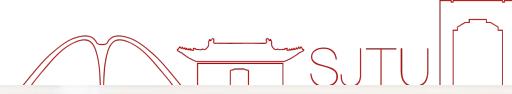




上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



上海交通大学海洋学院

气候学与全球变化 Climate and Global Change

2022.04.24



SCHOOL OF OCEANOGRAPHY
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY
上海交通大学 海洋学院



9.1.3 代用资料 (proxy record)

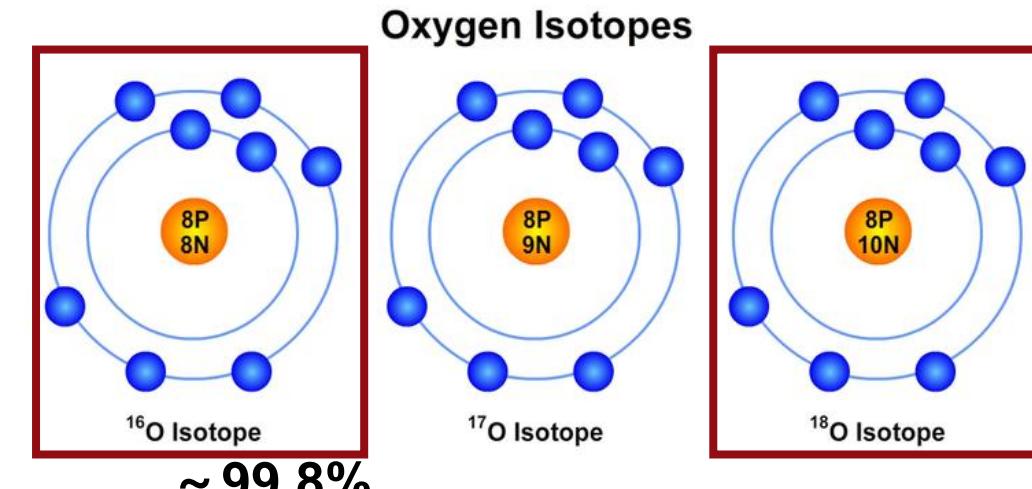
d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

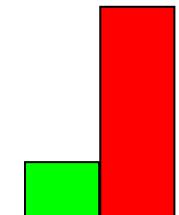
地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}O$

$$\delta^{18}O \text{ in } \text{\%} = \left[\frac{(^{18}O / ^{16}O)_{sample}}{(^{18}O / ^{16}O)_{standard}} - 1 \right] \times 1000$$

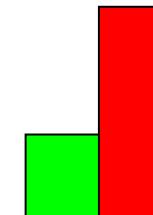
standard: SMOW (Standard Mean Ocean Water)



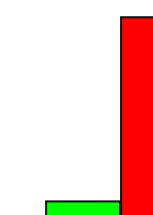
$\delta^{18}O : 0\text{\%}$



$\delta^{18}O : +\text{\%}$



$\delta^{18}O : -\text{\%}$



Light isotope (^{16}O)

Heavy (minor) isotope (^{18}O)

9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

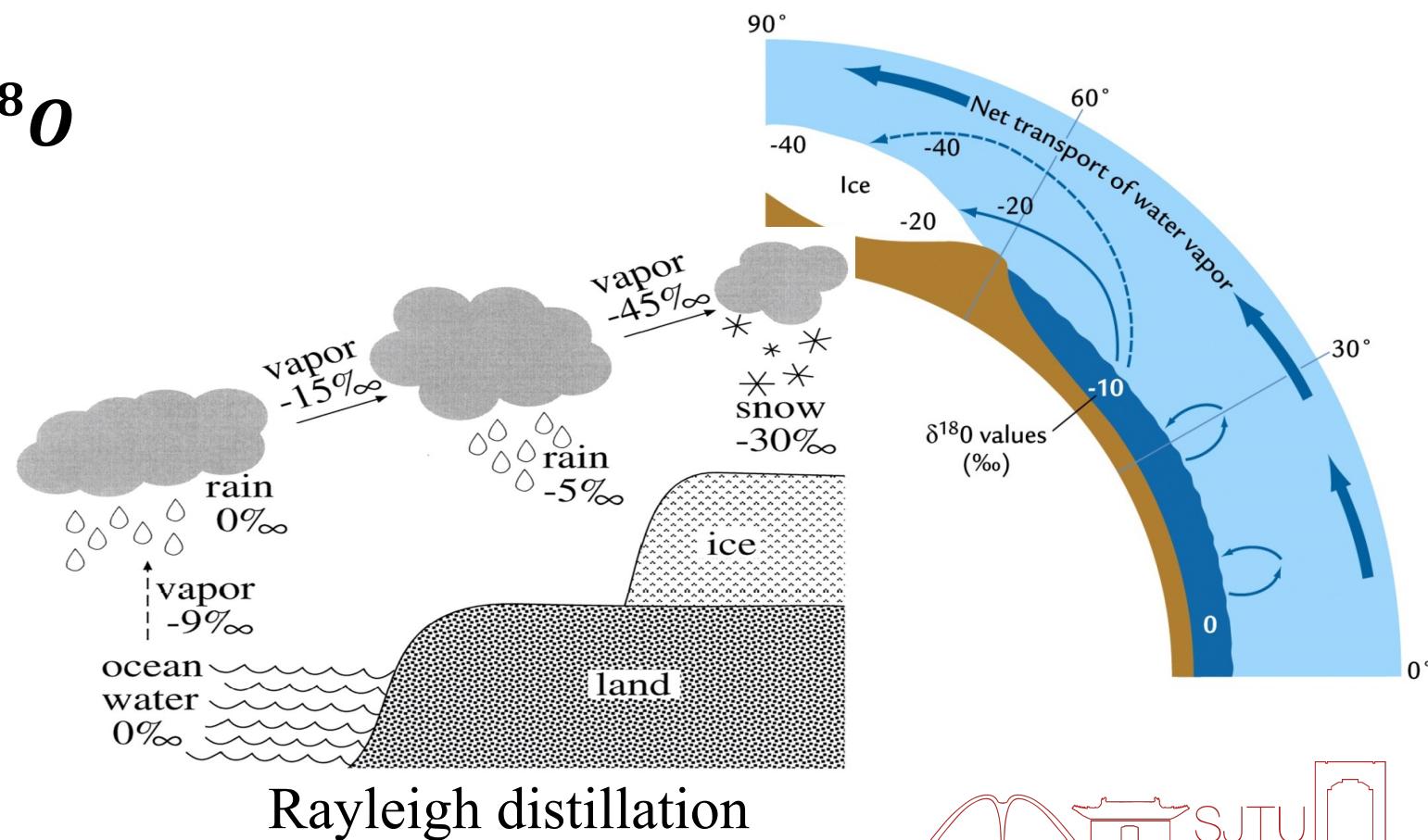
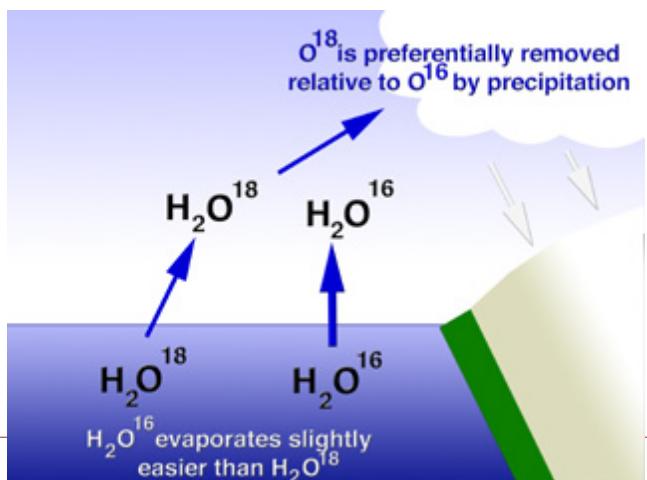
(2) 地质和地球化学记录

地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$

分馏(fractionation):

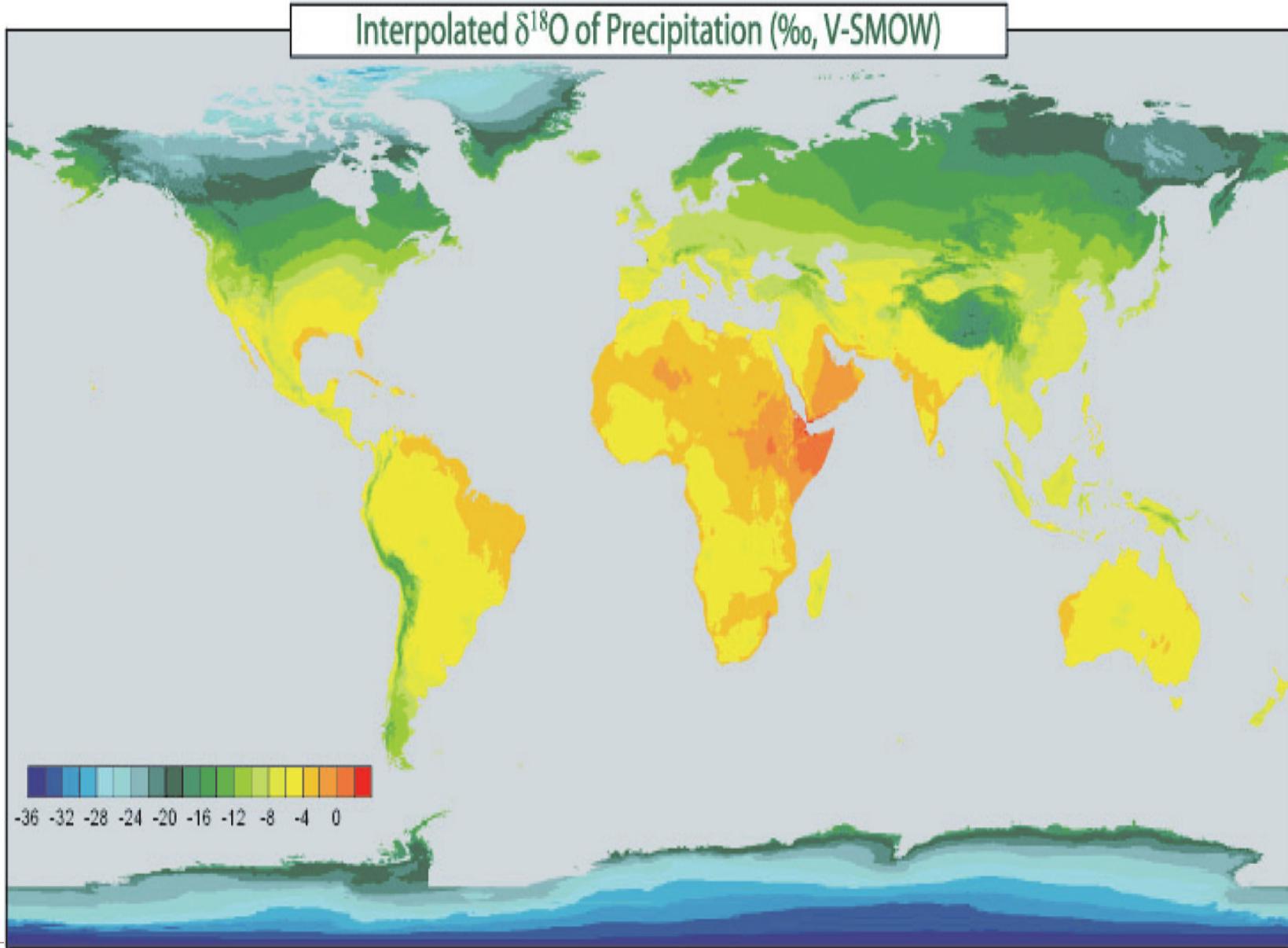
蒸发时， H_2^{16}O 更容易；

凝结降水时， H_2^{18}O 更容易；





第九章 地球气候的演变

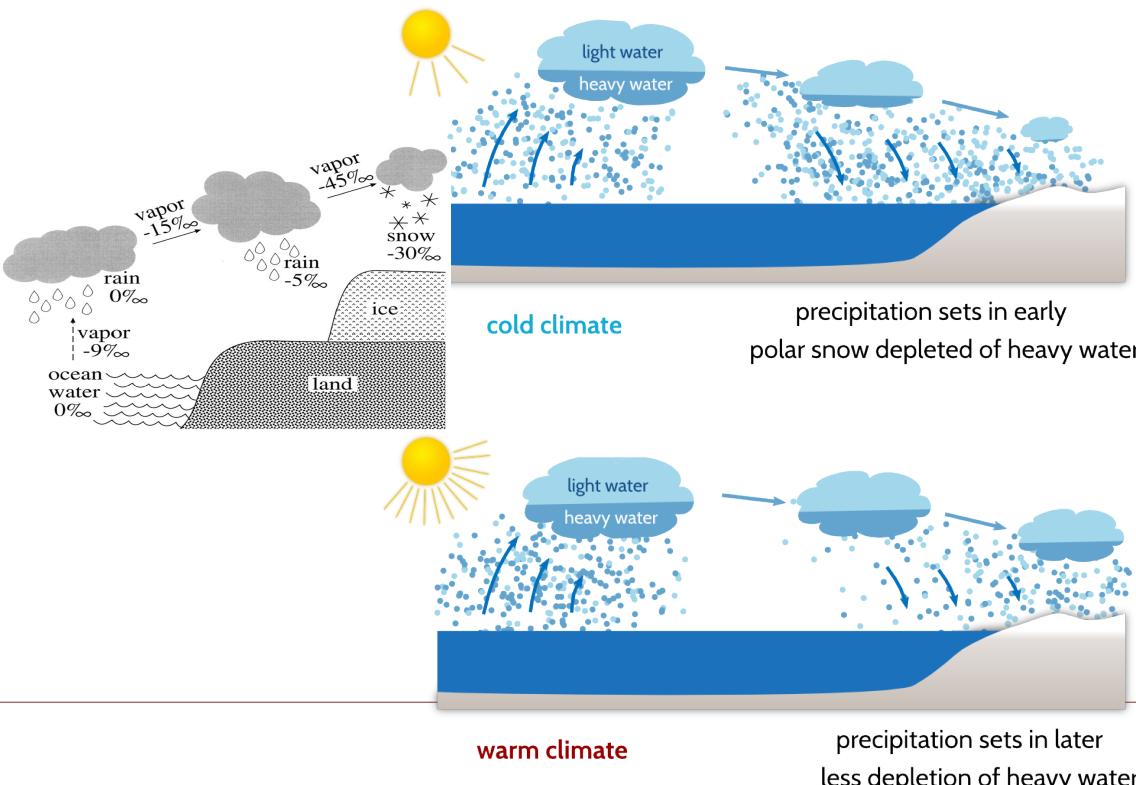


9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

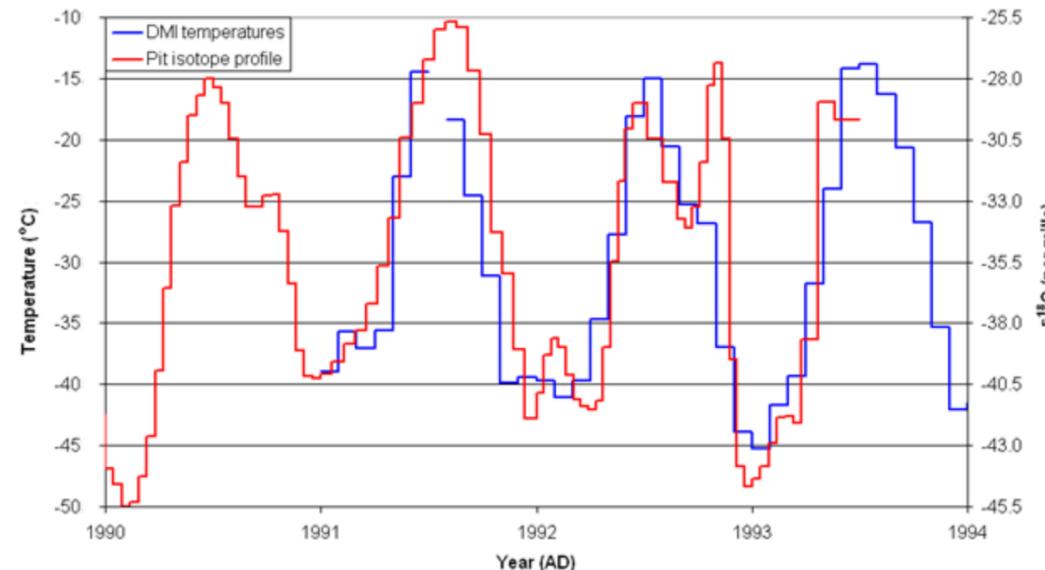
(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}O$



