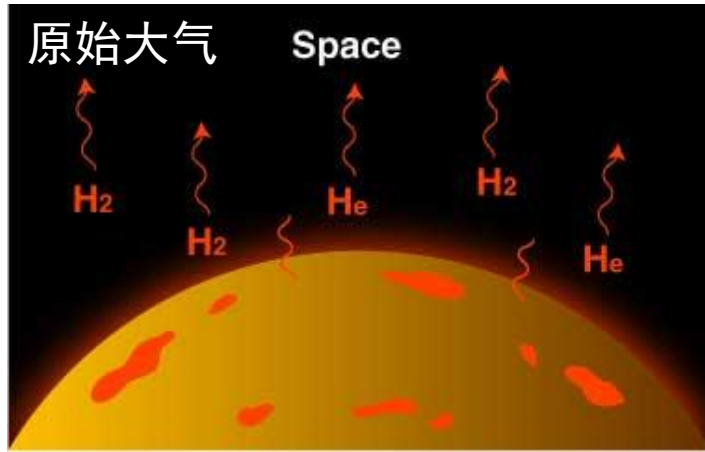


- 地球自从它形成以来，其大气的演变可分为三个阶段：原始大气、次生大气、现代大气。

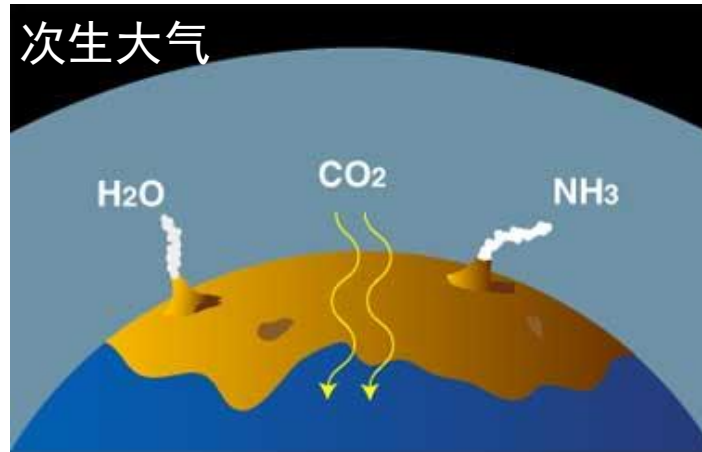
Q: 请推理他们的时间

- 原始大气的形成和星系的形成过程密切相关。原始大气出现距今约46亿年。因此只能在现有的科学知识加上推理来研究大气演变。科学家们从不同的角度提出了不同大气演化模式。

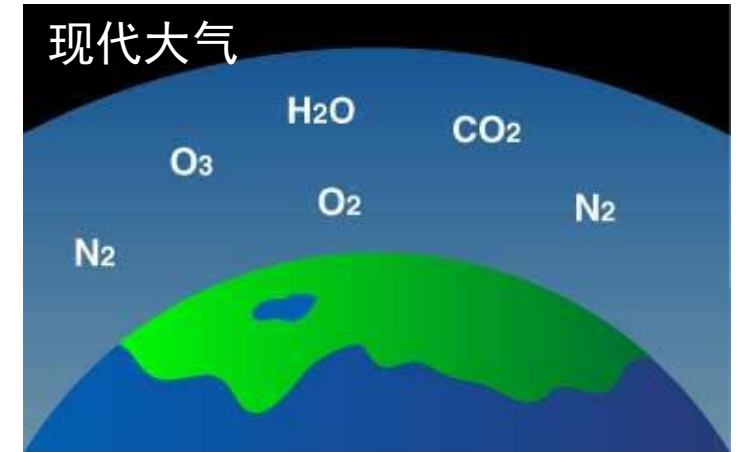
# 地球大气的演化



- 太阳系初始星云中的气体，大部分 $H_2$ 和 $He$ ，少量 $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$
- 较轻的气体逃逸或被太阳风带走
- 较重的气体留下来，开始分化
- 原始大气存在不太久（大约数千万年至数亿年）



- 主要来自地球内部，由火山喷发产生
- 少部分来自彗星撞击
- 按现代火山喷发的成分，主要是水汽（79%）、二氧化碳（12%）、甲烷，还有一些氨和硫的化合物
- 次生大气中没有氧，即使有也不能保留。因为当时地面温度高，地表有很多铁，氧将很快和铁反应形成氧化铁
- 次生大气的存在时间大约45亿年前到20亿年前



- 现代大气的主要成份是 $N_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$ ， $O_3$ 等
- 其中，氧的出现是现代大气形成的重要标志，与生命的出现和演化有着重要关系
- 因此，氧气的起源成为人们最为关心的问题之一

# 氧的演化：氧气的出现与生命密切相关

- 早期的大气中没有氧气分子，氧元素存在于H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>中。
- 氧气可以通过两种可能机制而产生：一是通过光解反应从H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>分解而来；另一种是生物的光合作用。
- 如果氧气起源于第一种机制，我们则必须解释大气中缺乏氢和碳的事实。尽管氢的缺乏可以用向太空的逃逸来解释，但这样的逃逸速度非常缓慢，并不足以解释大气中氢的缺乏。
- 生物的光合作用机制则没有这样的困难，也就是光合作用把H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>转化为O<sub>2</sub>，碳则存储在生（植）物中。

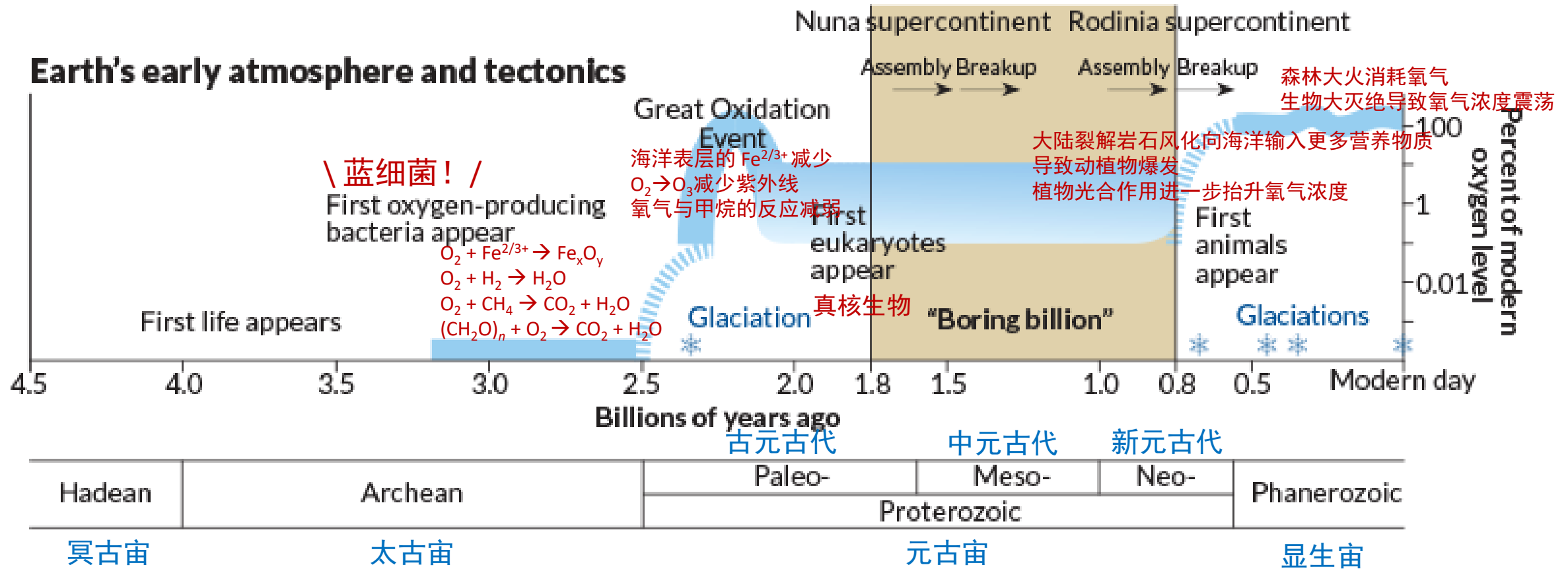


FYI: N<sub>2</sub>的出现跟板块运动有关

<https://www.nature.com/articles/ngeo22718>



# 氧的演化：氧气浓度逐渐上升然后趋于平稳震荡



(Timothy et al. 2014)

Chen et al. 2022 Reconstructing Earth's atmospheric oxygenation history using machine learning

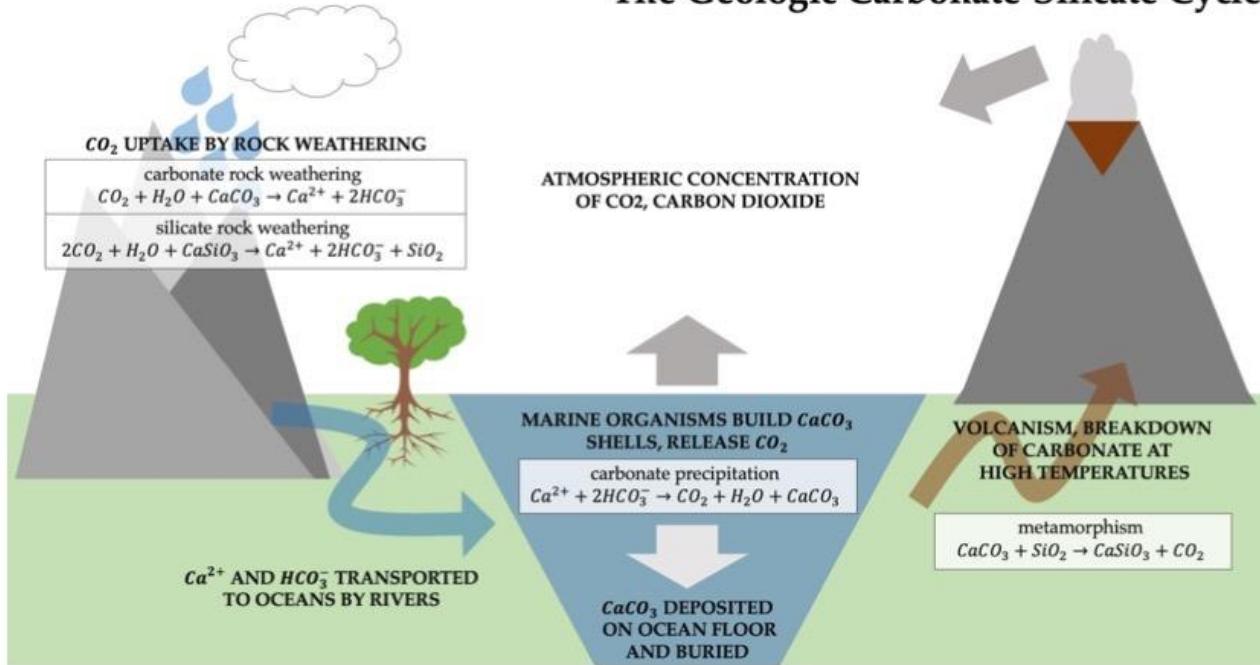
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-33388-5>

Meng et al. 2022 Formation of oxidized sulfur-rich magmas in Neoarchaean subduction zones