冰芯中的 $\delta^{18}O$: 温度 $T \downarrow, \delta^{18}O \downarrow$

现代格林兰岛降雪 $\delta^{18}O$ 和温度



第九章 地球气候的演变



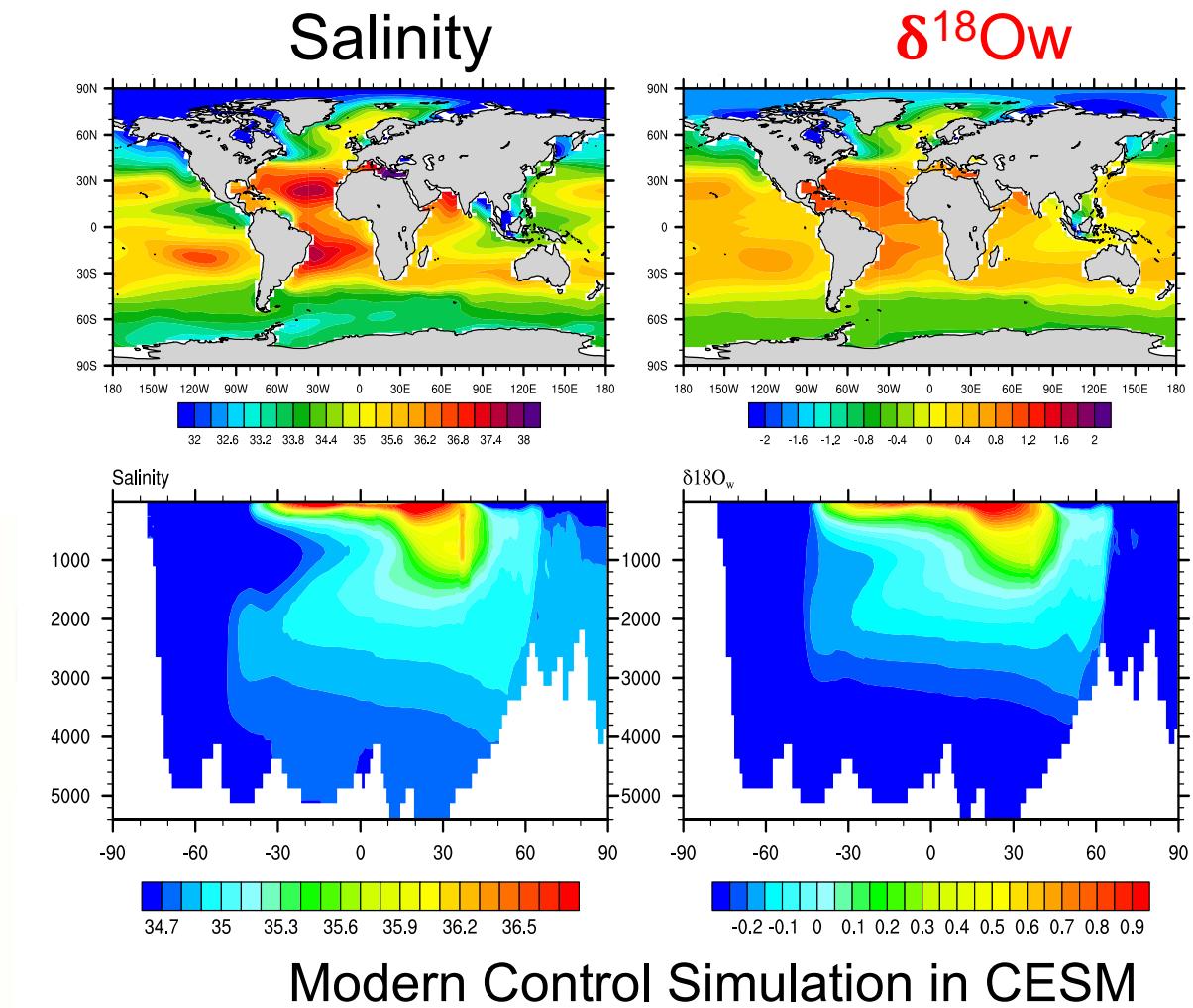
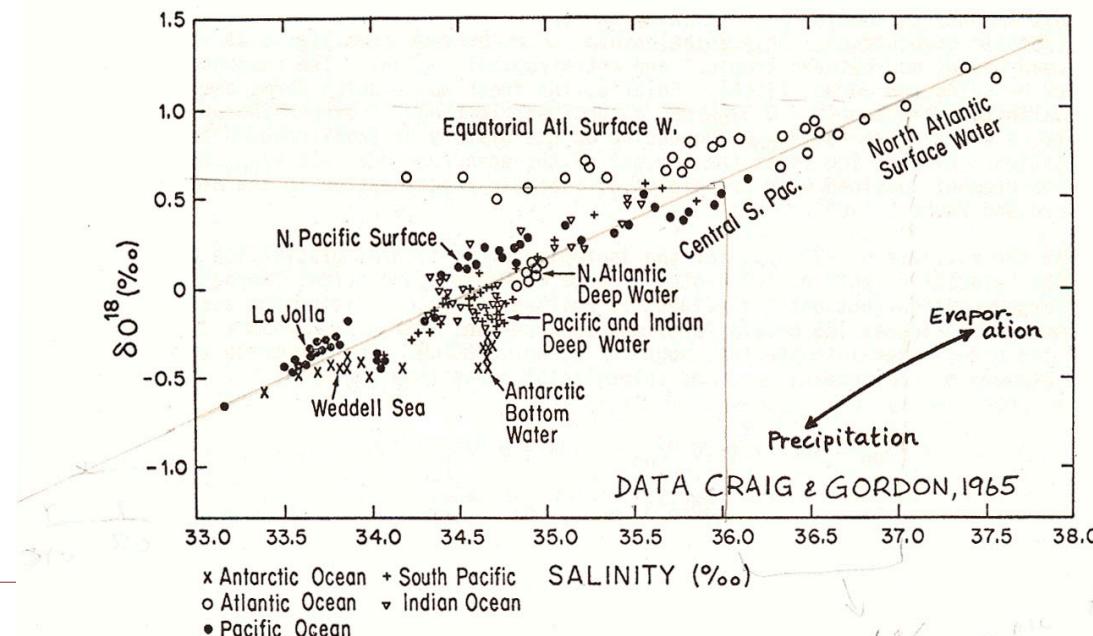
9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录

地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$

海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 空间上：盐度





9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录

地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$

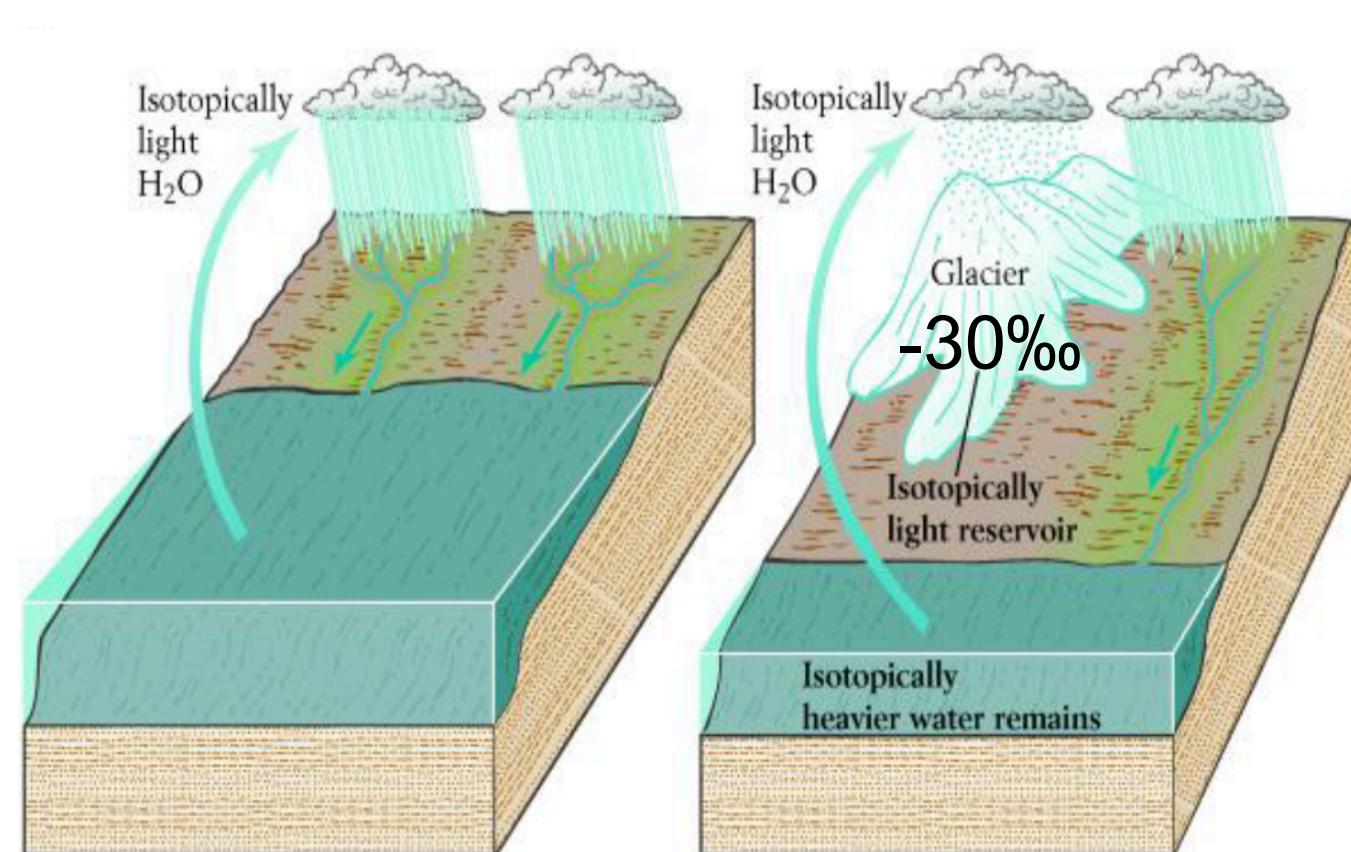
海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 时间上：冰山体积

例： $\delta^{18}\text{O}$ 和海平面

设现代海水平均深度为3700m，海洋 $\delta^{18}\text{O}$ 为0‰

冰期陆地冰山 $\delta^{18}\text{O}$ 为-30‰，海洋 $\delta^{18}\text{O}$ 为1‰，
求冰期海平面下降高度。

$$3700 * 0\% = -30\% * n + (3700 - n) * 1\%$$
$$n = 120\text{m}$$



Isotopically light water evaporates from the ocean and returns via rivers: the system is in balance

Glaciers expand, forming a new reservoir of isotopically light water on the land: sea level drops and the ocean becomes isotopically heavy

9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$

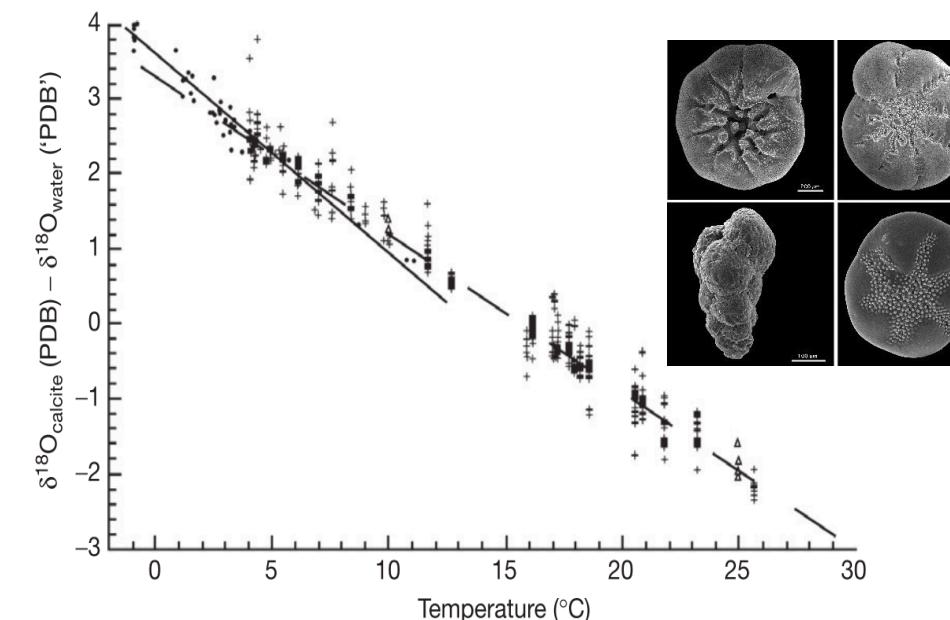
海洋沉积物 $\delta^{18}\text{O}_{shell} = \delta^{18}\text{O}_W - 0.27 - 0.245T + 0.0011T^2 + 3.58$

$$\Delta\delta^{18}\text{O}_{shell} = \Delta\delta^{18}\text{O}_W + \Delta\delta^{18}\text{O}_T$$

i) $\Delta\delta^{18}\text{O}_T = -\Delta T / 4^\circ\text{C}$: Cooler, increases



ii) $\Delta\delta^{18}\text{O}_W$: More continental ice, increases



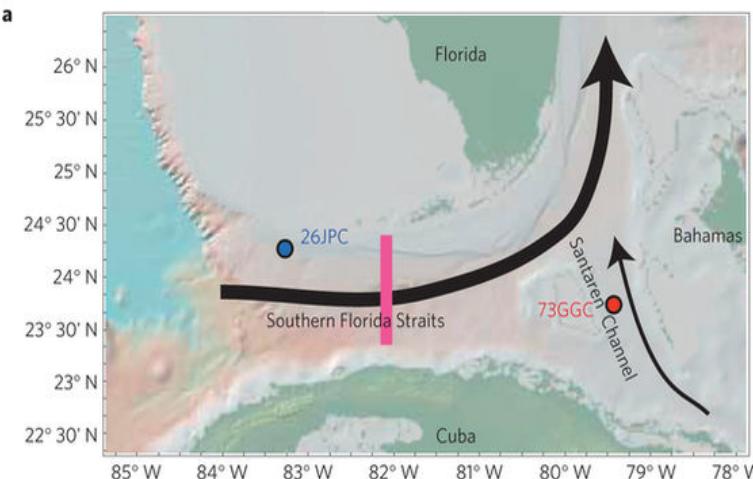
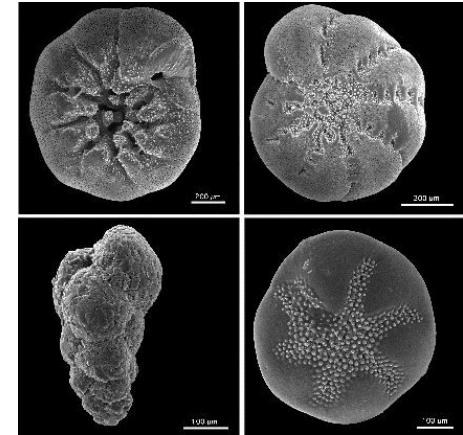


第九章 地球气候的演变

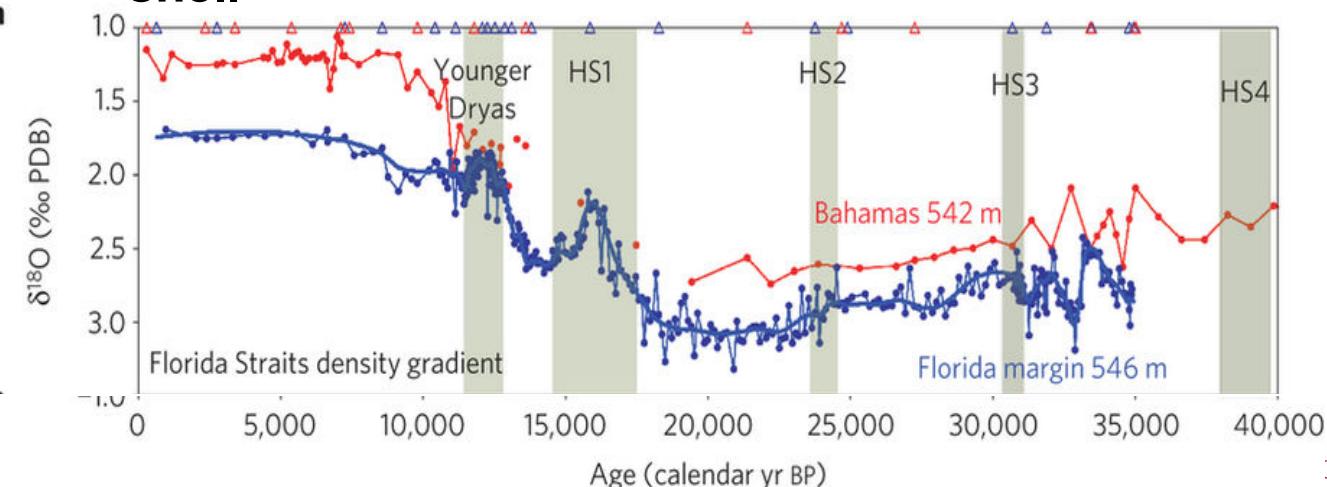
$$\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} = \delta^{18}\text{O}_W - 0.27 - 0.245T + 0.0011T^2 + 3.58$$

S \downarrow T
 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} \rightarrow \text{海水密度}$

热成风: $-\frac{f\rho_0}{g} L_x \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) = \rho_E - \rho_W \rightarrow \delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} \text{ 重建洋流}$



$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ for AMOC



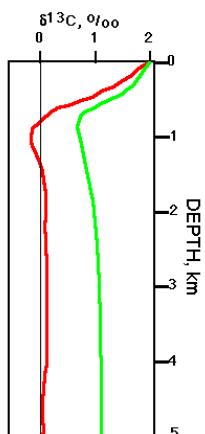
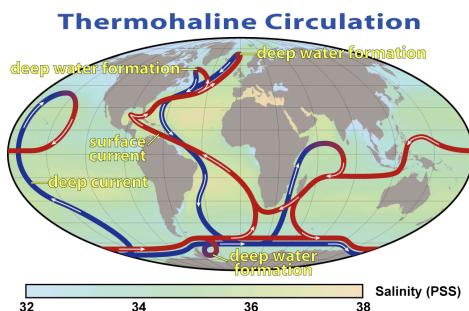
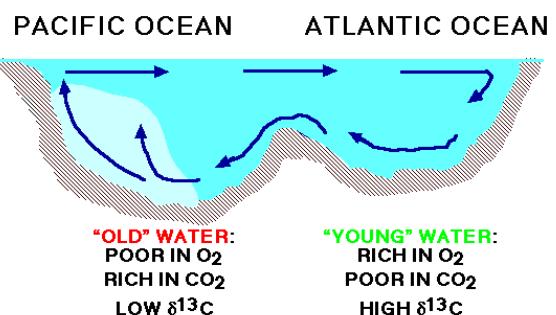


9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录

地球化学记录：碳13 $\delta^{13}C$

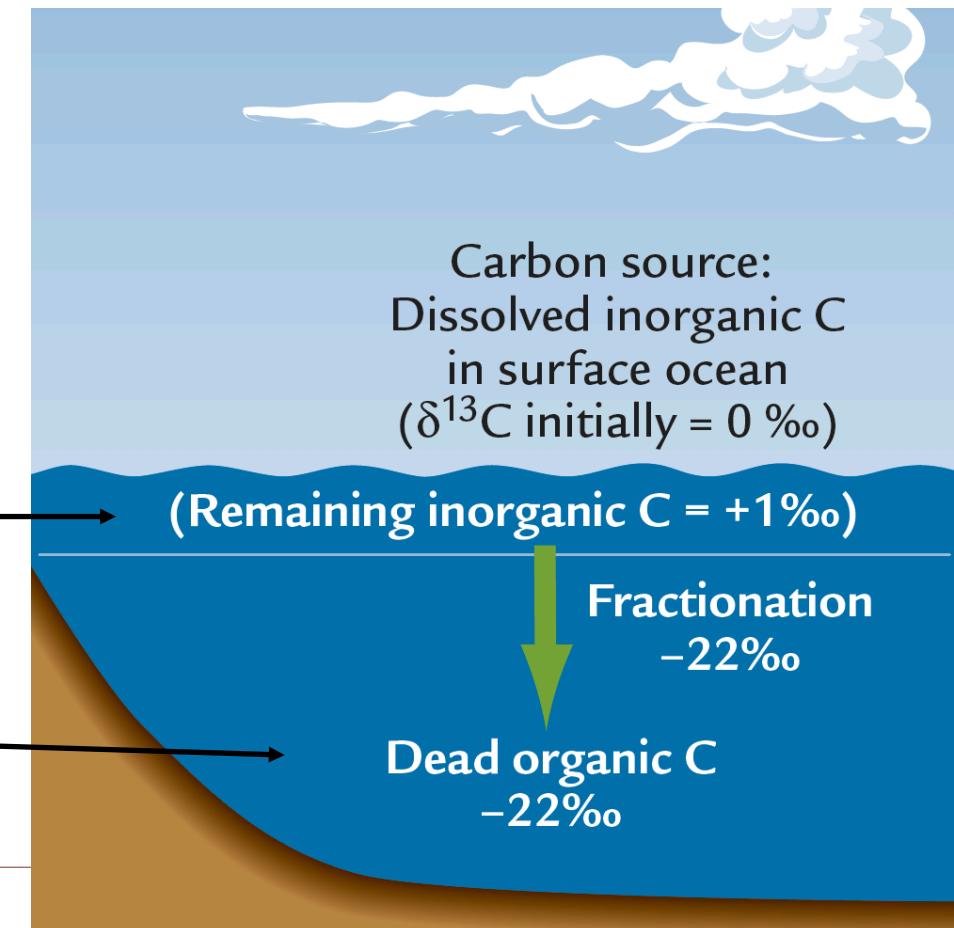


表层：光合作用
更“喜欢” ¹²C

深海：“再矿化”使
海水 $\delta^{13}C$ 降低

$\delta^{13}C \downarrow$, 营养盐↑

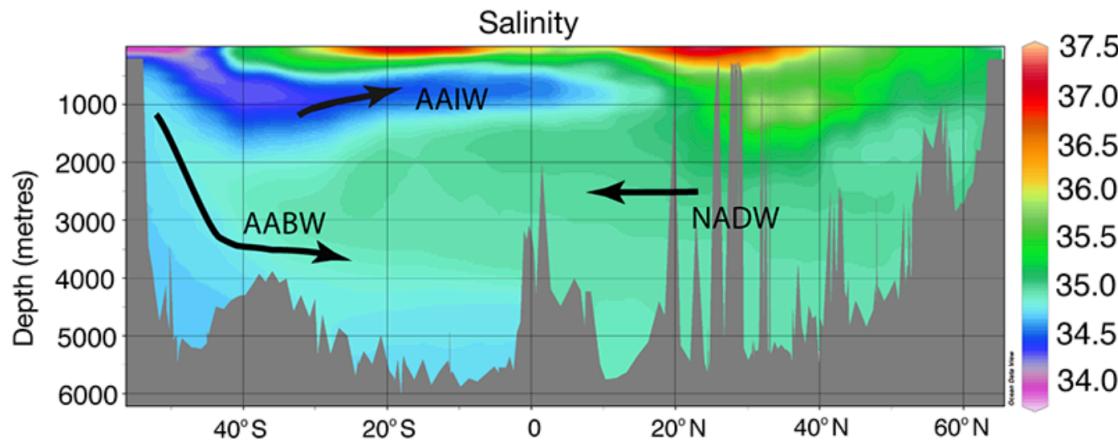
$$\delta^{13}C \text{ in } \text{‰} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{sample}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{standard}} - 1 \right] \times 1000$$



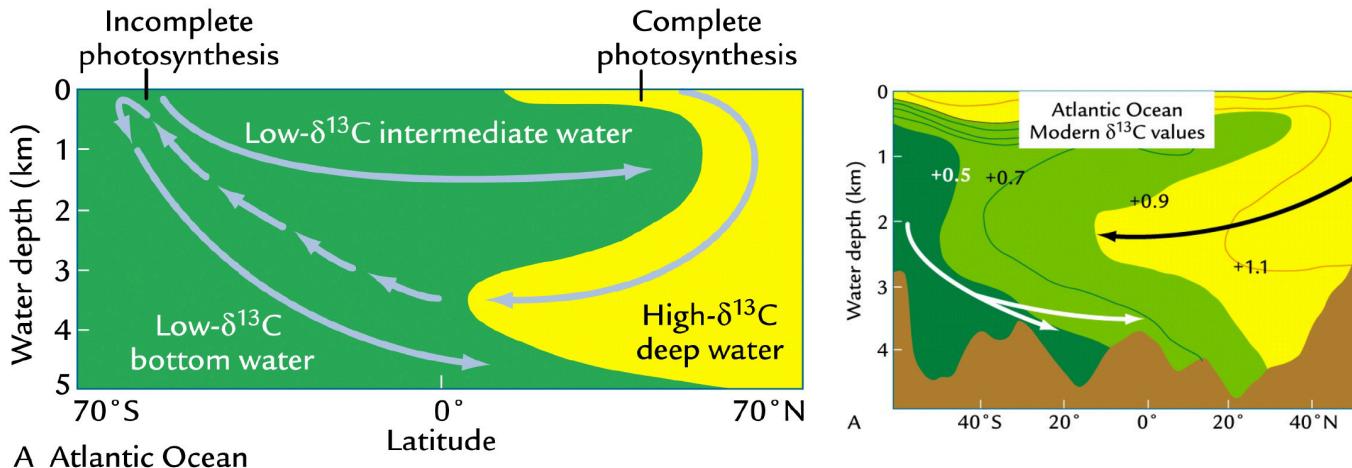
$\delta^{13}\text{C}$ for watermass

non-conservative: complicated by remineralization

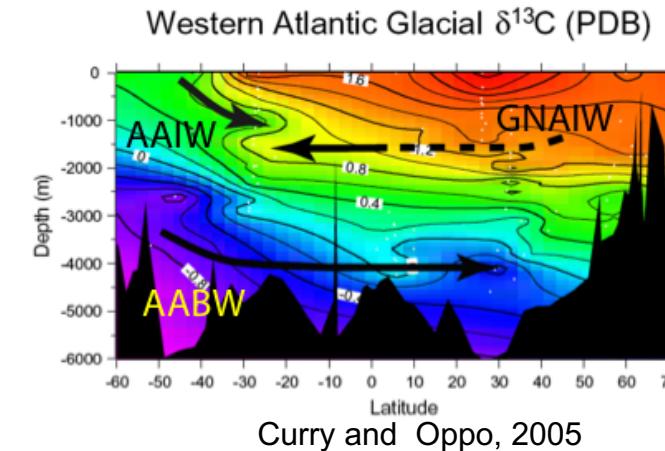
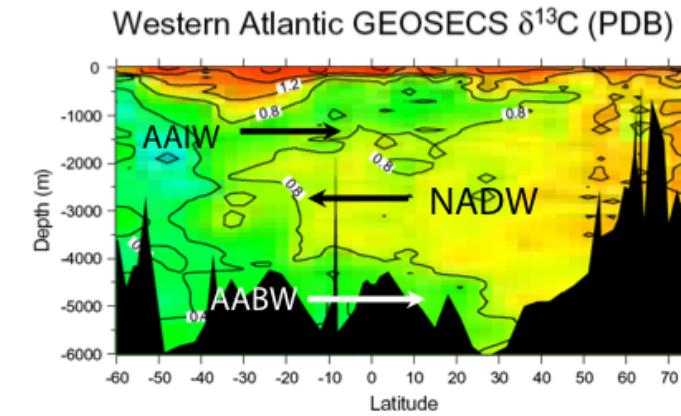
大西洋主要水团