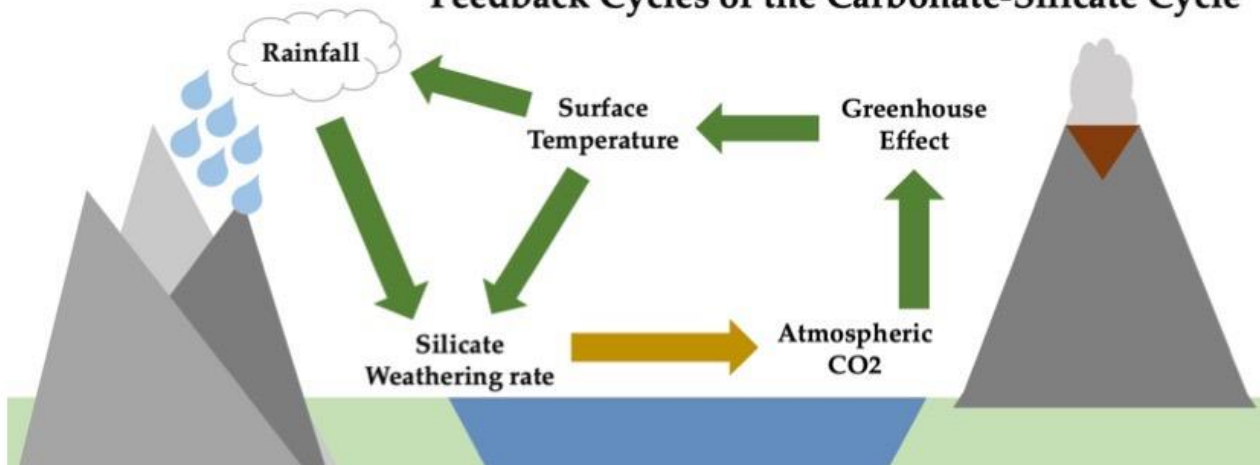
<https://www.nature.com/articles/s41561-022-01071-5>

# 地质尺度的碳循环

The Geologic Carbonate-Silicate Cycle



Feedback Cycles of the Carbonate-Silicate Cycle



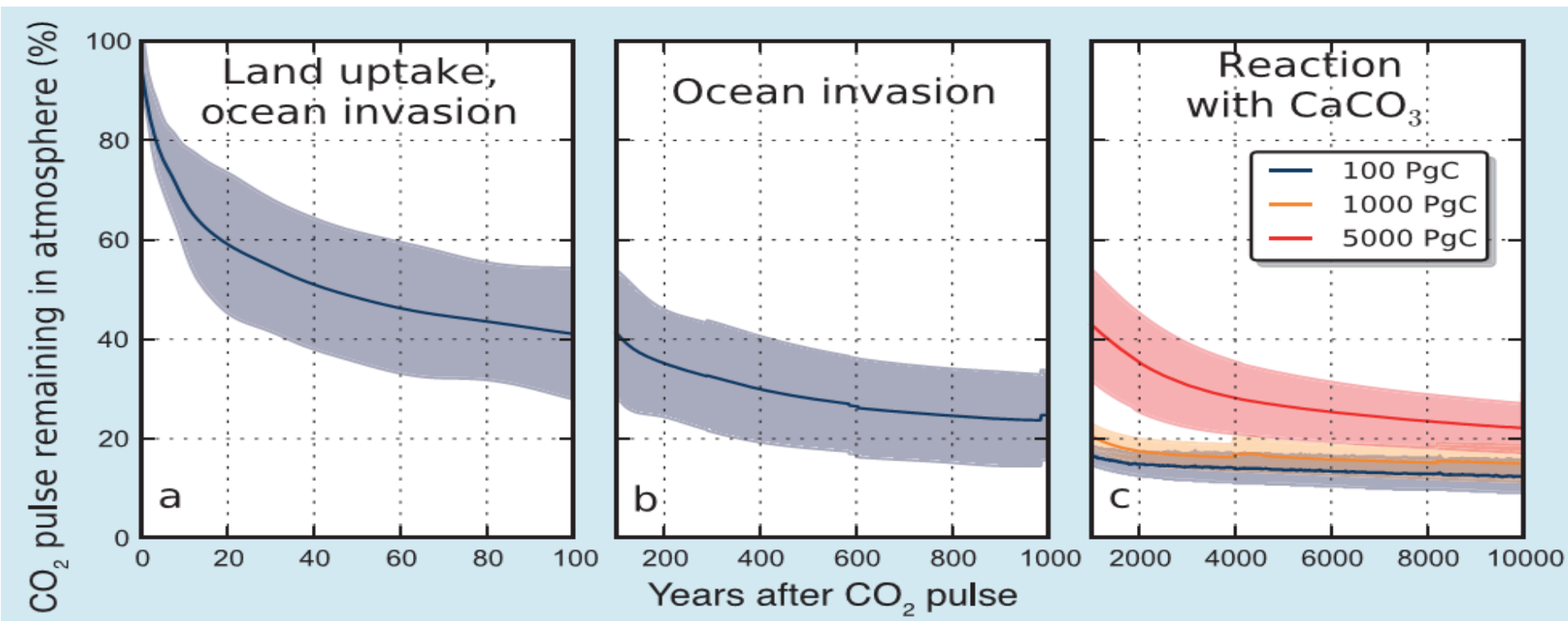
碳酸盐-硅酸盐循环：  
地质尺度地球温度稳定器

- CO<sub>2</sub>增加，大气温度升高，冰雪消退，大面积裸露的硅酸盐增多，风化反应加强，形成碳酸钙，大气CO<sub>2</sub>降低，温度降低，形成负反馈。
- 碳酸盐-硅酸盐循环负反馈机制是在地质时间尺度上，稳定地球气候系统的重要机制。
- 该负反馈机制与冰-雪反照率反馈是联系在一起的。
- 该机制失控，也是导致冰雪地球形成的重要原因。

[https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonate%20silicate\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonate%20silicate_cycle)

# 二氧化碳可变的大气寿命

Processes	Time scale (years)	Reactions
Land uptake: Photosynthesis–respiration	1–10 <sup>2</sup>	$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{photons} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{heat}$
Ocean invasion: Seawater buffer	10–10 <sup>3</sup>	$\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{HCO}_3^-$
Reaction with calcium carbonate	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>	$\text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
Silicate weathering	10 <sup>4</sup> –10 <sup>6</sup>	$\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$



# 地球生命的（可能）起源

- 最初的生命来自哪里，并没有一定的结论。
- 在实验室中模拟还原大气的条件，用火花放电的方法，可以制造出有机大分子。
- 海底热液温泉（白烟囱、黑烟囱）？
- 宇宙空间也发现有有机大分子。它们都可能是生命的来源？彗星？

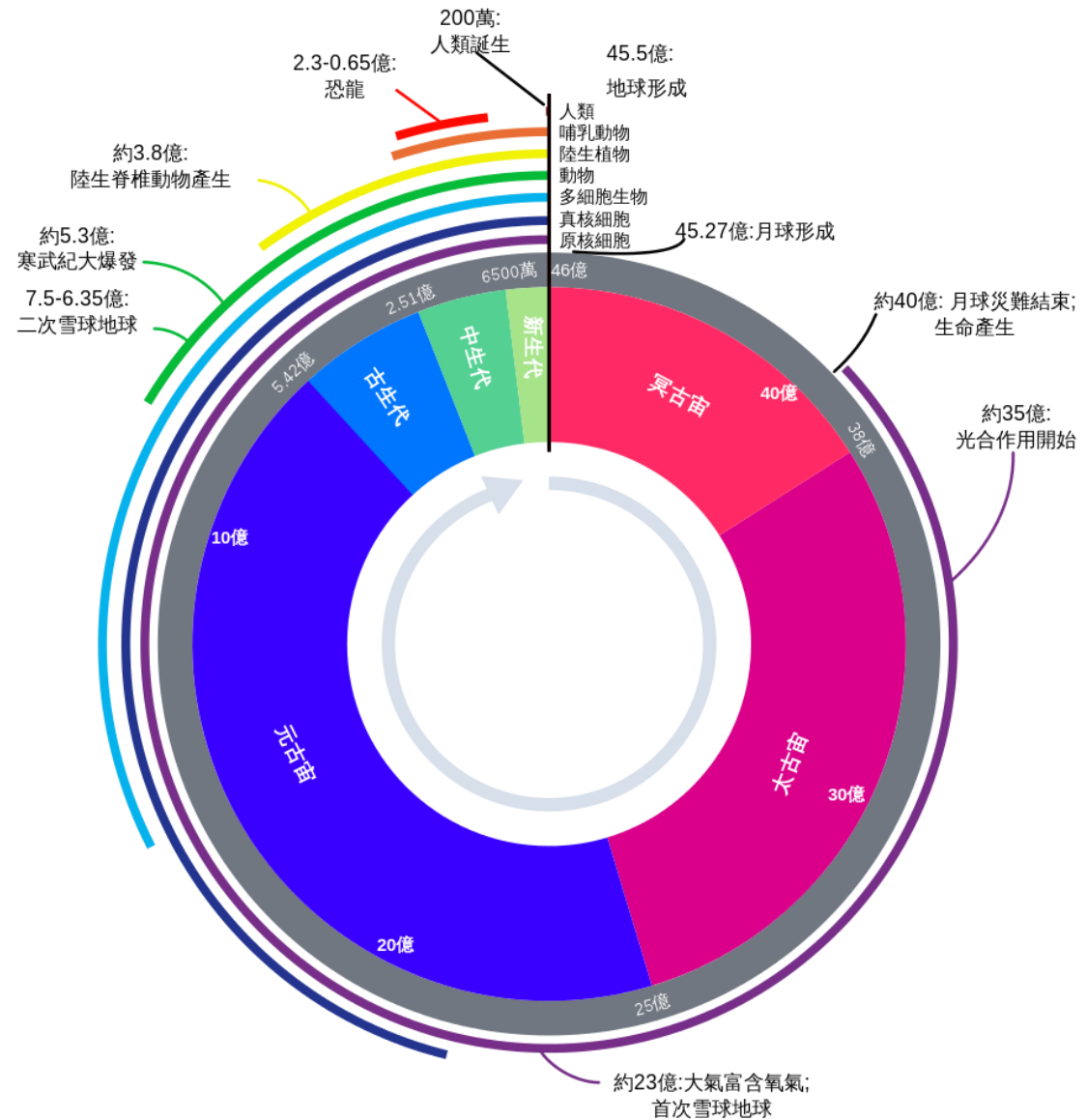
【TED教育】神秘的地球生命起源（中英特效字幕）

[https://www.bilibili.com/video/BV1sQ4y1K7gx/?spm\\_id\\_from=333.337.search-card.all.click&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1sQ4y1K7gx/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)



# 地球生命的演化

宙	代	纪	世	距今大约年代 (百万年)	主要生物演化	
显生宙	新生代	第四纪	全新世	现代	人类时代, 现代植物	
			更新世	0.01		
		第三纪	上新世	2.4		
			中新世	5.3		
			渐新世	23	哺乳动物, 被子植物	
			始新世	36.5		
			古新世	53		
			65			
		中生代	白垩纪	晚		
				中早		
	侏罗纪		晚	爬行动物, 裸子植物		
			中早			
	三叠纪		晚			
			中早			
	古生代	二叠纪	晚			
			中早			
		石炭纪	晚	两栖动物, 蕨类		
			中早			
		泥盆纪	晚			
			中早	鱼, 蕨类		
		志留纪	晚			
			中早			
		奥陶纪	晚			
			中早	蕨类		
	寒武纪	晚				
		中早	无脊椎动物			
	元古宙	元古代	震旦纪		570	古老的菌藻类
	太古宙	太古代			800	
				2500		
				4000		



# 物种大灭绝

【TED-ed】这种单细胞生物，几乎灭绝了地球生命

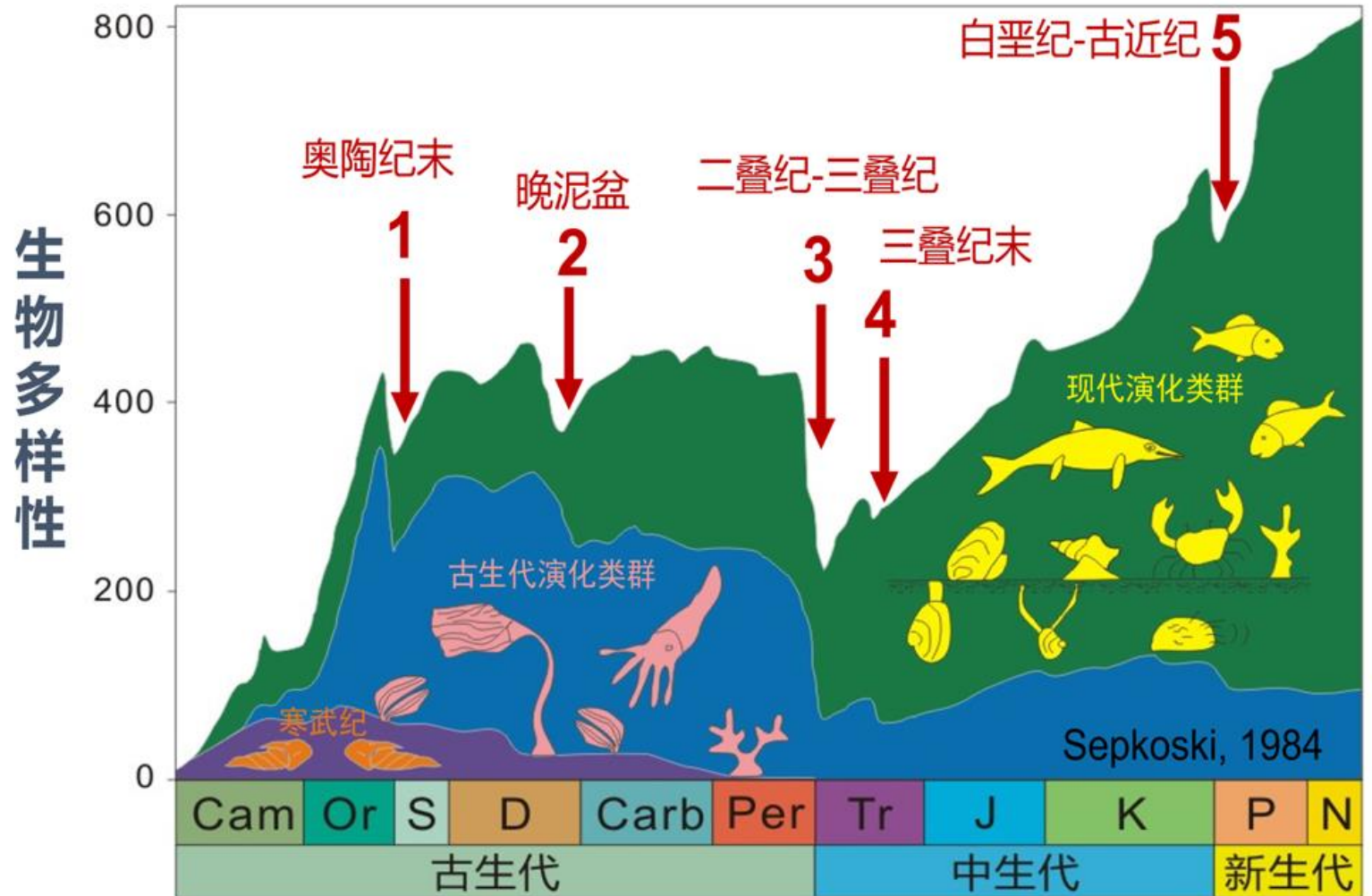
[https://www.bilibili.com/video/BV1ns411r7dB/?spm\\_id\\_from=333.337\\_search-card.all.click&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1ns411r7dB/?spm_id_from=333.337_search-card.all.click&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

五次生物大灭绝一次性看完

[https://www.bilibili.com/video/BV1xU4y1k7Qo/?spm\\_id\\_from=333.337\\_search-card.all.click&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1xU4y1k7Qo/?spm_id_from=333.337_search-card.all.click&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

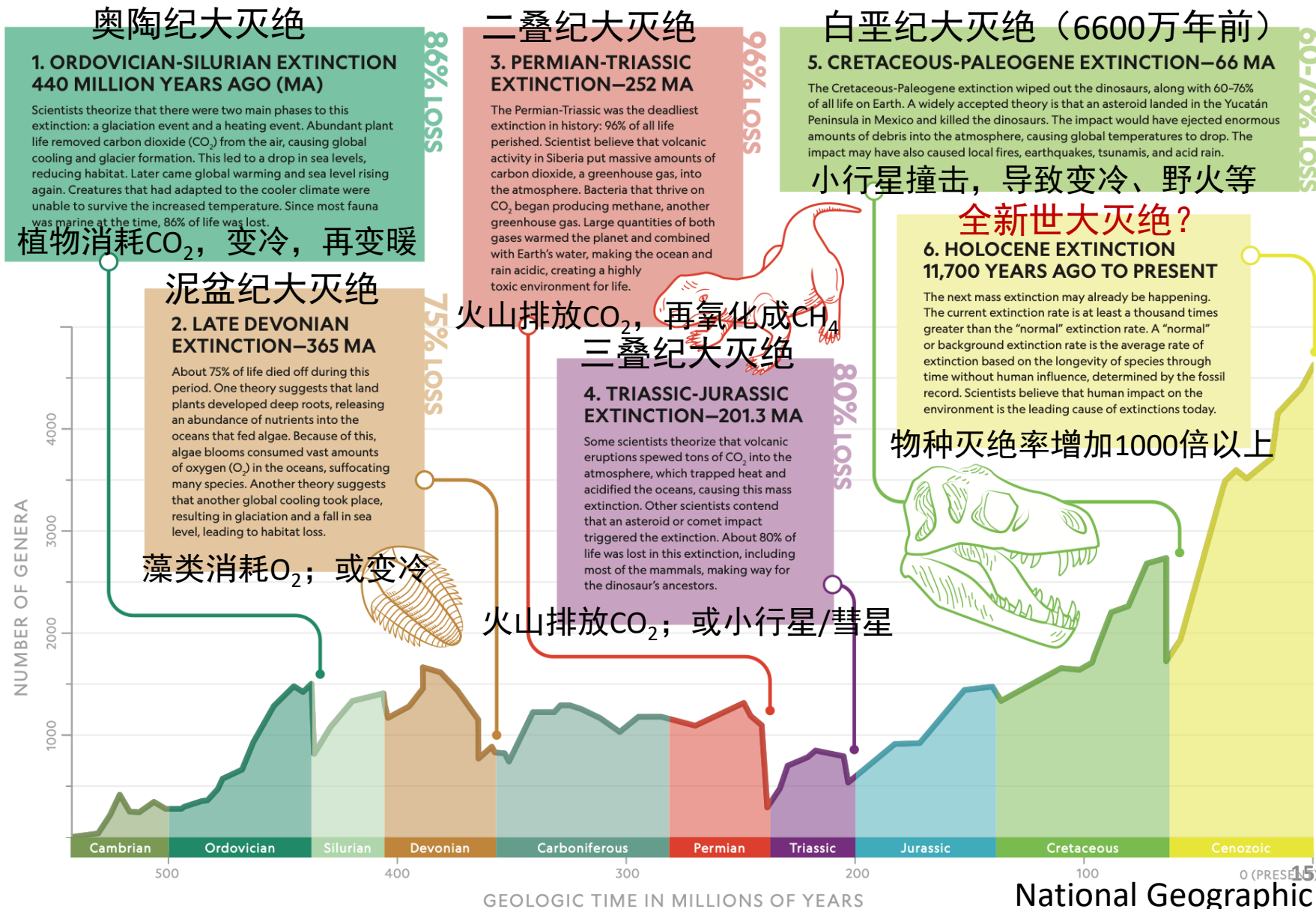
讨论1：我们怎么知道什么时候发生了物种大灭绝？

讨论2：物种大灭绝的几种常见原因？



# 物种大灭绝有多种起因

- 生物演化 → 温室气体和氧气含量变化
- 火山爆发 → 温室气体和尘埃排放
- 小行星/彗星撞击





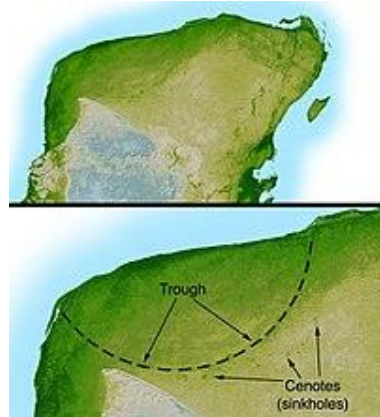
# 以恐龙大灭绝为例

白垩纪—古近纪灭绝事件（Cretaceous–Paleogene extinction event），又称白垩纪—第三纪灭绝事件（Cretaceous–Tertiary extinction），简称K–Pg灭绝或K–T灭绝，是发生于6600万年前的一次大规模物种灭绝事件。所有的非鸟恐龙、沧龙科、蛇颈龙目、翼龙目、菊石亚纲以及多种植物都在这次事件中集体灭绝。鸟类与哺乳类则存活下来并辐射演化成为新生代的优势动物。