水团的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征

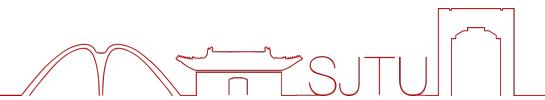


现代和末次盛冰期(LGM ~ 2万年前)的 $\delta^{13}\text{C}$



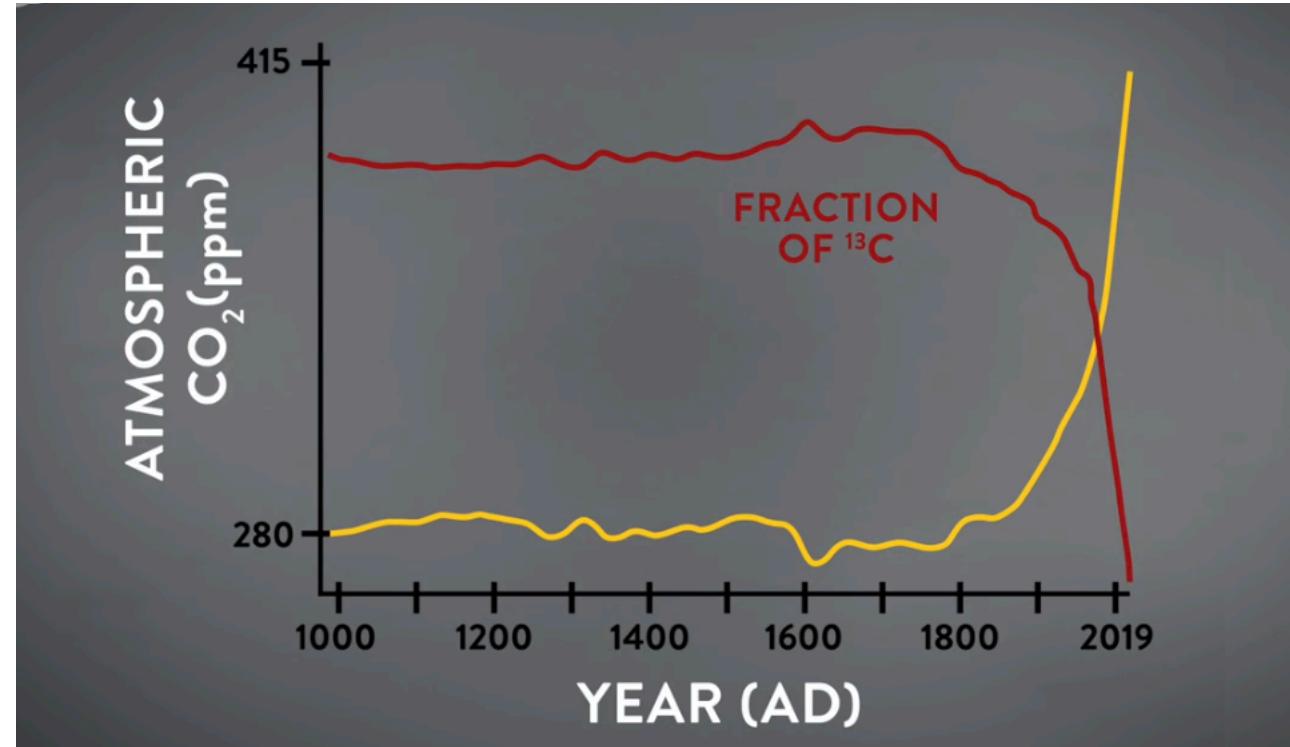
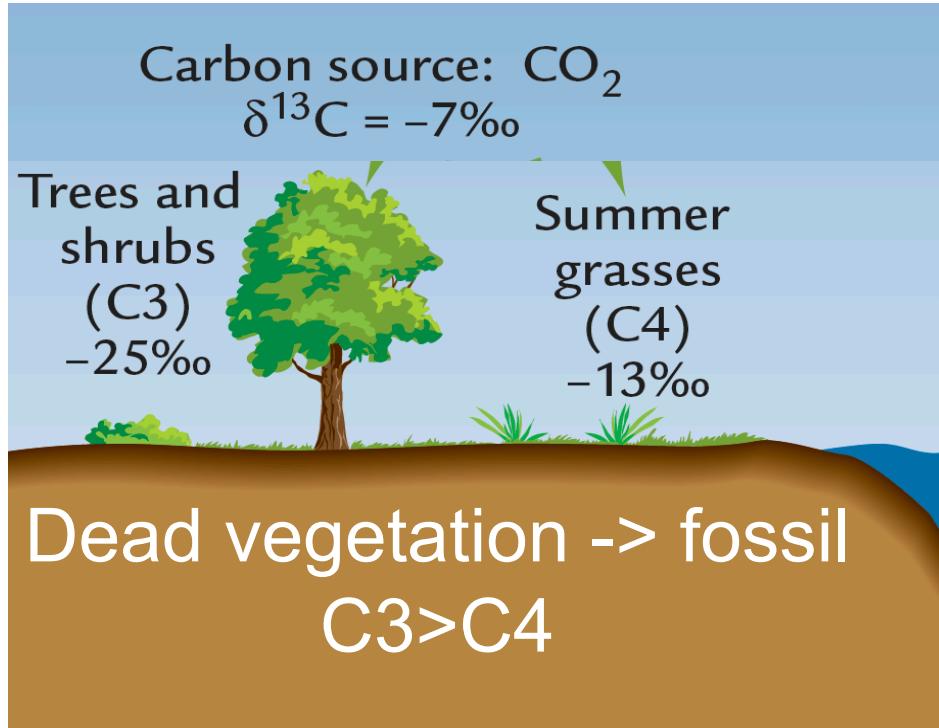
Glacial North Atlantic
Intermediate Water

Curry and Oppo, 2005
→ shallower LGM AMOC





人类活动造成的CO₂上升？

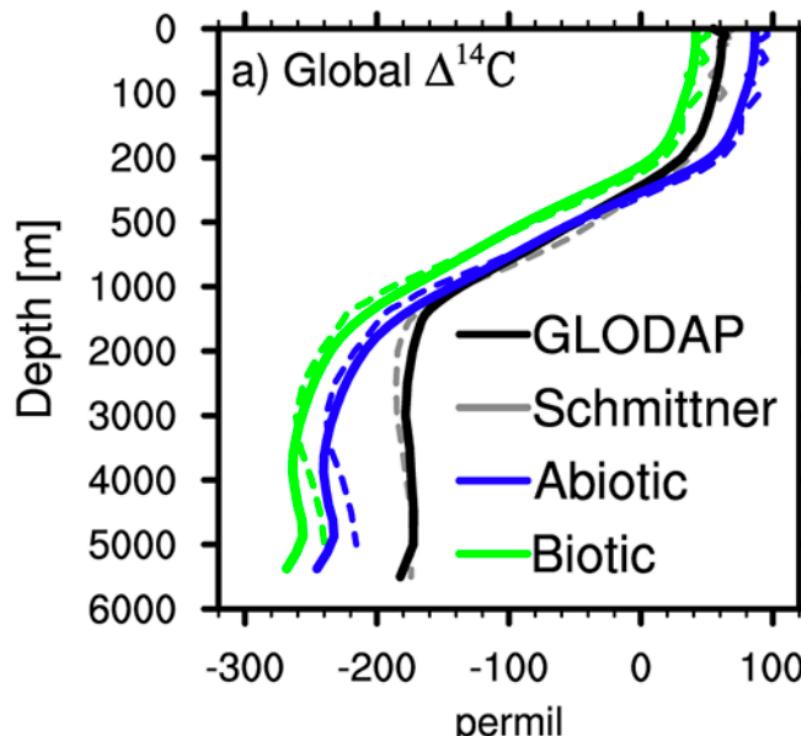


9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

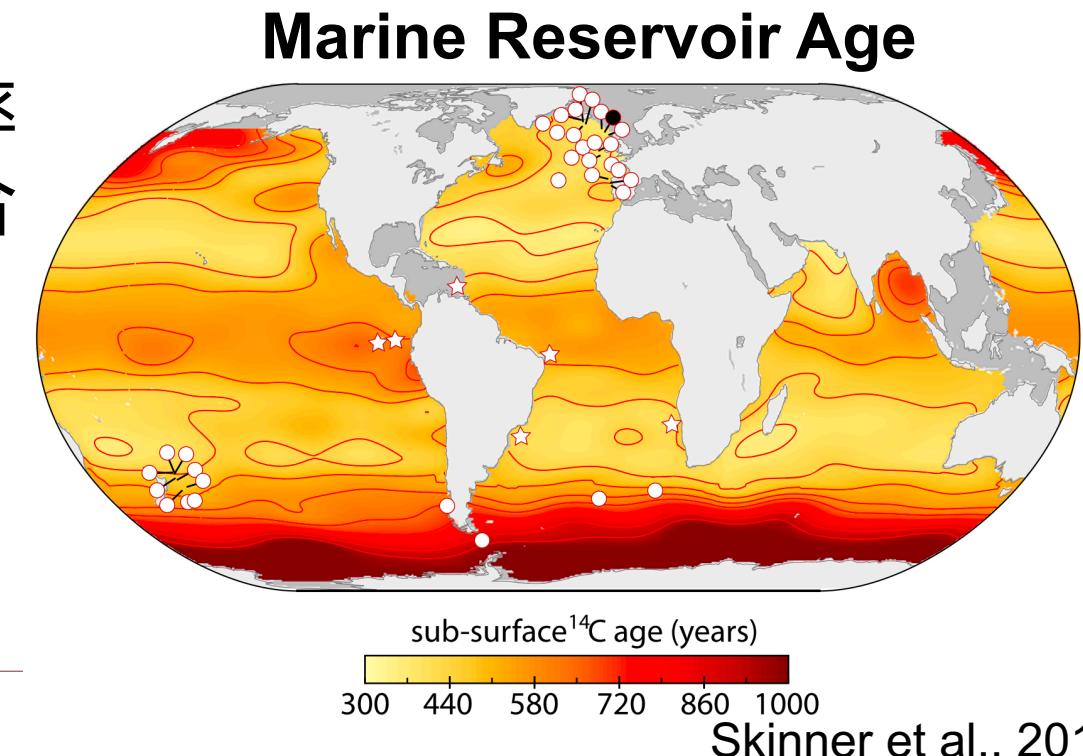
(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：碳14 海洋碳14和大气碳14得到**时间**：“通风”(ventilation)



潜在问题：

- 海气交换速率
- 不同水团混合



9.1.3 代用资料 (proxy record)

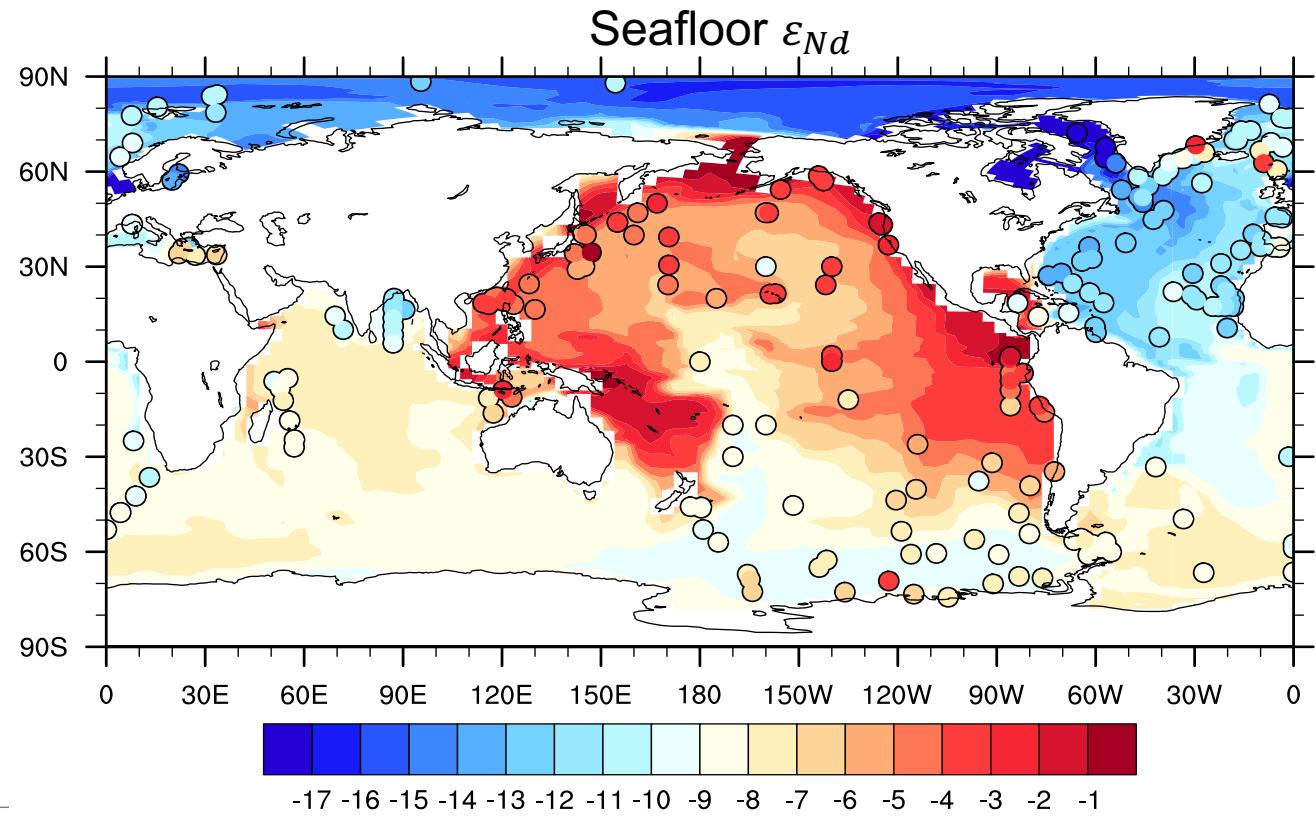
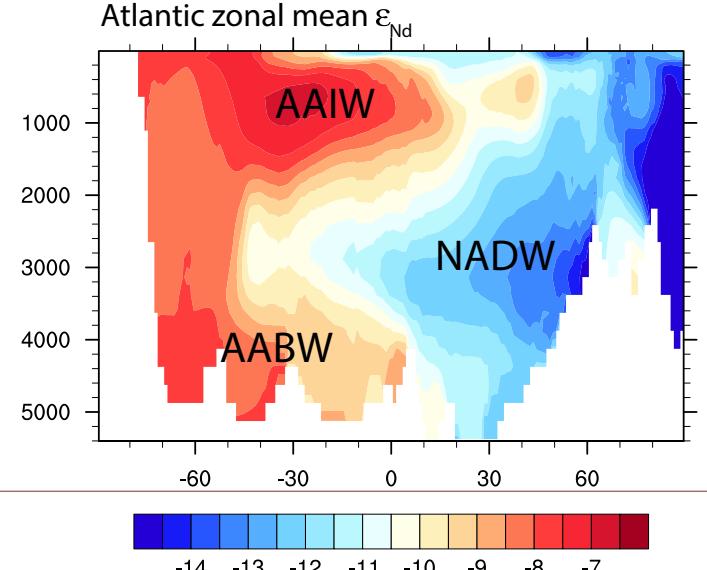
d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：钕同位素

$$\varepsilon_{Nd} = \left[\frac{\left(\frac{143}{144}Nd\right)_{sample}}{\left(\frac{143}{144}Nd\right)_{bulk earth}} - 1 \right] \times 10^4$$

水团分布





第九章 地球气候的演变



9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

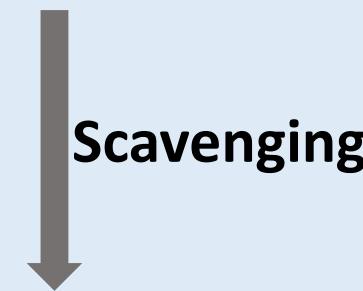
地球化学记录：镁钍比 $^{231}\text{Pa}/230\text{Th}$ 洋流强度

Southern Ocean



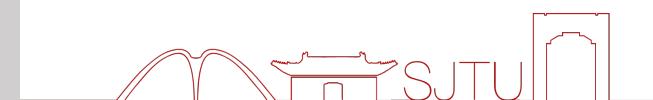
Sedimentary $^{231}\text{Pa}/230\text{Th}$
0.093