## 小行星撞击说

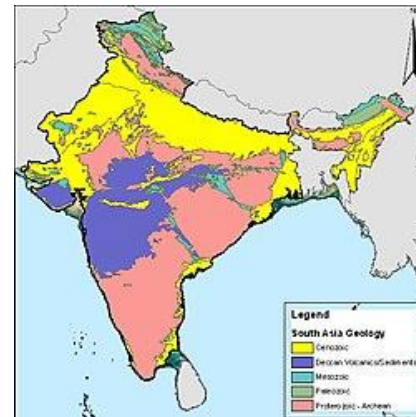


来自美国怀俄明州的含白垩纪—古近纪界线岩石。中间的白色黏土层平均铱含量是其他地层的1000倍，指示可能的小行星撞击。



墨西哥尤卡坦半岛希克苏鲁伯陨石坑，直径达180公里。

## 火山爆发说



印度的岩石年代图，粉红色部分为德干暗色岩爆发形成的火成岩。



德干暗色岩的一个侵蚀丘陵，意味着火山爆发为本次灭绝事件的可能原因之一。

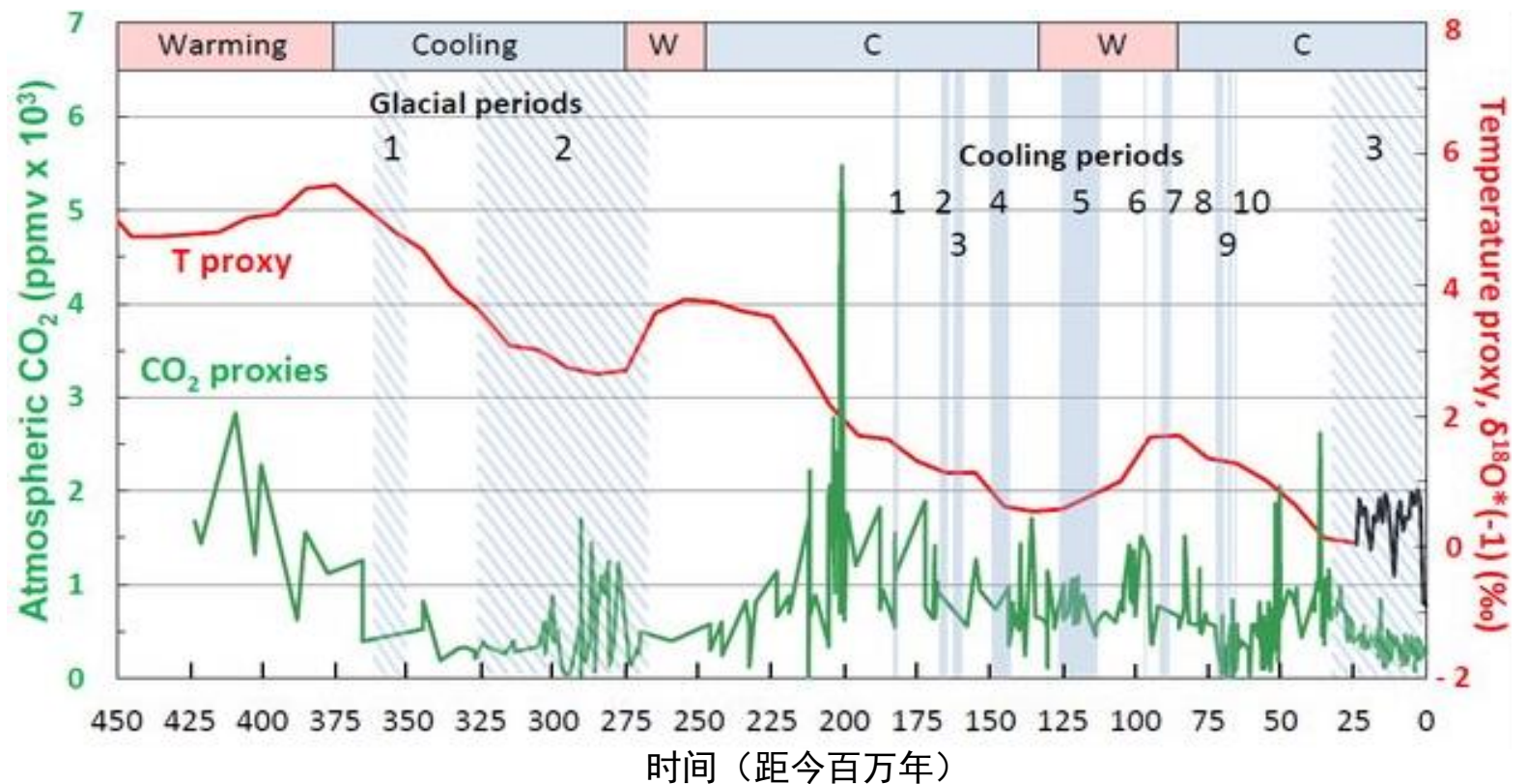


# 地球气候演化

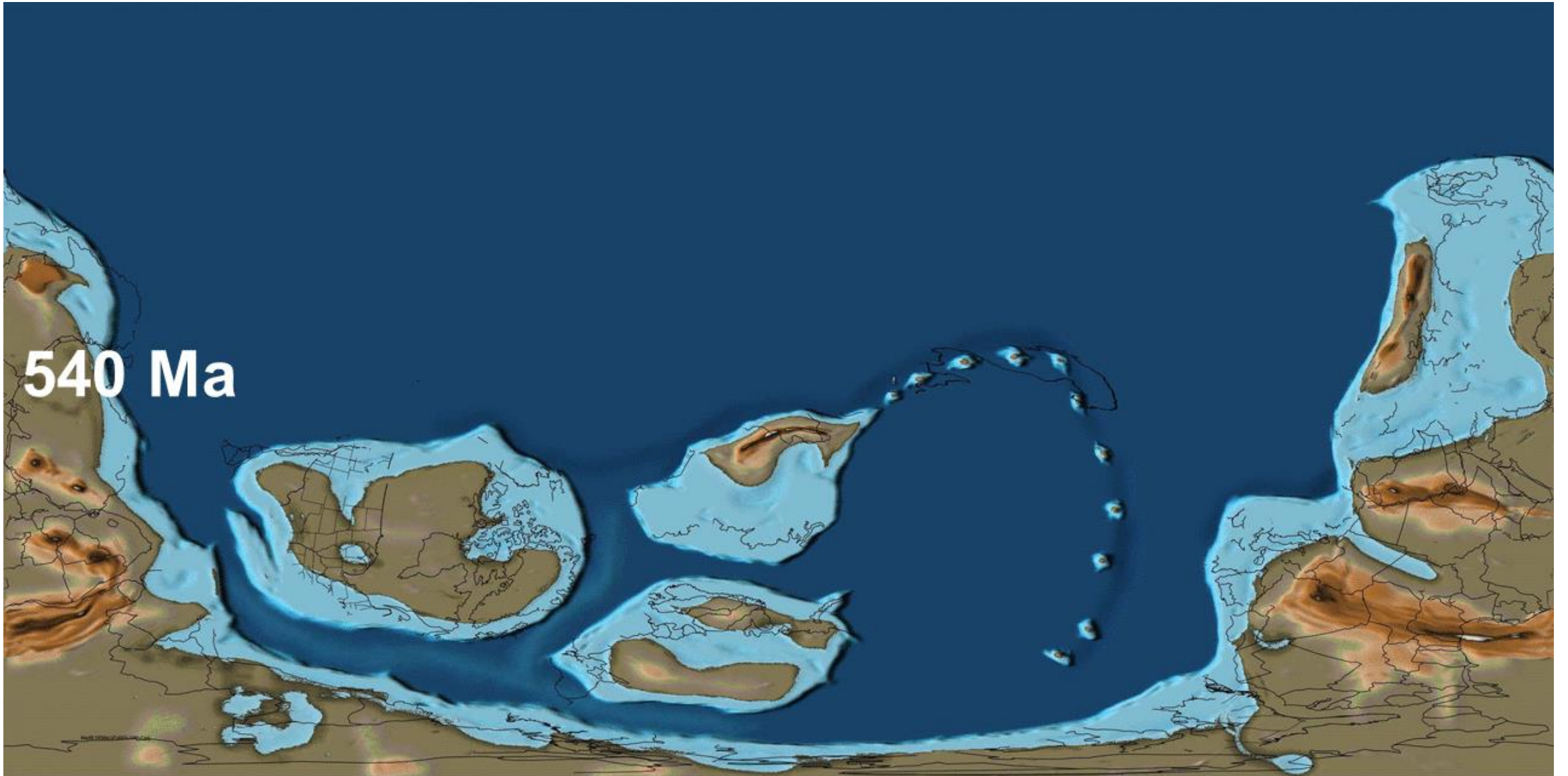
- 从古气候资料来看，地球气候是不断变化的。
- 在最近几亿年的大部分时间里，全球气温比现在的气温高出8-15°C。
- 相对于地球的历史气候来说，人类存在的2-3百万年里气候是较冷的。

Q: 亿年尺度上，CO<sub>2</sub>浓度与全球气温关系大吗？别的什么因素也可能导致气候变化？

亿年尺度上，地球气候的演化与大气成分（温室气体浓度）、板块运动、火山活动、天体撞击、生物演化等有关。



## 5. 4亿年来地形（地质构造）的变化



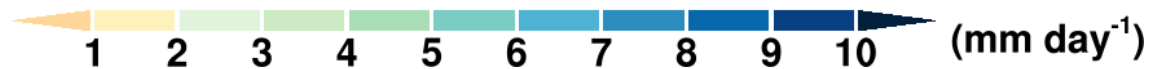
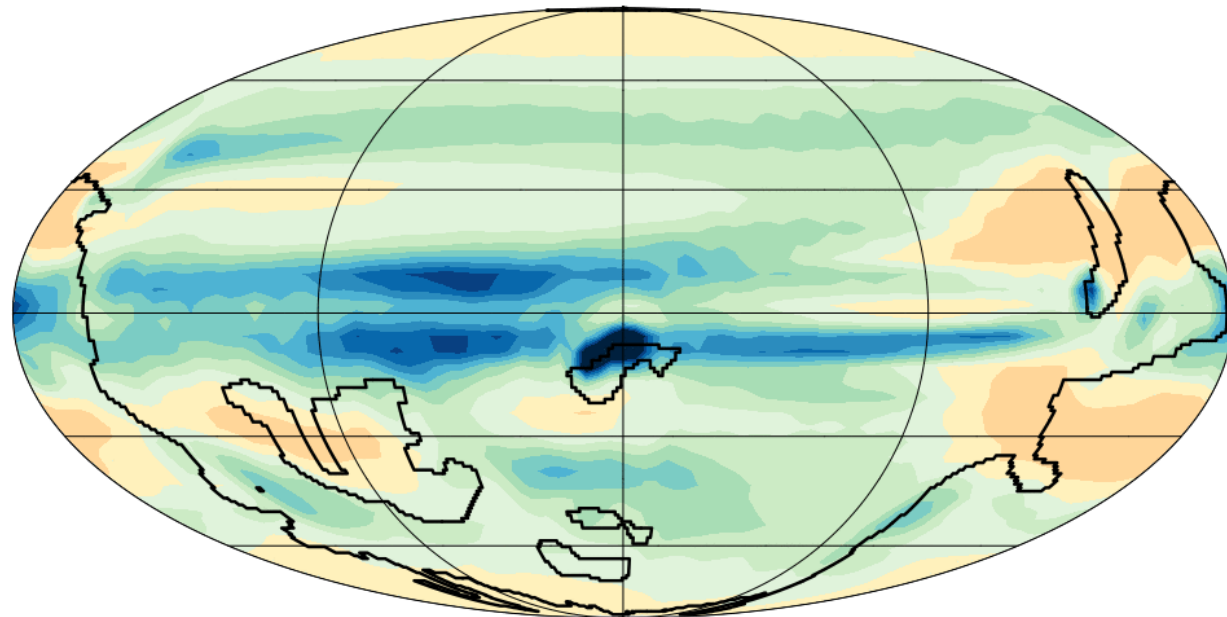
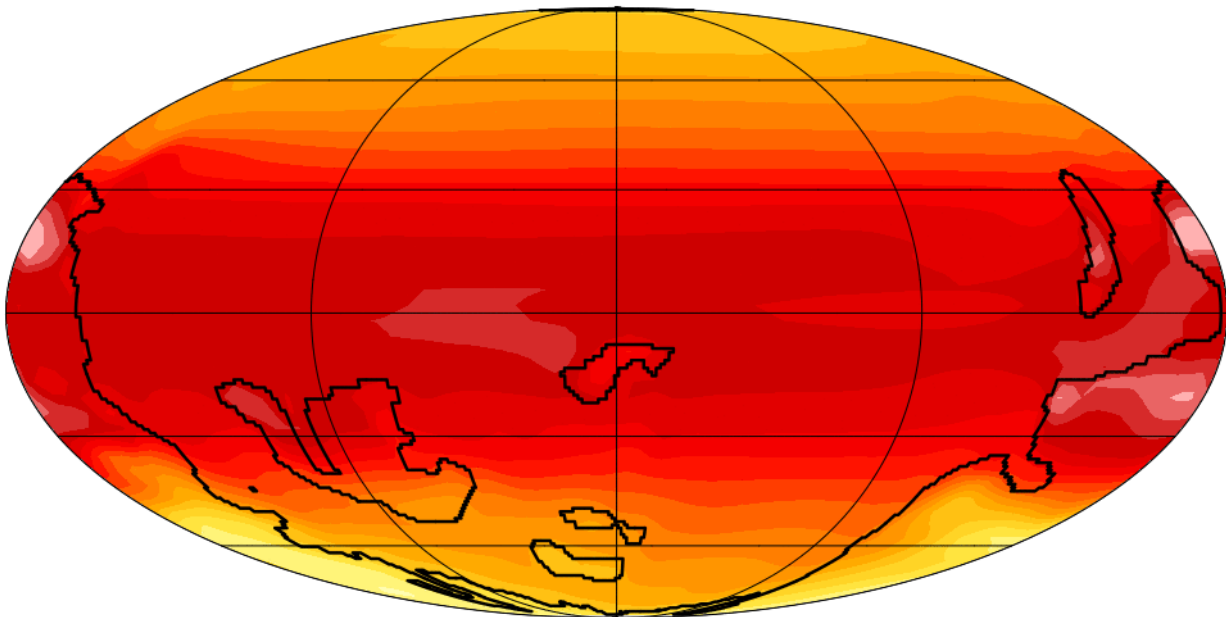
# 地形和大气成分变化驱动下的气候变化

气温

540 Ma

降水

540 Ma



Q: 地质构造如何影响气候变化?

海陆分布、碳酸盐-硅酸盐反馈、火山活动等

气候模拟结果来自胡永云老师课题组



# 地质尺度的极端气候变化：冰雪地球

- 在地球的历史上曾经历过2个极为寒冷的冰川时期：一个在大约23亿年前；另一个在大约6-7.5亿年前。
- 在这些寒冷期间，地球表面几乎被冰雪完全覆盖。这主要是由于当时的大陆分布造成的。
- 这些冰期之前，大陆主要在中低纬度甚至热带附近，地表没有冰雪覆盖，地球的反照率很低，地面温度高，降水频繁，大气中的CO<sub>2</sub>被冲刷下来，所以大气的温室效应较差。
- 地球开始变冷，冰雪从高纬度向赤道延伸，随着地表反照率的增加，地表温度更低，最终形成全球性的冰川。

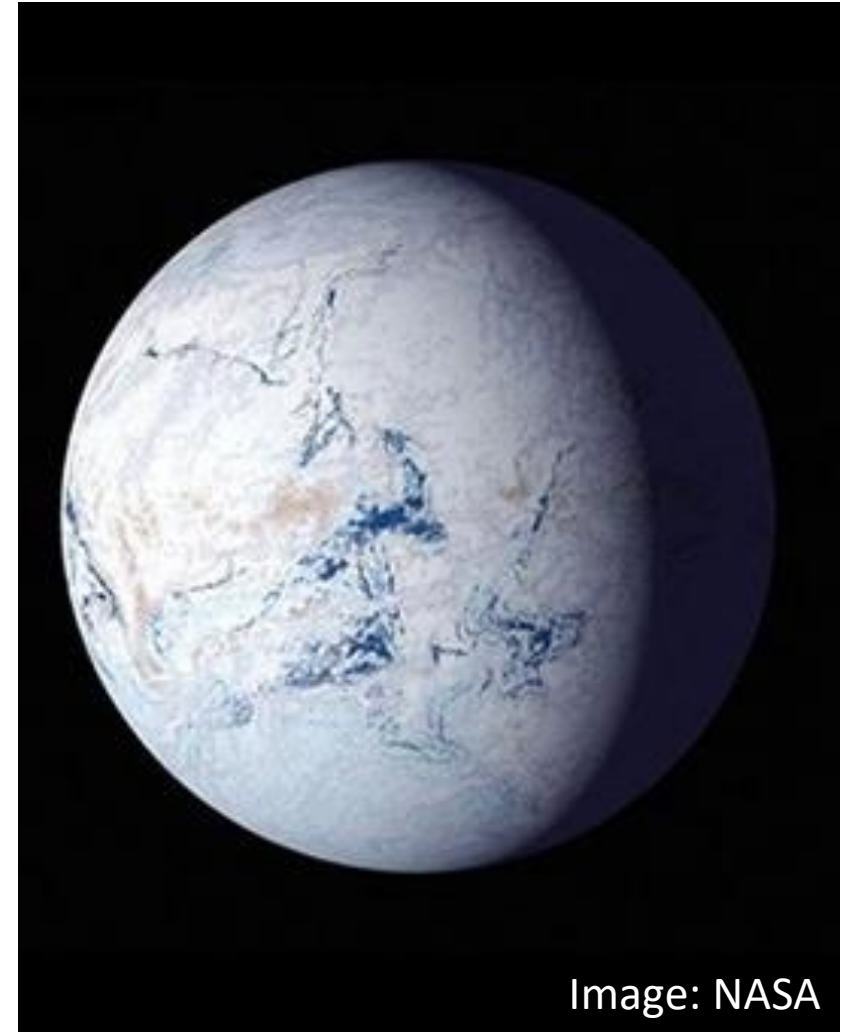


Image: NASA



# 地质构造与冰雪地球的联系

一般认为，新元古代冰雪地球的出现与当时的陆地分布有关。Rodinia超大陆裂解后，陆地主要分布在热带（600–700 Ma），热带降水量大，风化反应强，导致CO<sub>2</sub>降低，触发失控冻结（Runaway freezing）。另外，火山爆发排放的含硫气溶胶带来阳伞效应，也有可能加剧全球变冷。

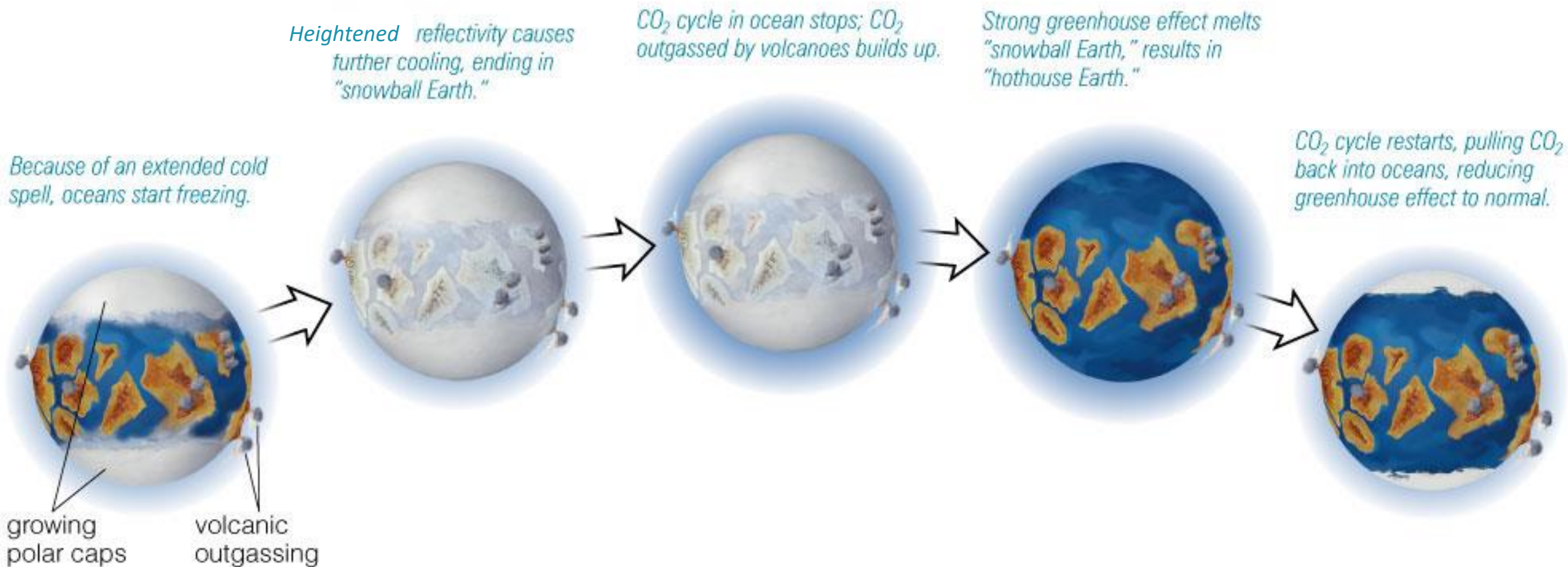


**How Volcanoes Froze the Earth (Twice)**

<https://www.youtube.com/watch?v=4ONwQV26L-k&t=3s>

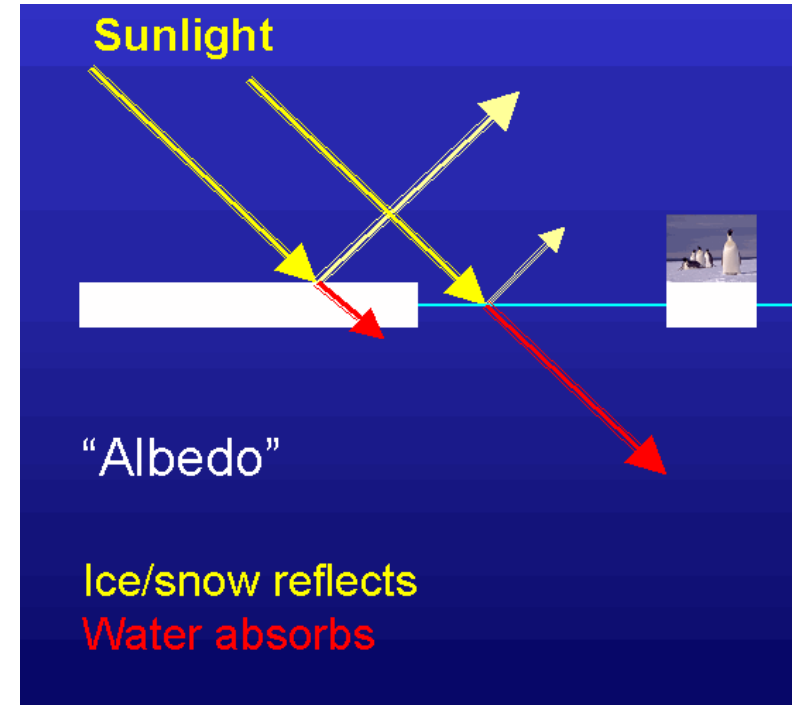
Hoffman and Schrag (2000) 21

# 冰雪地球的演化



# 冰雪反照率正反馈

- 温度升高，冰雪融化，地表反照率降低，地表吸收更多的太阳辐射，导致更多的冰雪融化和更多的温度升高，形成冰-雪反照率正反馈。
- 相反，温度降低，冰雪覆盖面积增大，地表反照率增大，地表吸收太阳辐射减少，冰雪覆盖面积加大，也是正反馈。
- 地球历史上的冰期-间冰期与冰-雪反照率正反馈机制有关。
- 冰-雪反照率正反馈机制失控是23和6-7亿年前形成冰雪地球事件的重要原因。



$T \uparrow \Rightarrow \text{Ice} \downarrow \Rightarrow \text{Albedo} \downarrow \Rightarrow T \uparrow$

# 寒冷过后的炎热

- 地球被冰封之后，水循环很弱，火山爆发向大气中释放CO<sub>2</sub>不断地在大气中累积。当CO<sub>2</sub>在大气中累积到一定程度，温室效应将冰川融化。同时，火山灰堆积在冰雪表面，降低反照率，增加太阳辐射的吸收，加剧冰雪融化。
- 在冰川被融化之后，由于大气中的CO<sub>2</sub>不可能马上被冲刷下来，加上水汽的温室效应，大气的温室效非常强，地表温度可达到50 °C。这种气候称为“温室”（Hothouse）。
- 讨论：地球上的原始生命是如何度过这些极端寒冷和极端炎热的时期？