North Atlantic



0.093

$$\text{生成速率} \frac{\beta_{\text{Pa}}}{\beta_{\text{Th}}} = 0.093$$

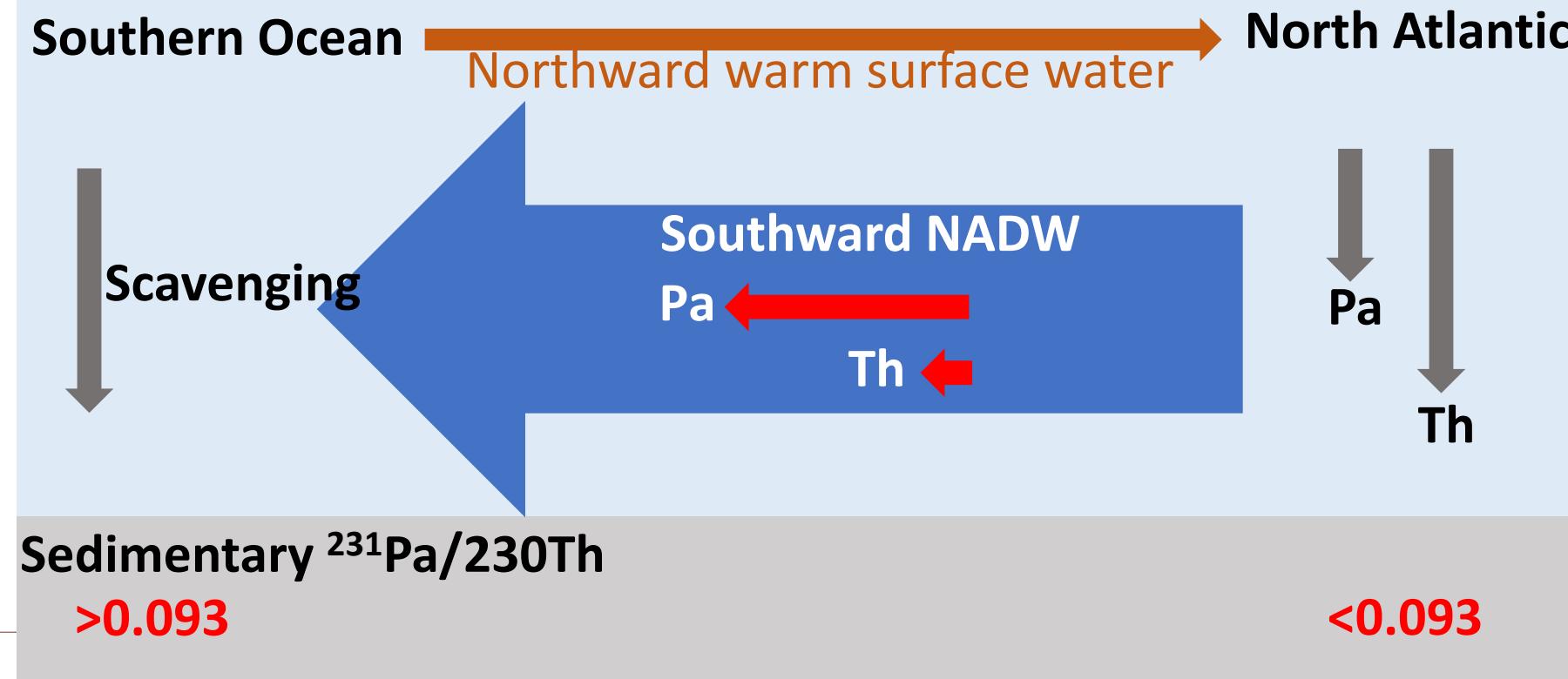


9.1.3 代用资料 (proxy record)

d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：镤钍比 $^{231}\text{Pa}/230\text{Th}$ 洋流强度



$$\text{生成速率} \frac{\beta_{\text{Pa}}}{\beta_{\text{Th}}} = 0.093$$

9.1.3 代用资料 (proxy record)

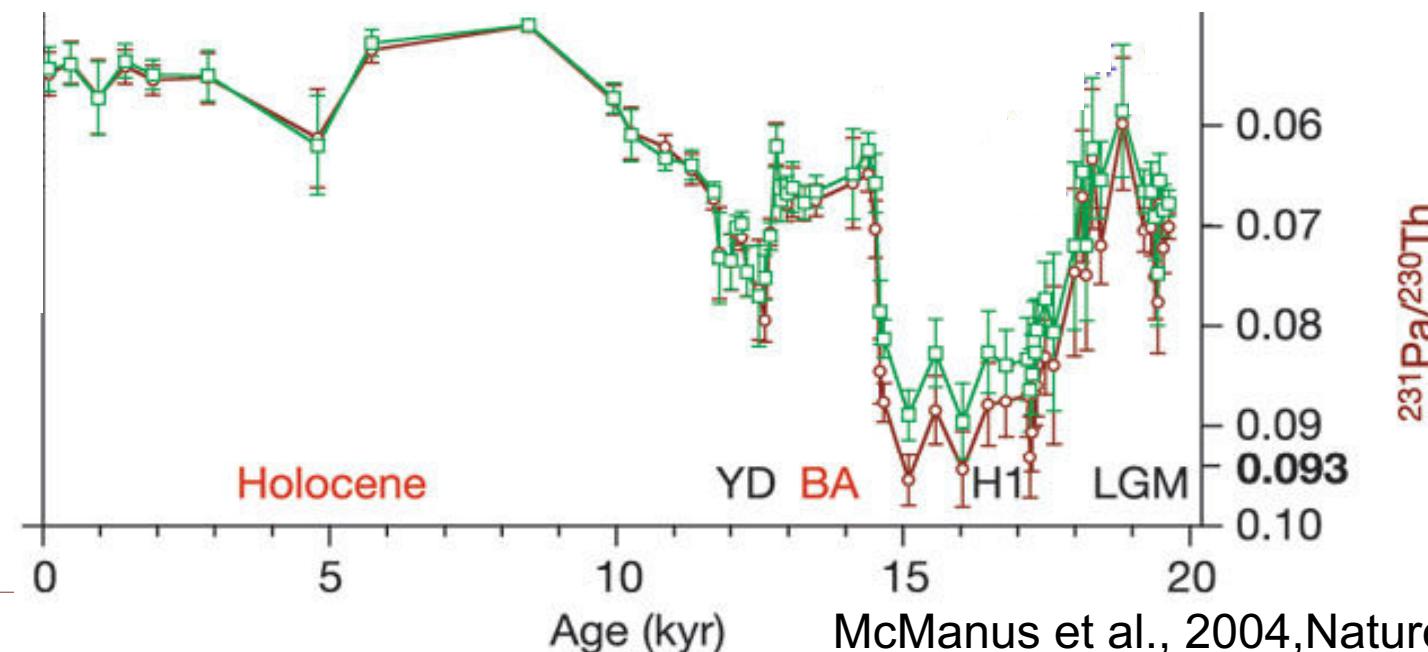
d. 代用记录与物理量

(2) 地质和地球化学记录 (geological and geochemical data)

地球化学记录：镁钍比 $^{231}\text{Pa}/230\text{Th}$ 洋流强度

北大西洋 $^{231}\text{Pa}/230\text{Th}$ 指示 AMOC

AMOC↓,
Southward transport ↓
 $\text{Pa/Th} \uparrow, \rightarrow 0.093$





9.1 不同种类的观测 总结

- 不同种类的代用记录（**原理**）：树轮，石笋，冰芯，湖泊沉积物，珊瑚，海洋沉积物，陆地沉积物；
- 定年方法：放射性定年（**碳14 可以定年100万年前吗？**），年层定年（**哪些记录可用？**），轨道参数定年（**前提？**）；
- 分辨率：**沉积物的分辨率和哪些因素有关？**
- 生物(**如孢粉**)和地质(**如冰筏碎屑**)代用记录分布？原理？
- **不同记录中的氧同位素指示什么？**（冰芯，海水，有孔虫）
- 海洋中的同位素主要指示什么？（**碳13，碳14， ε_{Nd} ， $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$** ）



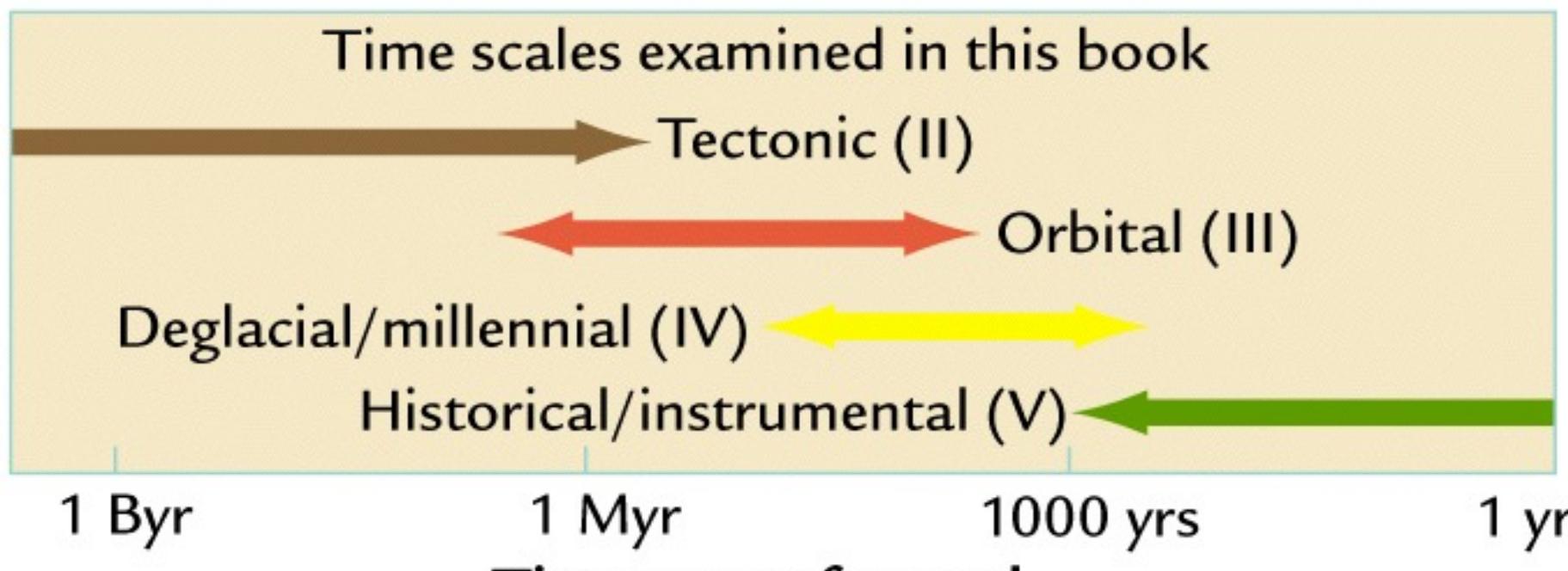
9.2 不同时间尺度的气候变化

9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

9.2.2 轨道尺度 (orbital scale)

9.2.3 冰期-间冰期尺度 (glacial-interglacial scale)

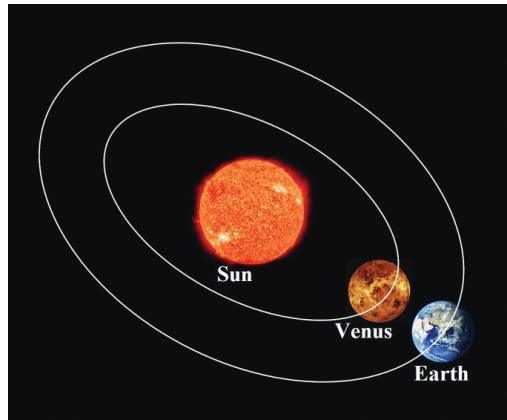
9.2.4 历史时期 (historical scale)





9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化



1. 金星距离太阳更近？

距离：金星/地球=0.72；

太阳辐射:金星/地球=(1²)/(0.72²)=1.93；

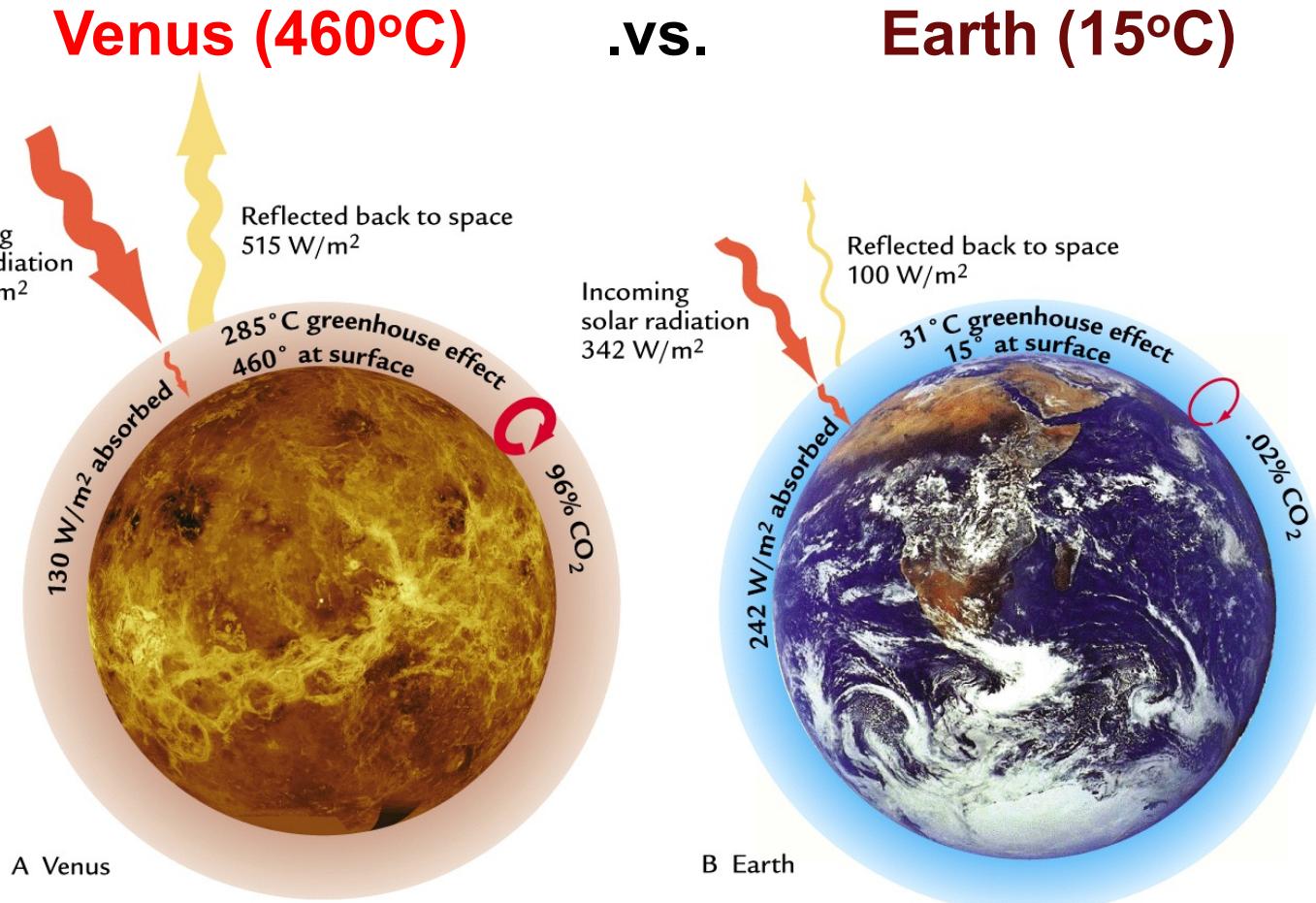
反照率：金星80%，地球26%；

大气层顶太阳辐射：

金星/地球=1.93x (0.20/0.74)=0.52；

金星更冷？？

Why Venus is hotter than Earth?

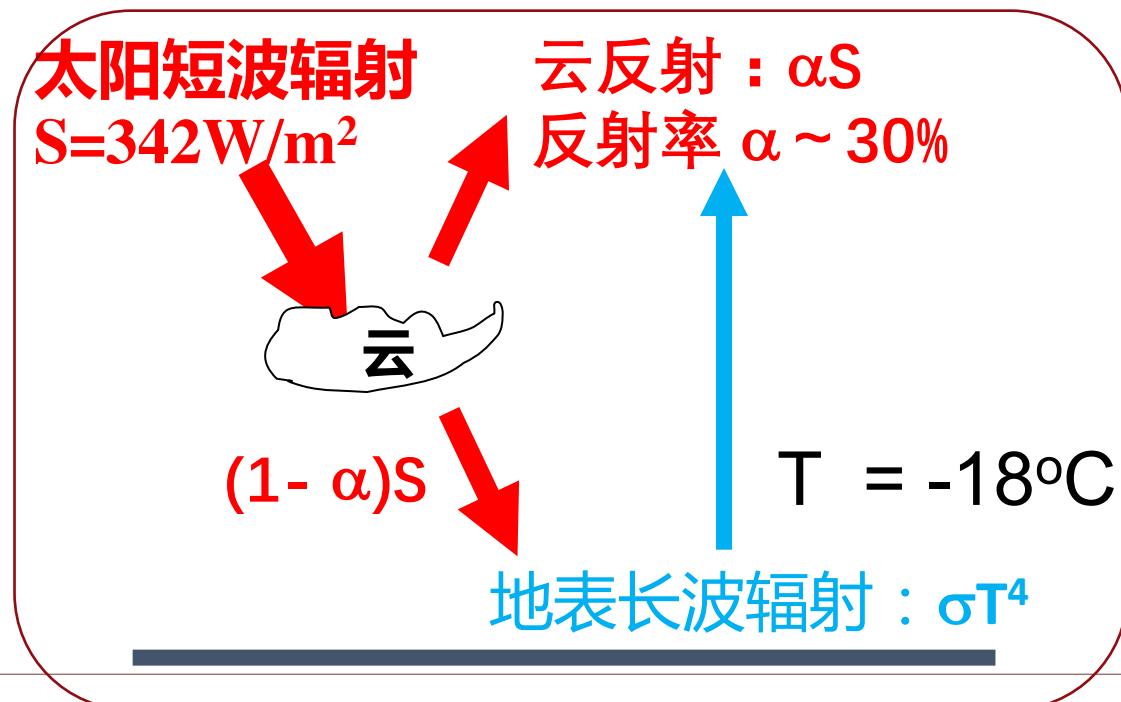


9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化

Why Venus is hotter than Earth?

Venus (460°C) .vs. Earth (15°C)



2. 温室效应



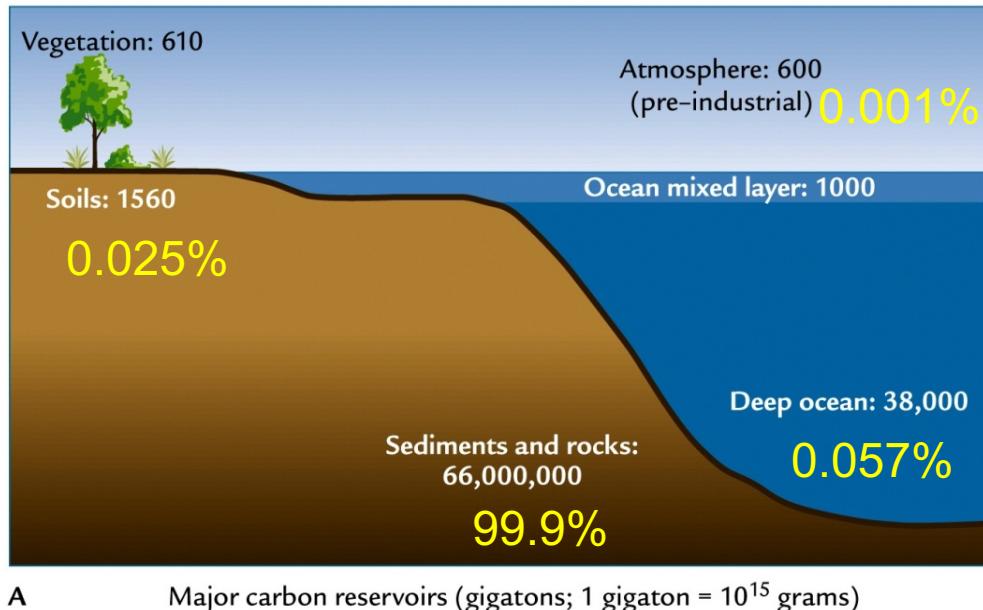
第九章 地球气候的演变



9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化

Carbon reservoirs on the earth



Why Venus is hotter than Earth?

Venus (460°C)

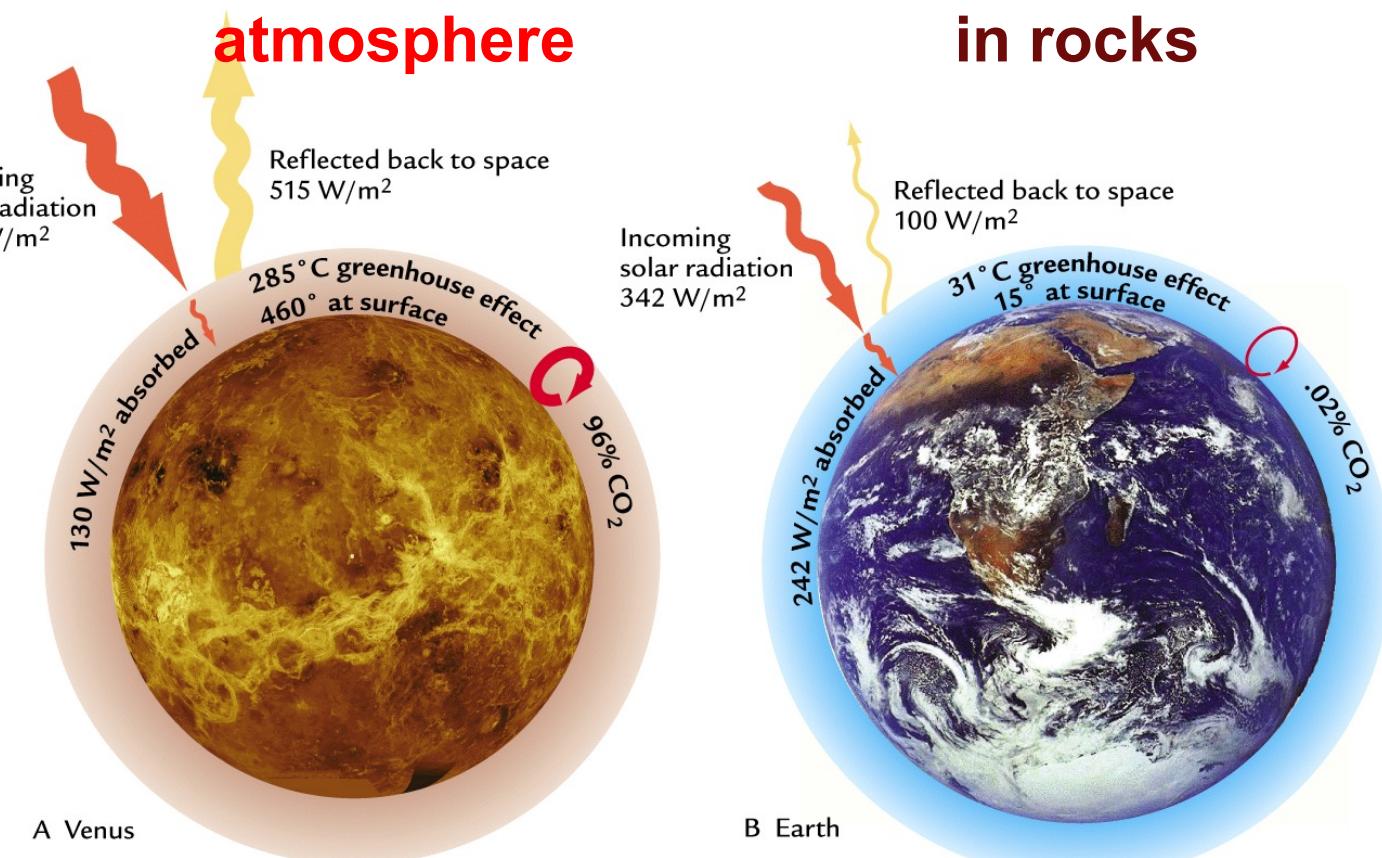
.vs.

Earth (15°C)

The same amount of total carbon

All carbon in the atmosphere

Most carbon in rocks

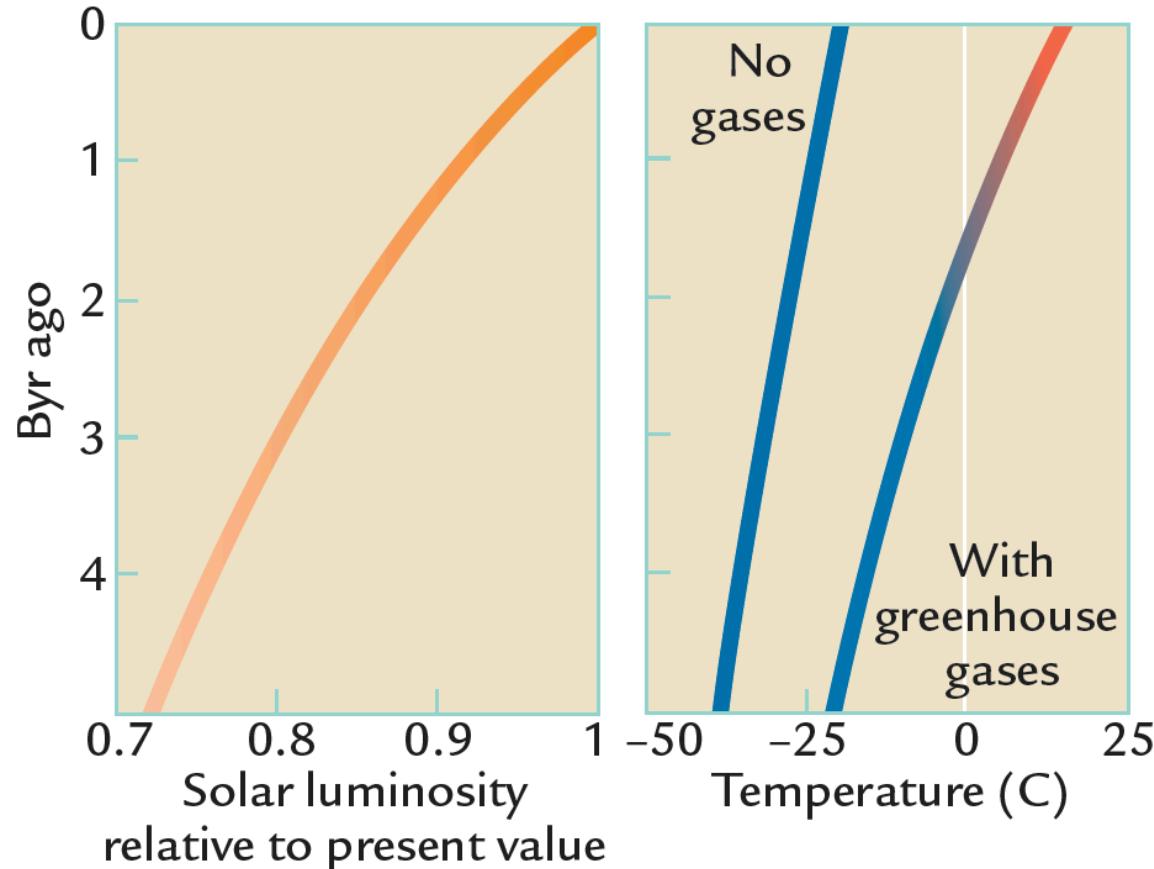




9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

The faint young Sun paradox (黯淡太阳悖论)



- 地球早期时，太阳比现在弱 ~ 30%
-> 雪球地球(snowball earth)
- 地球前30亿年的沉积岩记录 (流动水)
 - 35亿年前存在原始生命
 - > 地球没有完全冰冻

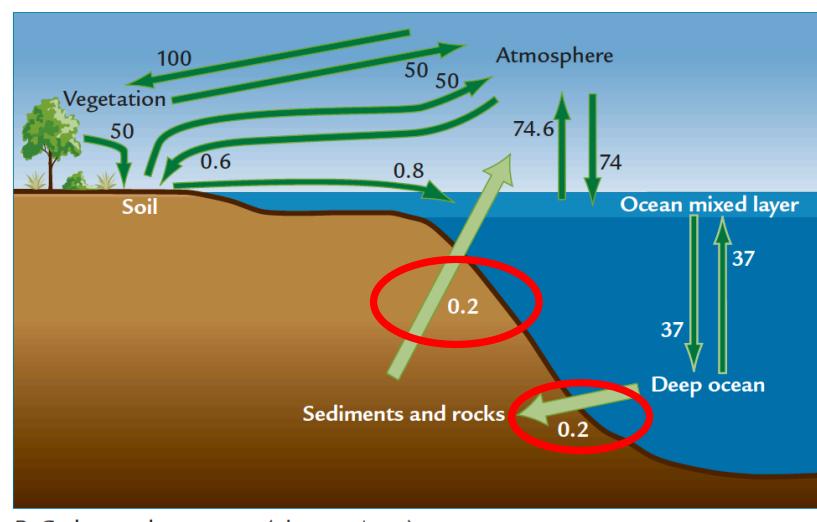
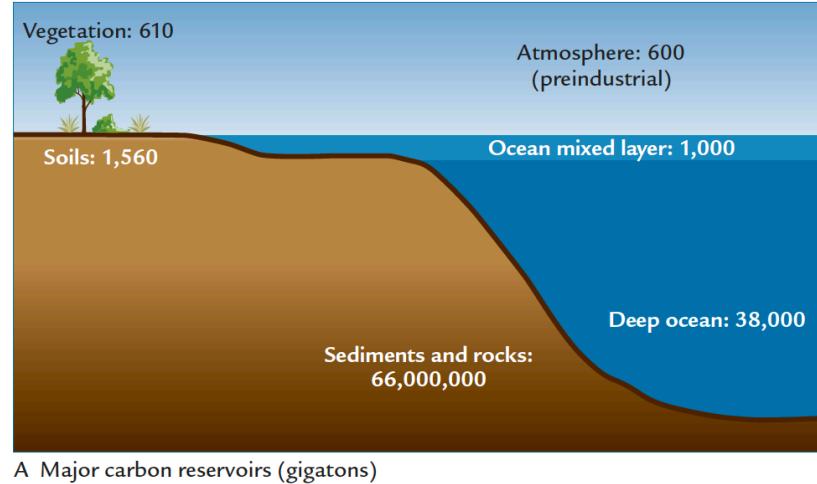
地球前2/3的历史中，在太阳强度如此弱的情况下，地球为什么没有被冻结？

- 存在某种机制使地球温暖！
- 但是这种机制在现代不起作用
-> 存在“温度调节器” (thermostat)

CO₂? 过去地球CO₂更多在大气中?