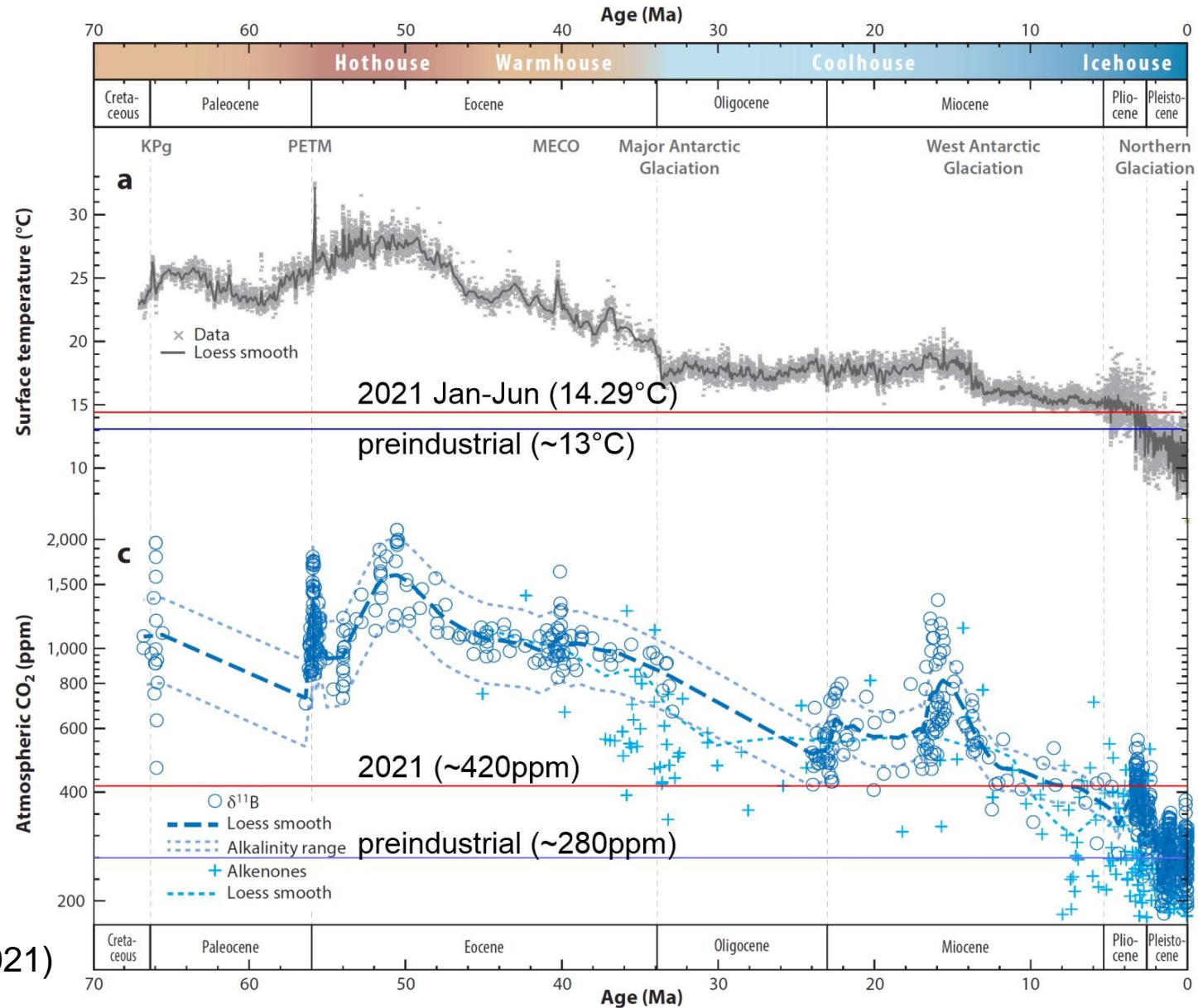
**How Earth's First, Unkillable Animals Saved the World**

<https://www.youtube.com/watch?v=gMdv3JIPizw>



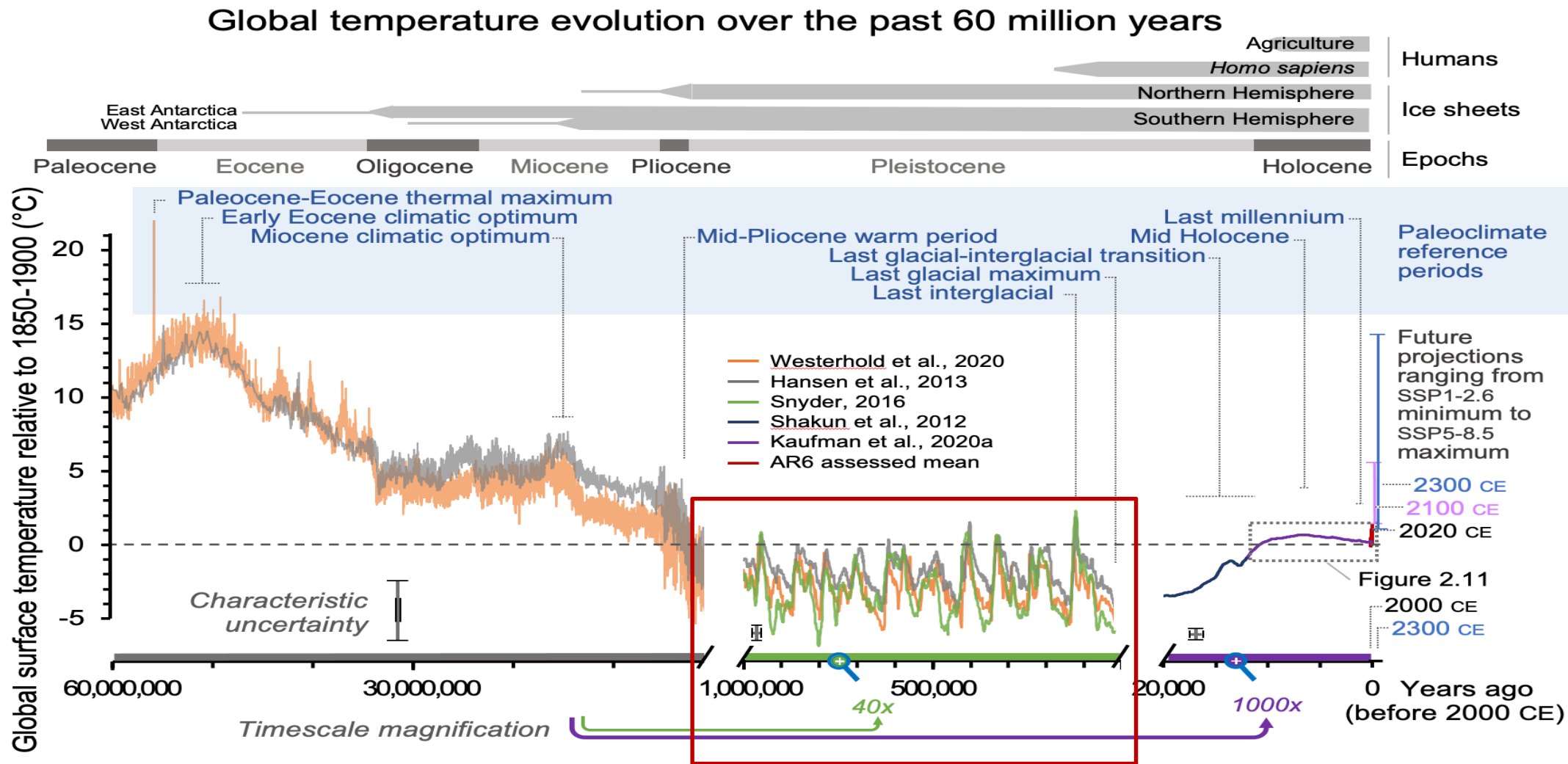
# 古近纪以来的气候变化：震荡中的冷却

70 Ma以来，全球气温和南极冰芯中CO<sub>2</sub>浓度比较吻合。



(Westerhold et al. 2020, Rae et al. 2021)

# 近百万年来的气候变化：冰期-间冰期的周期性震荡



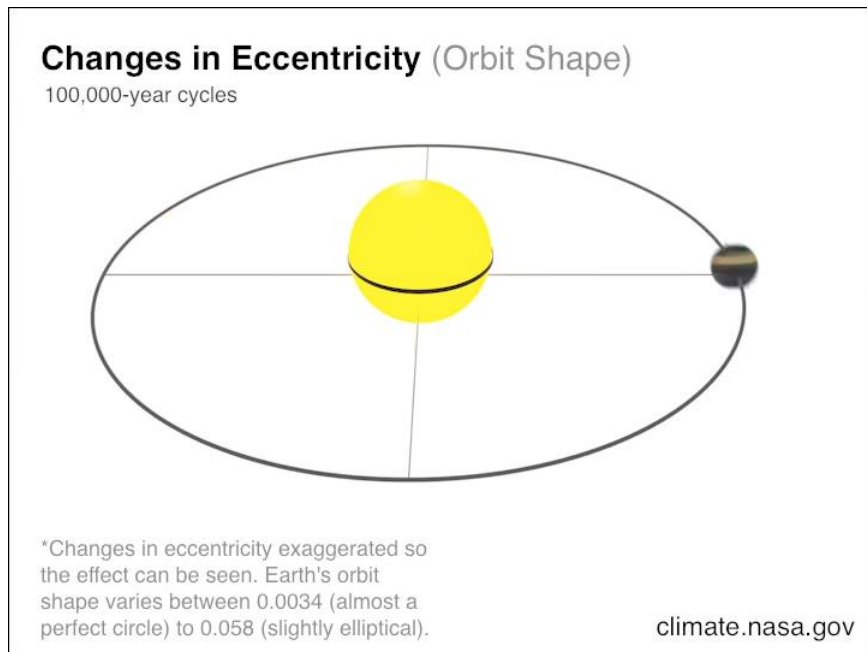
Paleocene 古新世； Eocene 始新世； Oligocene 渐新世； Miocene 中新世；  
Pliocene 上新世； Pleistocene 更新世； Holocene 全新世； Quaternary 第四纪

IPCC, 2021

# 近百万年来的气候演化与地球轨道变化有关

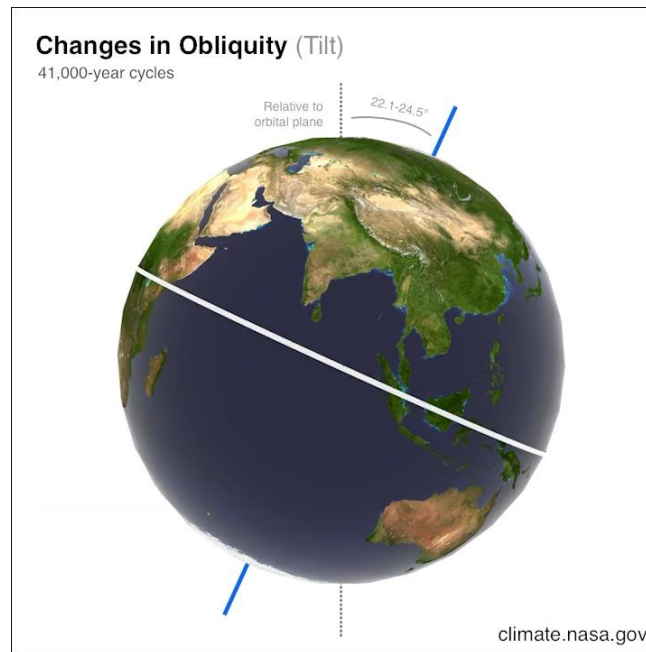
## 米兰科维奇周期

### 公转轨道偏心率



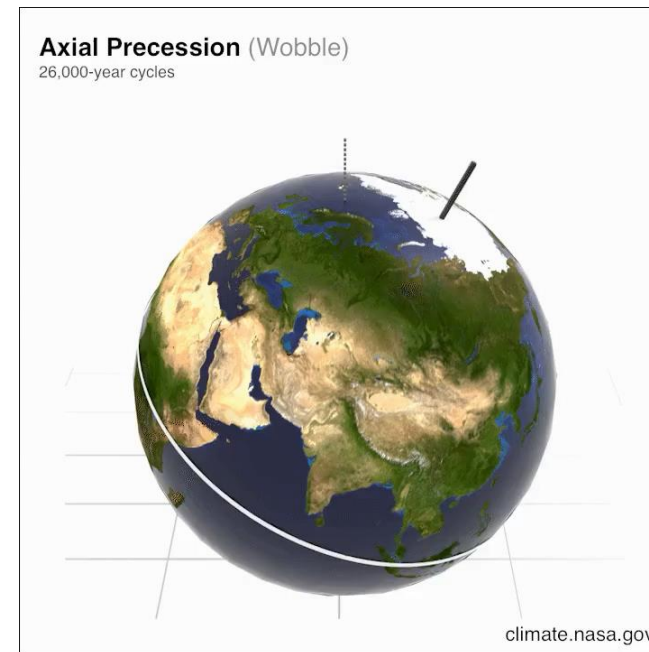
改变各季节的太阳辐射量

### 自转轴倾角



改变日照在不同纬度的分布

### 自转轴进动



<https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>

# 全球气温变化与轨道参数变化

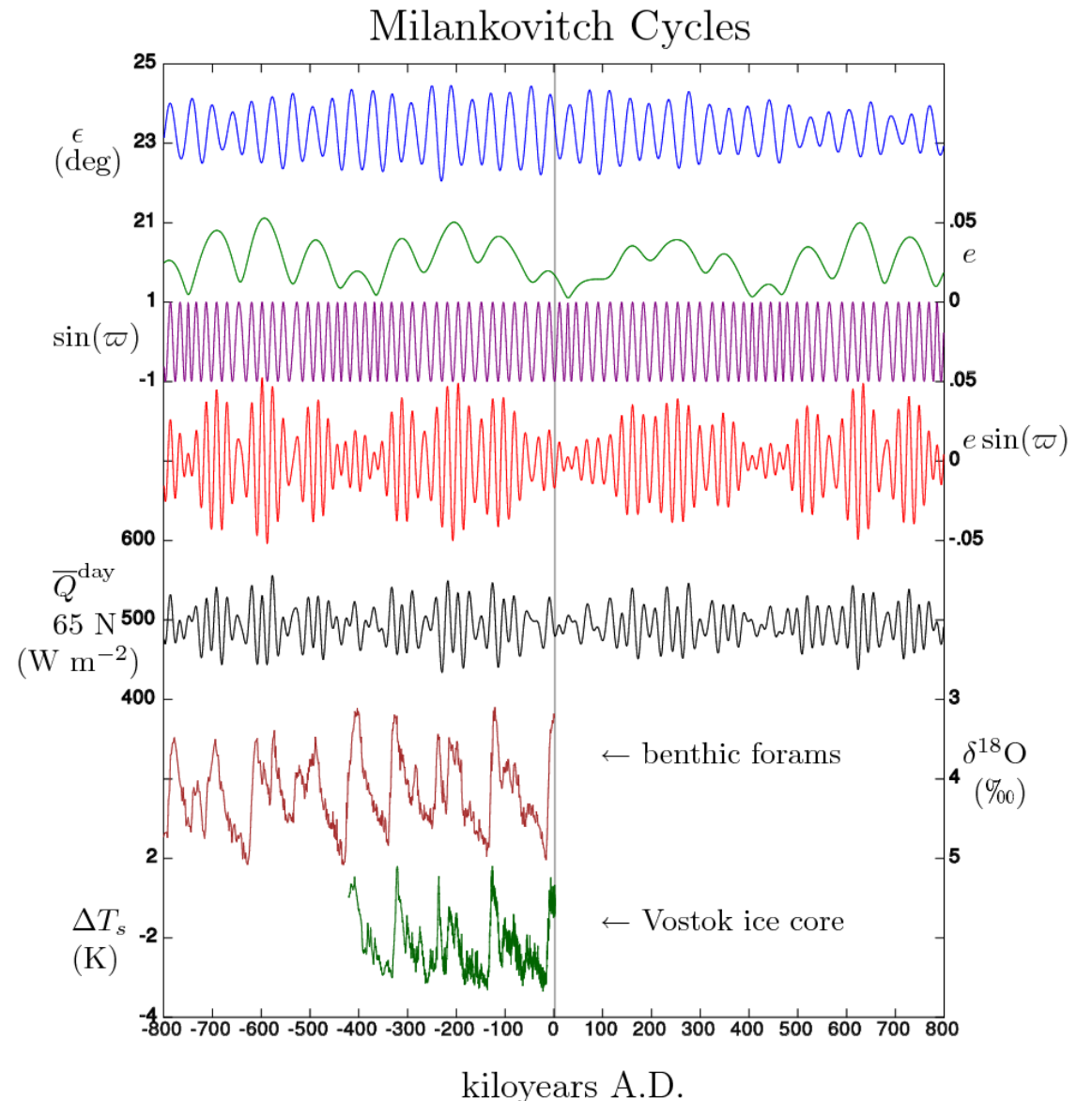
冰芯证据表明，至少最近的80万年，地球的冰川期和暖期的交替是和米兰科维奇周期吻合的。

$\epsilon$ 是轨道倾角， $e$ 是偏心率， $\omega$ 是近日点黄经， $e\sin(\omega)$ 是进动指数，它与轨道倾角一起控制着日照的季节周期。 $Q$ 是夏至日那一天在北纬65度的计算所得的大气层顶日平均日照量。有孔虫和南极冰芯显示出过去的全球海平面和温度的特征，这两个替代性指标分别来自海洋沉积物和南极冰芯。垂直的灰线是目前的公元2000年。

[https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch\\_cycles](https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)

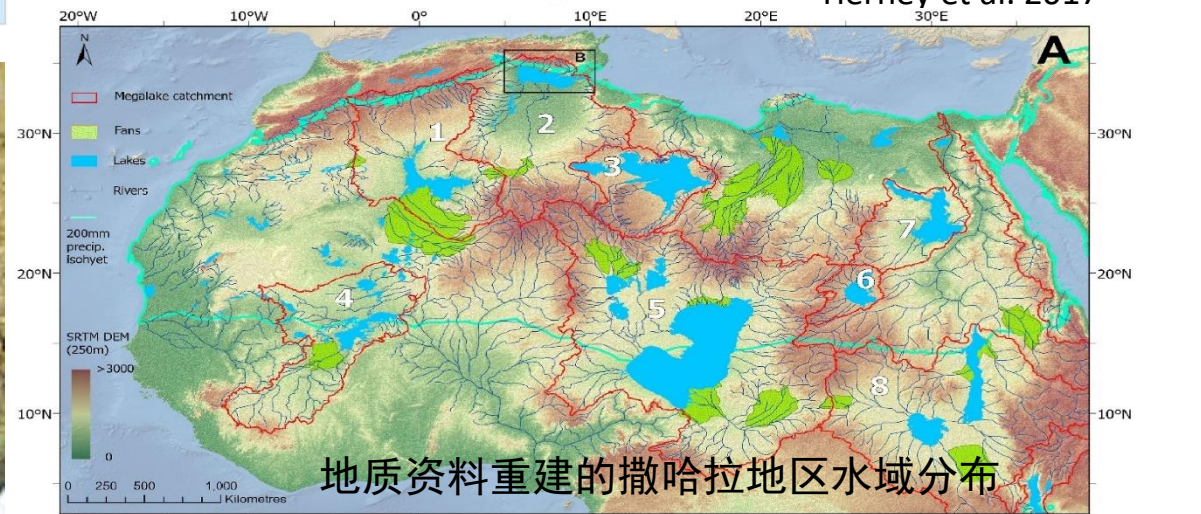
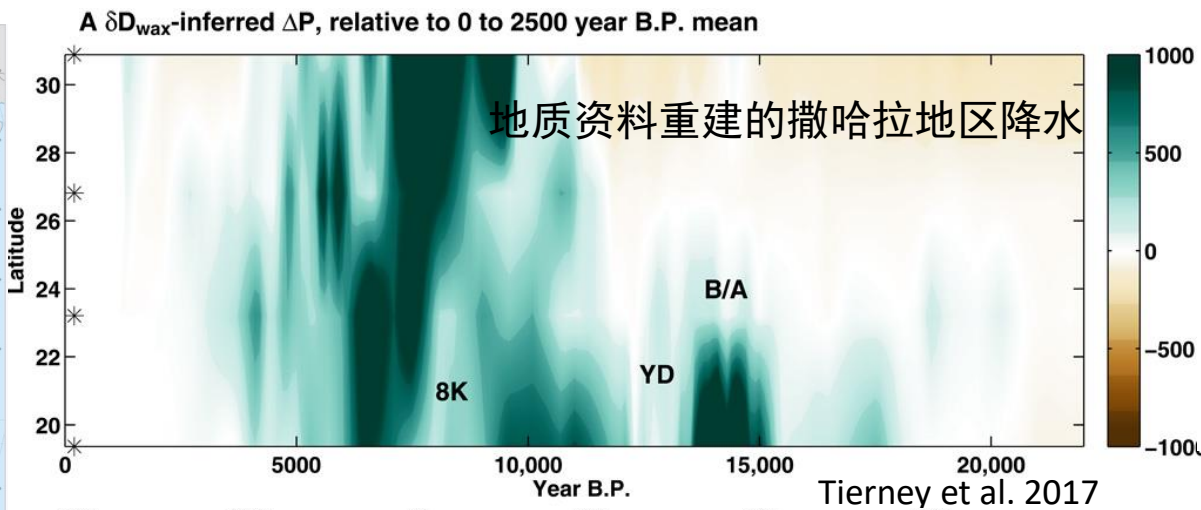
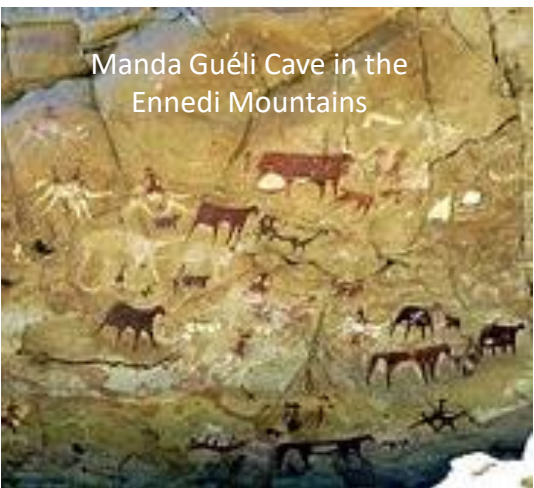
Drilling for ancient ice | The Royal Society

<https://www.youtube.com/watch?v=K6ckJBER6bU>





# 地球轨道和植被/土壤共同作用下的中全新世 “绿色撒哈拉”



## Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene

J. Kutzbach\*, G. Bonan†, J. Foley\* & S. P. Harrison‡

轨道变化，北半球季节增强，非洲夏季风增强，植被+土壤反馈

Sweden

Fossil pollen, ancient lake sediments and archaeological evidence from Africa indicate that the Sahel and Sahara regions were considerably wetter than today during the early to middle Holocene period, about 12,000 to 5,000 years ago<sup>1-4</sup>. Vegetation associated with the modern Sahara/Sahel boundary was about 5° farther north, and there were more and larger lakes between 15 and 30° N. Simulations with climate models have shown that these wetter conditions were probably caused by changes in Earth's orbital parameters that increased the amplitude of the seasonal cycle of solar radiation in the Northern Hemisphere, enhanced the land-ocean temperature contrast, and thereby strengthened the African summer monsoon<sup>5-7</sup>. However, these simulations underestimated the consequent monsoon enhancement as inferred from palaeorecords<sup>4</sup>. Here we use a climate model to show that changes in vegetation and soil may have increased the climate response to orbital forcing. We find that