9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)



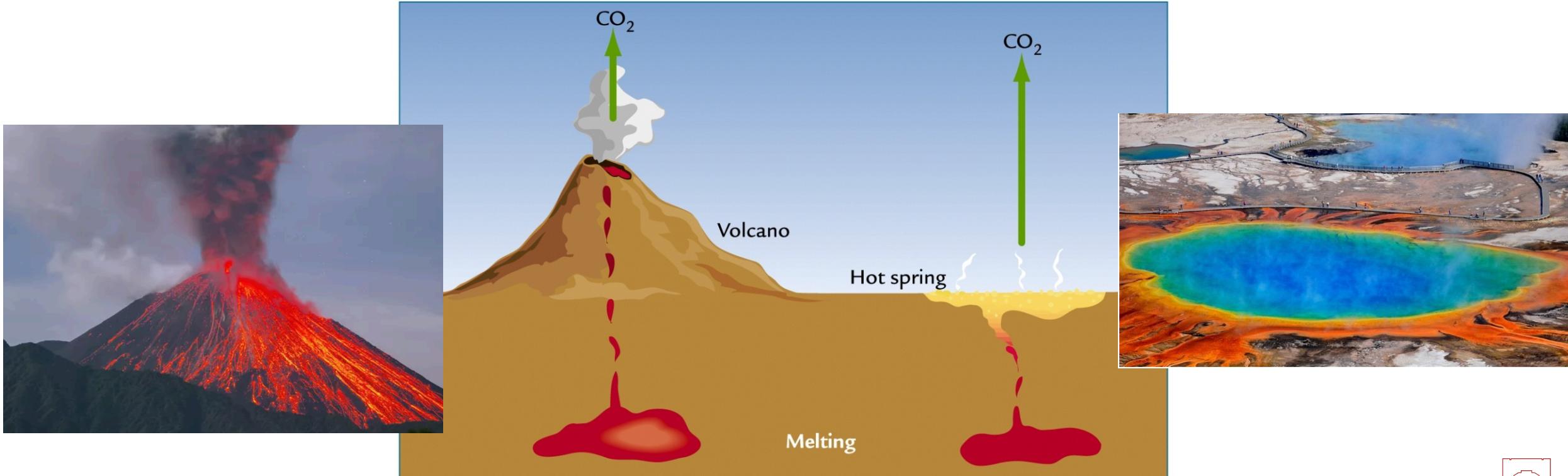
碳库及其交换速率

- 一般来说，碳库大小与它的碳交换速率成反比：大气、植被、表层海洋间交换较快；和岩石间的交换极其缓慢；
- 所有的碳库都和大气间存在交换，影响大气CO₂从而影响气候。不同碳库在不同时间尺度上的作用不同。
- 在**构造尺度上(几十亿~几千万年)，岩石圈和大气间的交换**是影响大气CO₂的关键。

9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

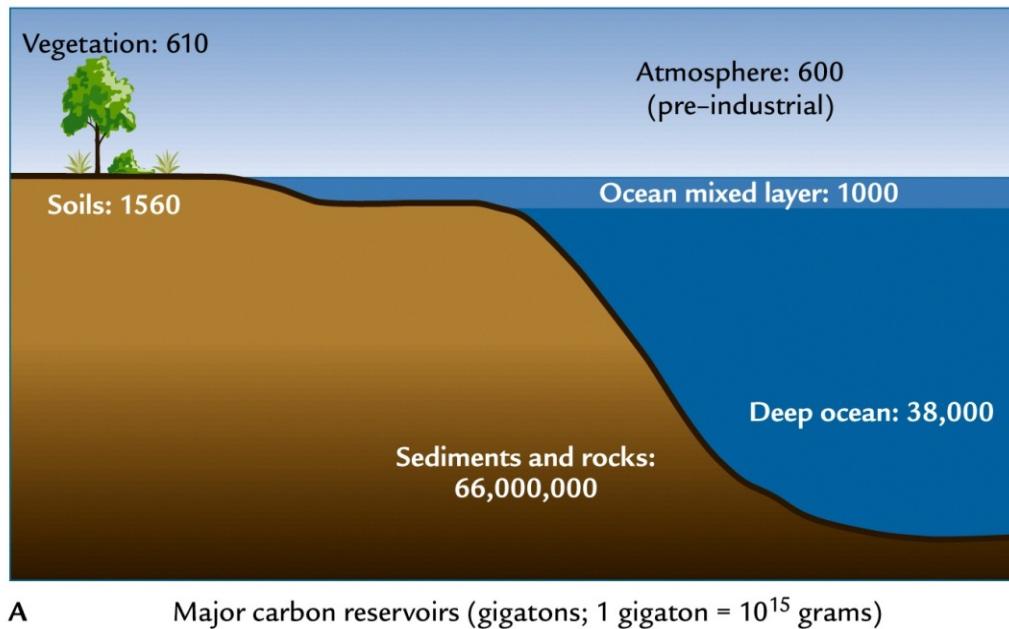
碳源：火山喷发



9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

碳源：火山喷发 ~ 0.15 GT/yr



- 大气 : $600/0.15=4000$ yr
- 表层碳库 (植被, 大气, 土壤, 海洋混合层) : $3700/0.15=24,700$ yr
- +深海碳库 : $41,700/0.15=278,000$ yr

与地球历史比非常短暂！

**火山喷发在长时间尺度上足够给
地球其他碳库提供碳。**

但是火山喷发CO₂不存在反馈机
制，不能形成“温度调节器”。

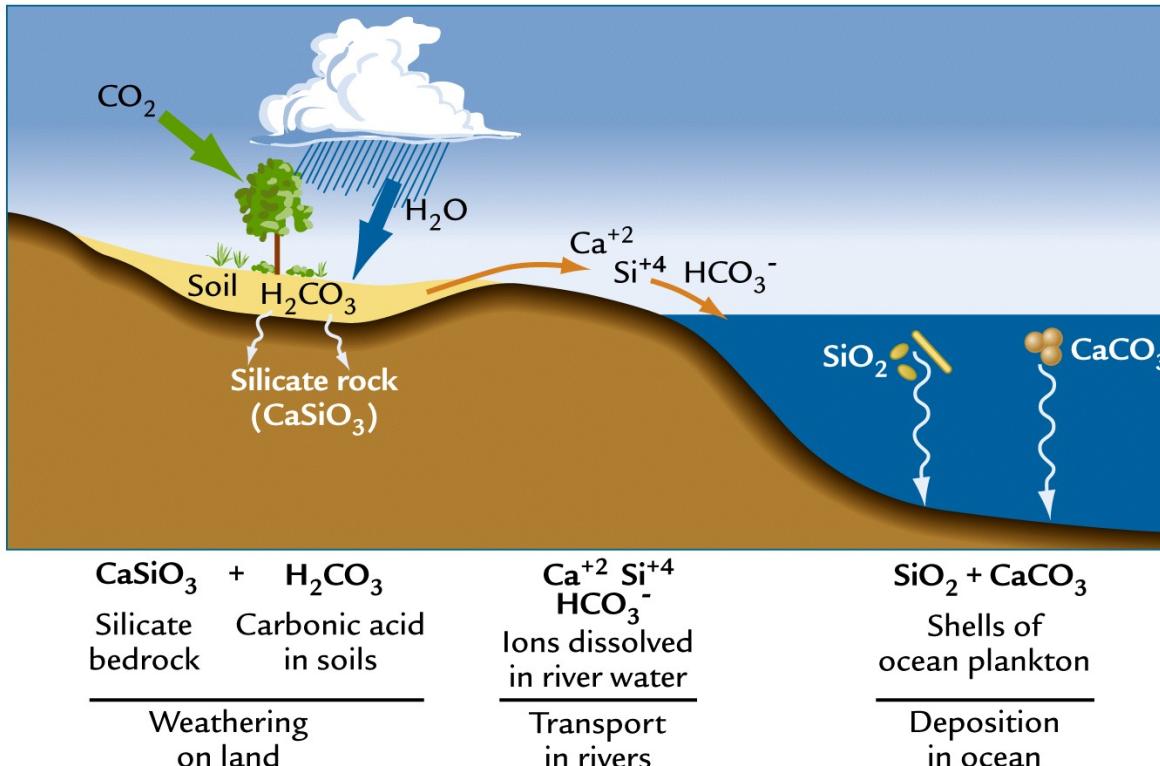


9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

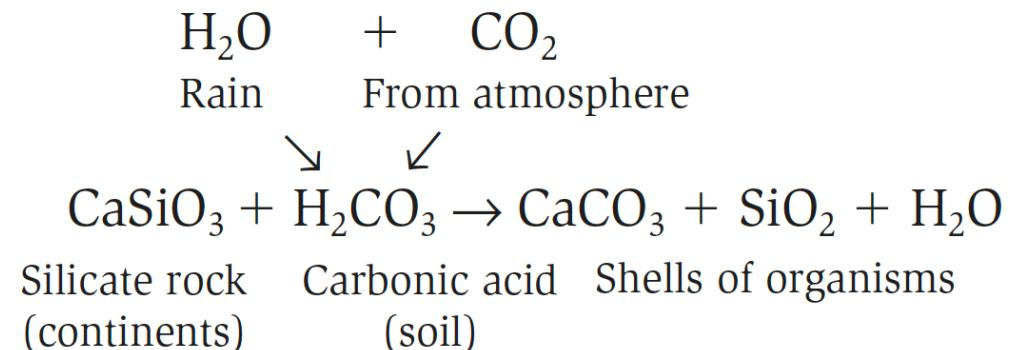
a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

碳汇：化学风化作用1 水解(hydrolysis)

富含CaSiO₃的岩石的化学风化作用将CO₂从大气中移除。



水解(hydrolysis)



- 缓慢而持续；
- 贡献 ~ 80% 的碳汇



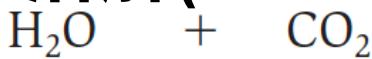
9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

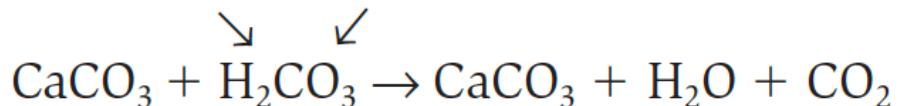
化学风化作用2 溶解(dissolution)

石灰岩 (CaCO₃) 溶解将CO₂从大气中移除

溶解(dissolution)



Rain From atmosphere



Limestone In soils Shells of Returned to
rock organisms atmosphere

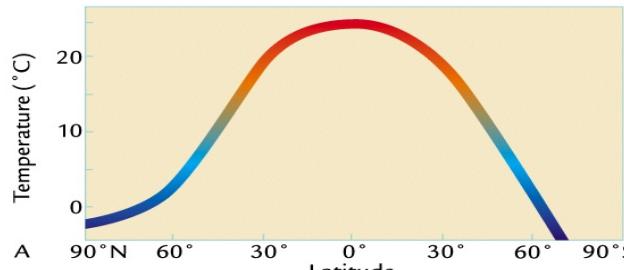
- 迅速；
- **net removal = 0**



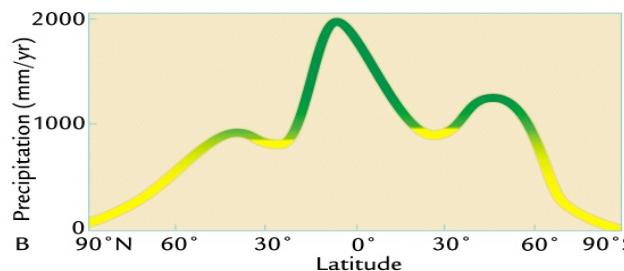
9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO_2 和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

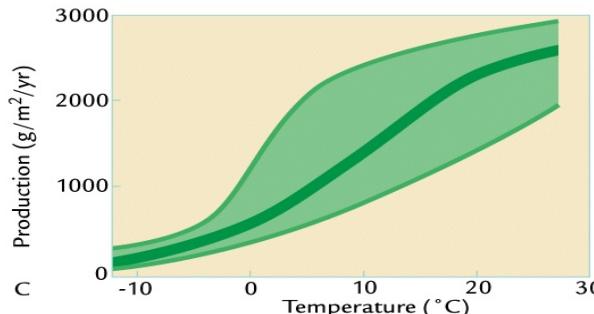
化学风化作用- “地球的调温器”: 通过温度，降水和植被



温度越高 → 硅酸盐矿物风化越快
(10°C ~ 两倍)