Q: 这是否意味着，在千年尺度上，区域可处于不同气候态？如何与tipping point联系？

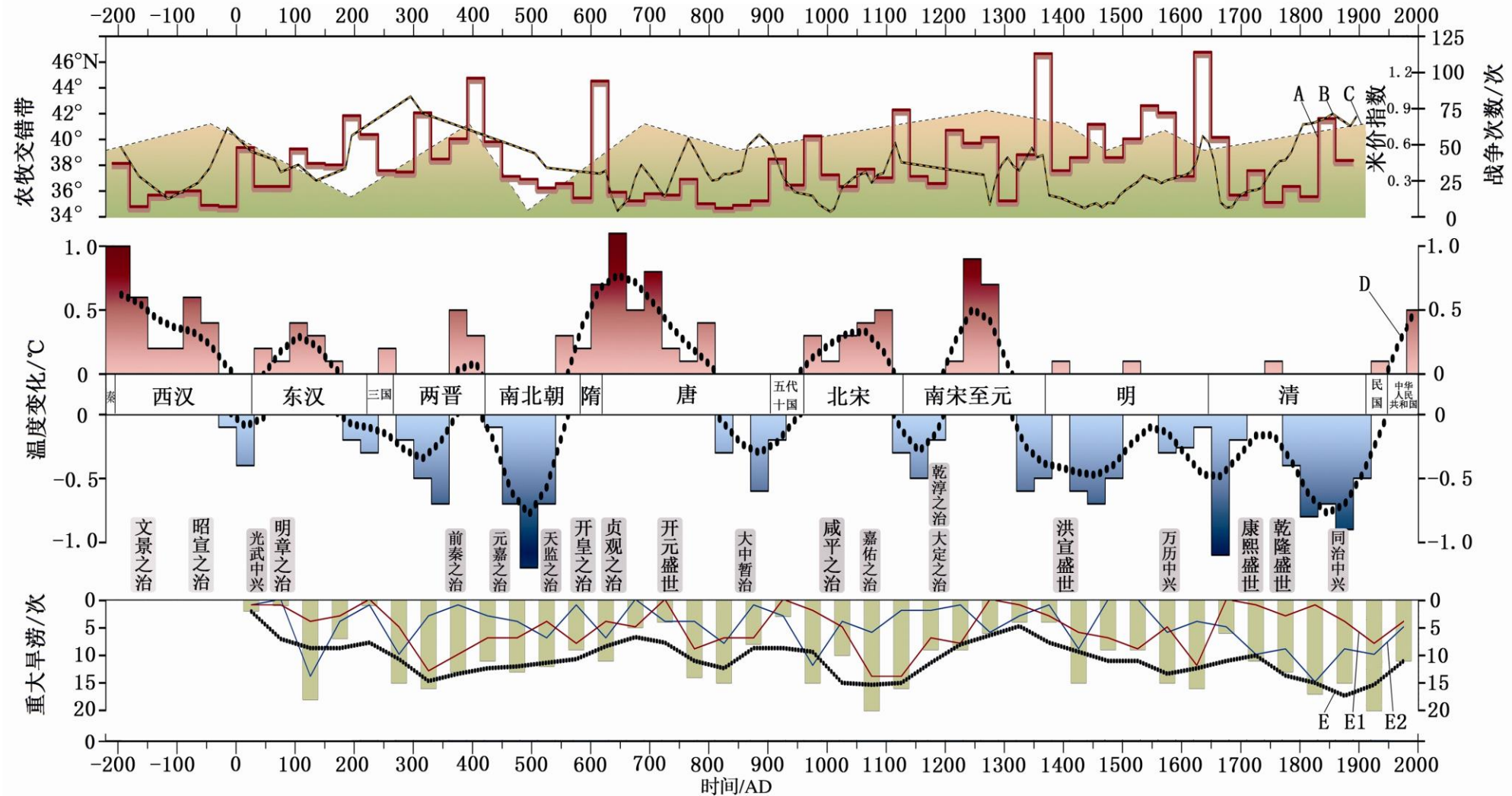
When the Sahara Was Green

<https://www.pbs.org/video/when-the-sahara-was-green-e5c086/>

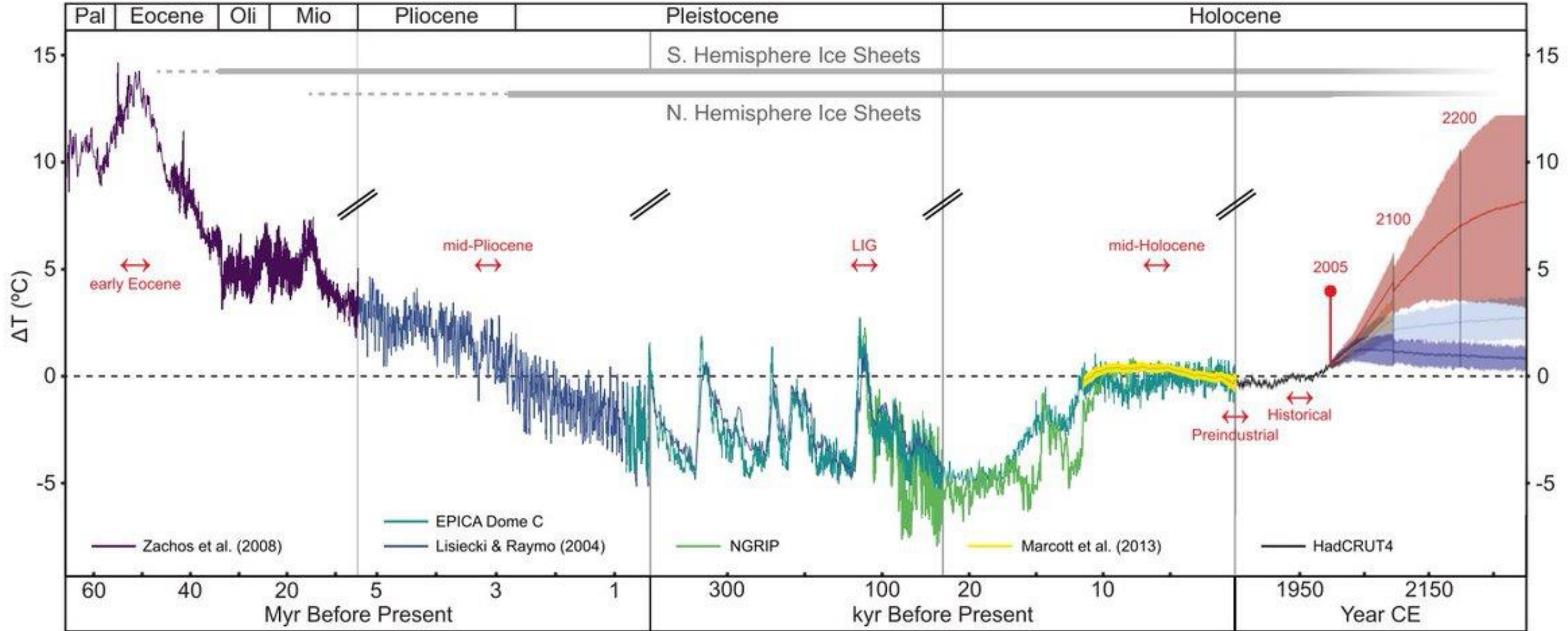


# 中国古代气候变化与王朝兴衰的“冷抑暖扬”

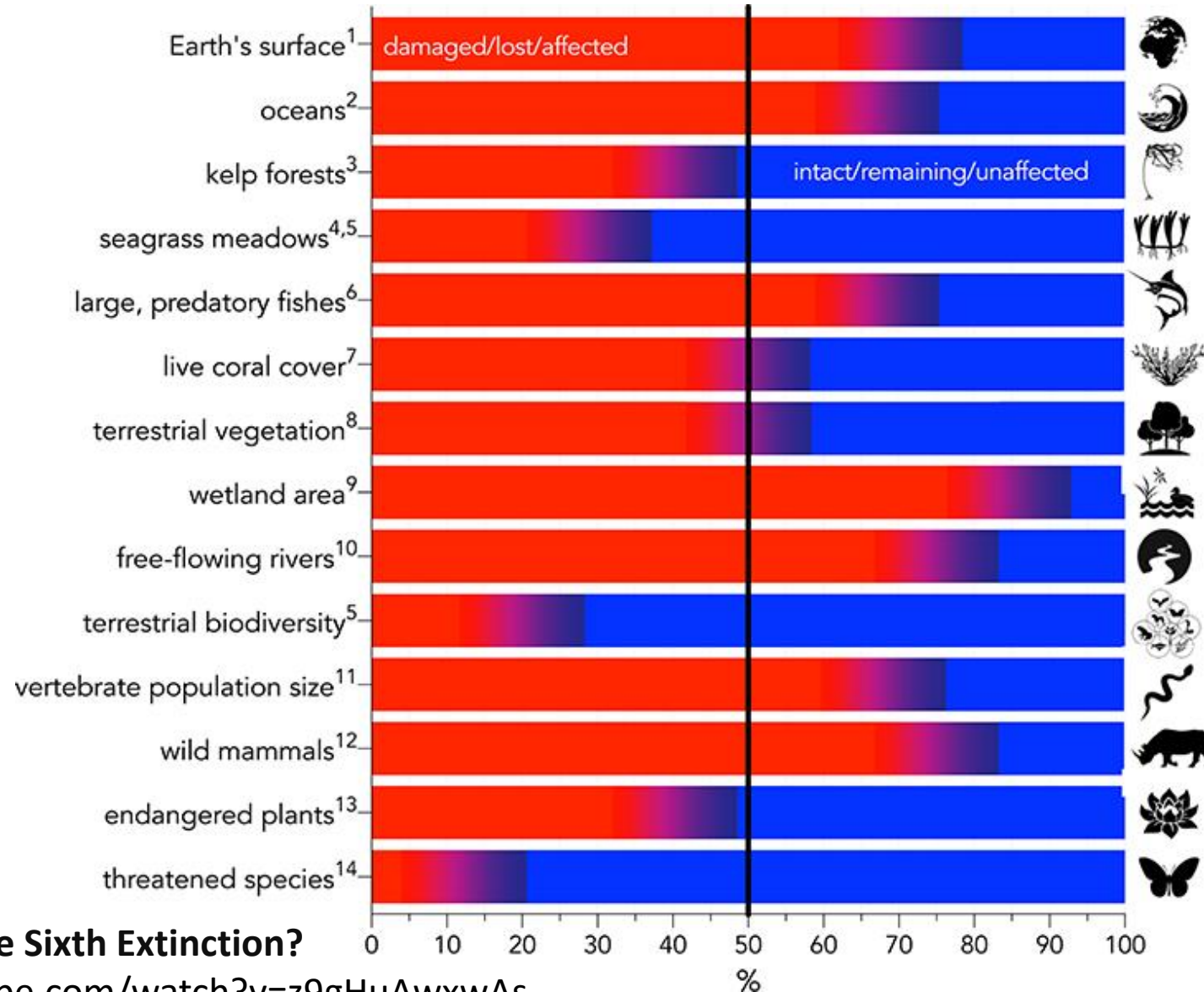
Q: 可否根据中国历史, 证明目前的气候变暖是有益的?



# 未来气温？



# 第六次生物大灭绝？



Are We Living In the Sixth Extinction?

<https://www.youtube.com/watch?v=z9gHuAwxwAs>

# 本章作业 ddl = 2024年3月11日 13:00

1. 简述冰雪地球形成和融化机制，它涉及哪些反馈机制？
2. 氧气可通过哪些机制影响气候？
3. 气候变化对人类文明史不同时期（农耕社会、工业时代）的正面或负面影响可能有哪些？