降水越多 → 土壤中地下水增多
→ 风化越快



植被越多 → 光合作用将 CO_2 输送到土壤中，
与地下水形成 H_2CO_3 增多 → 风化越快

通常情况下，
三者正相关：
温度高，降水
多，植被多

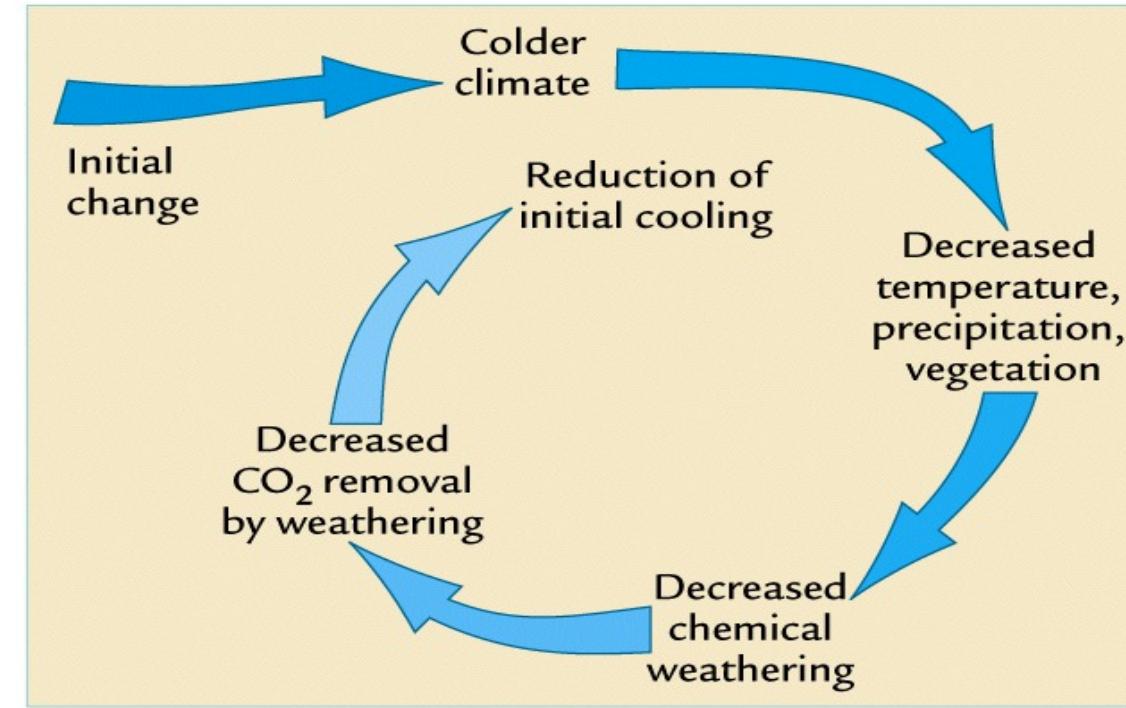
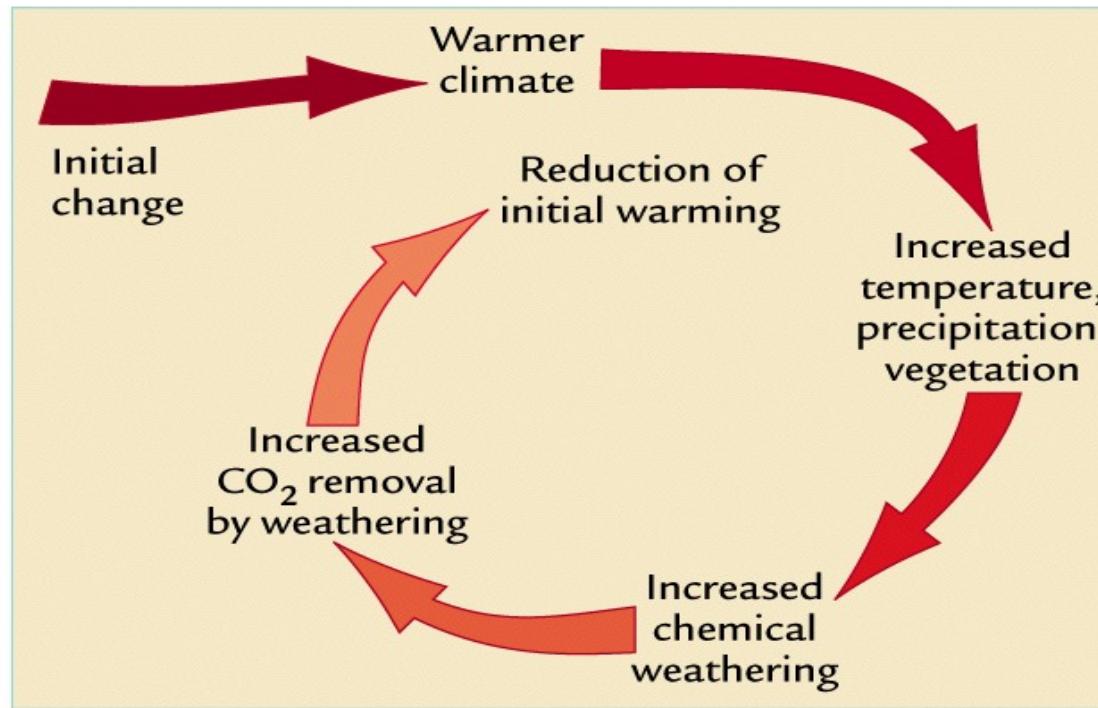




9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

化学风化作用-“地球的调温器”: 负反馈机制

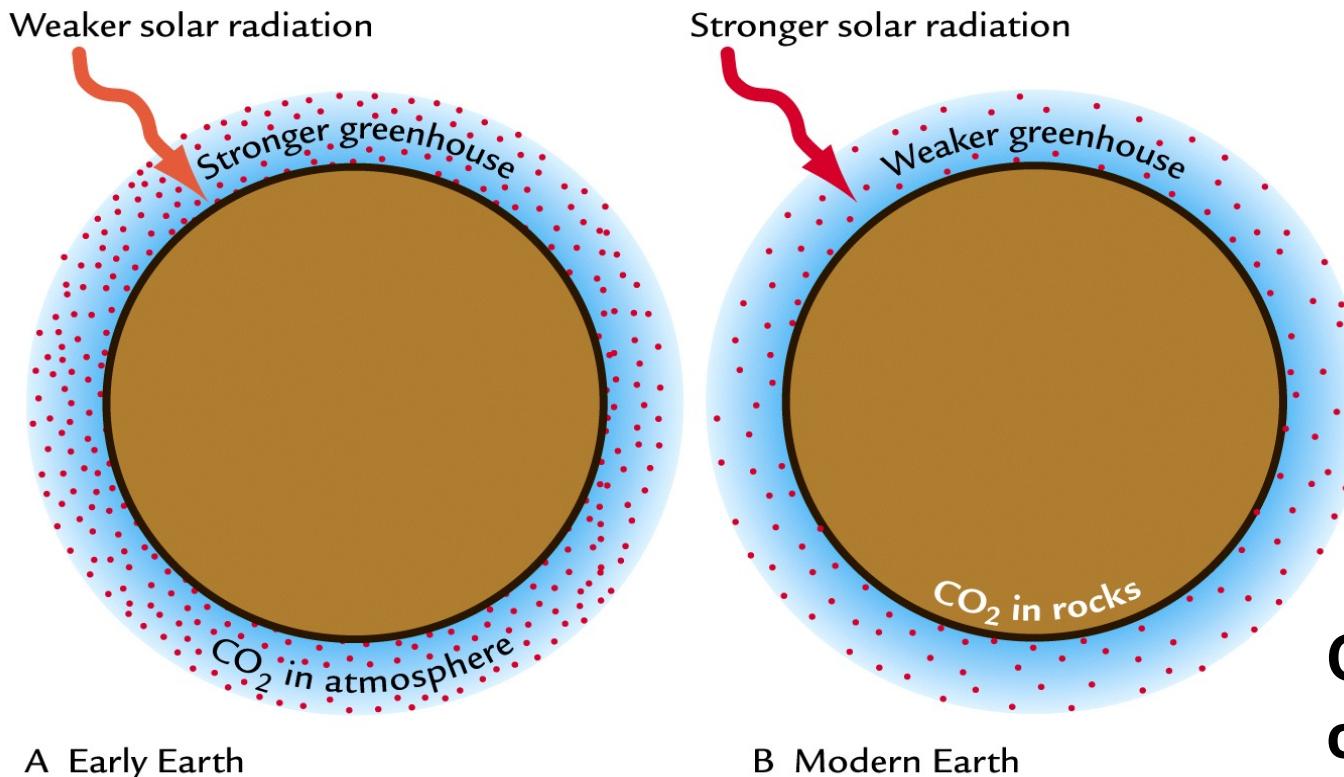




9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

风化负反馈机制解释 “黯淡太阳悖论”



地球早期：

太阳辐射弱 → 更冷 → 更少降水和植被 →
更少风化 → 更多CO₂留在大气中 → 更强
的温室效应 → 升温，补偿太阳辐射变化

Chemical weathering is an excellent candidate for Earth's thermostat

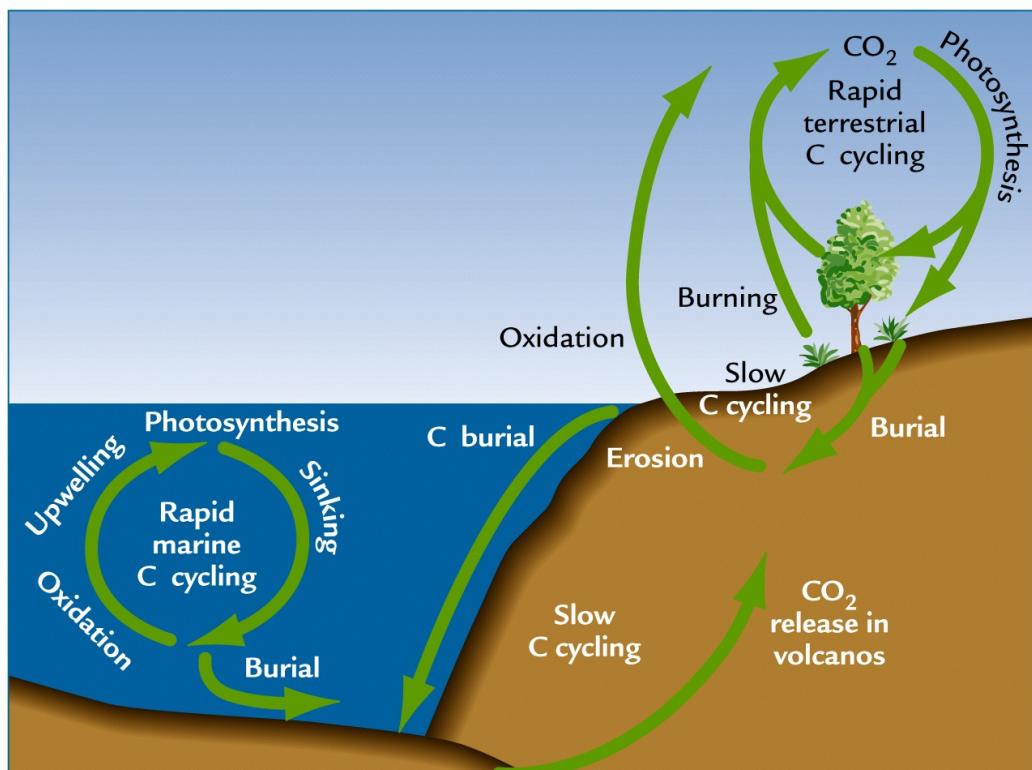
(James Walker, Paul Hays and James Kastings)

9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

盖亚假说(The Gaia Hypothesis)调节气候变化

有机碳循环占~20%岩石碳库和表层碳库间的交换



生命本身负责调节地球的气候
(J. Lovelock and L. Margulis, 1980)

反馈机制：
增暖 → 更多植物/浮游植物 → 吸收CO₂ →
更弱的温室效应 → 降温



9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

a. CO₂和长时间尺度气候变化 (~ 45亿年前 4.5Byr)

盖亚假说(The Gaia Hypothesis)调节气候变化

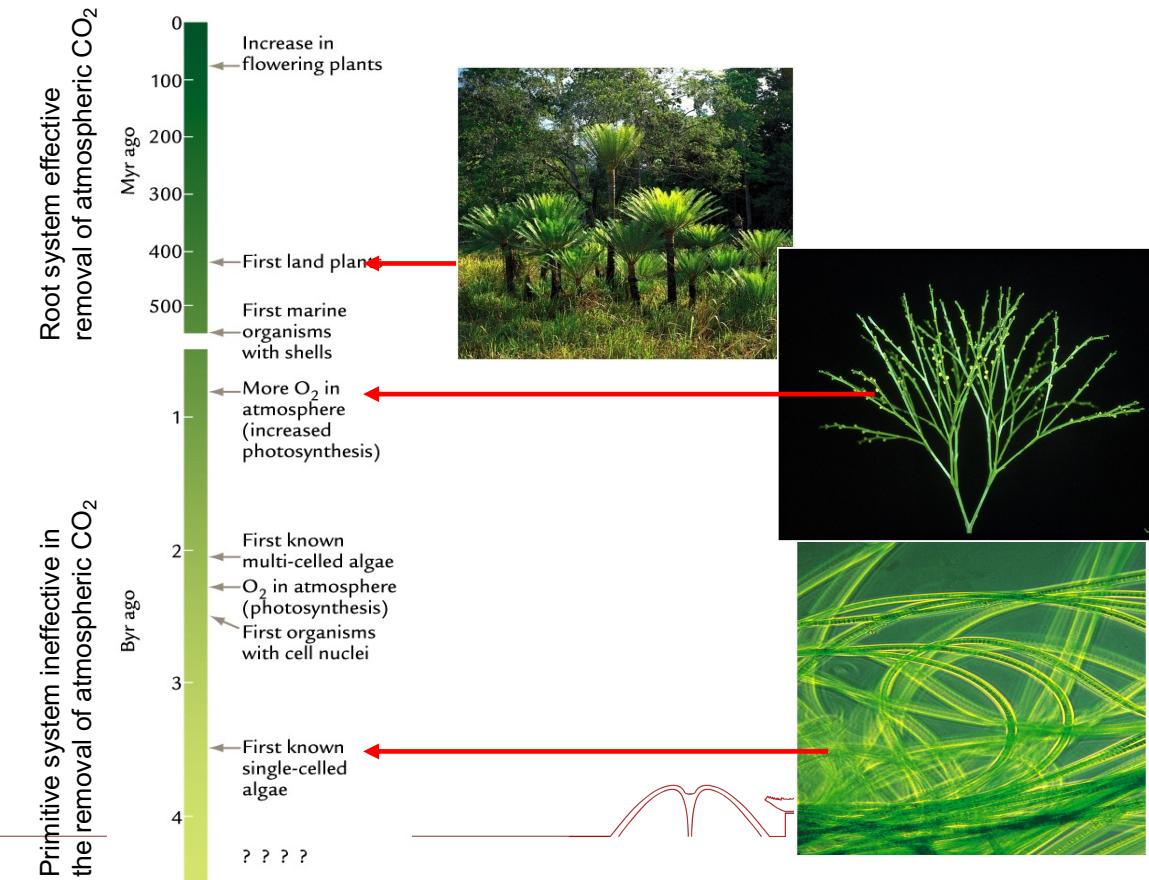
争论：

-
早期植物风化效率低，现代植物出现在450Ma

+

早期的细菌也能帮助减少CO₂；
生命的进化与地球对逐渐增强的化学风化的需求
相匹配：更复杂的生命导致CO₂减少增强。

“生命”起作用，但是作用多大？

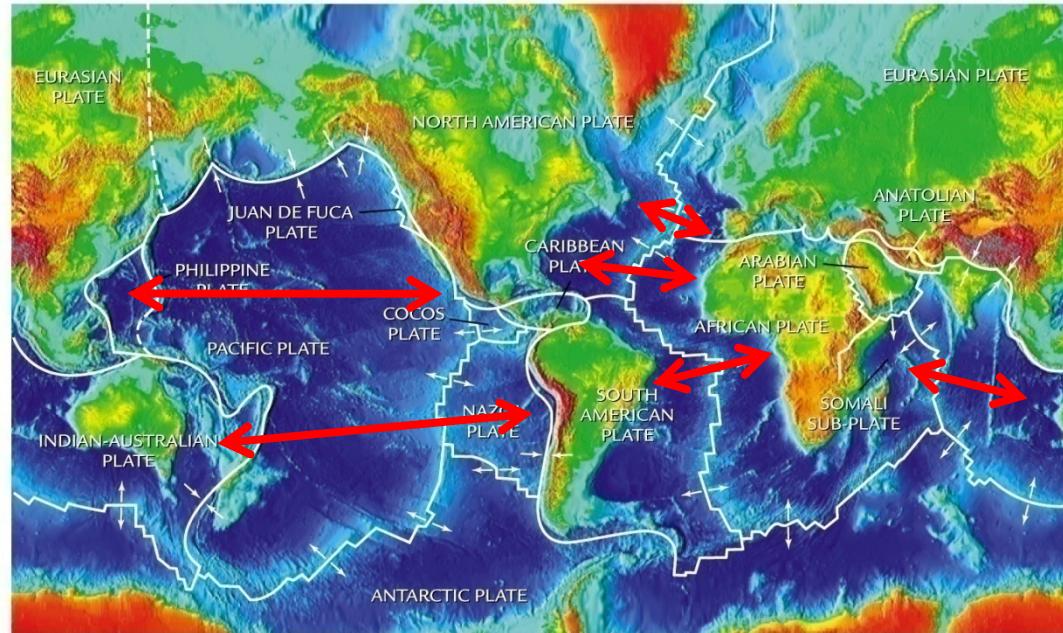


9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

b. 板块构造与气候 (~ 5.5亿年前 550Myr)

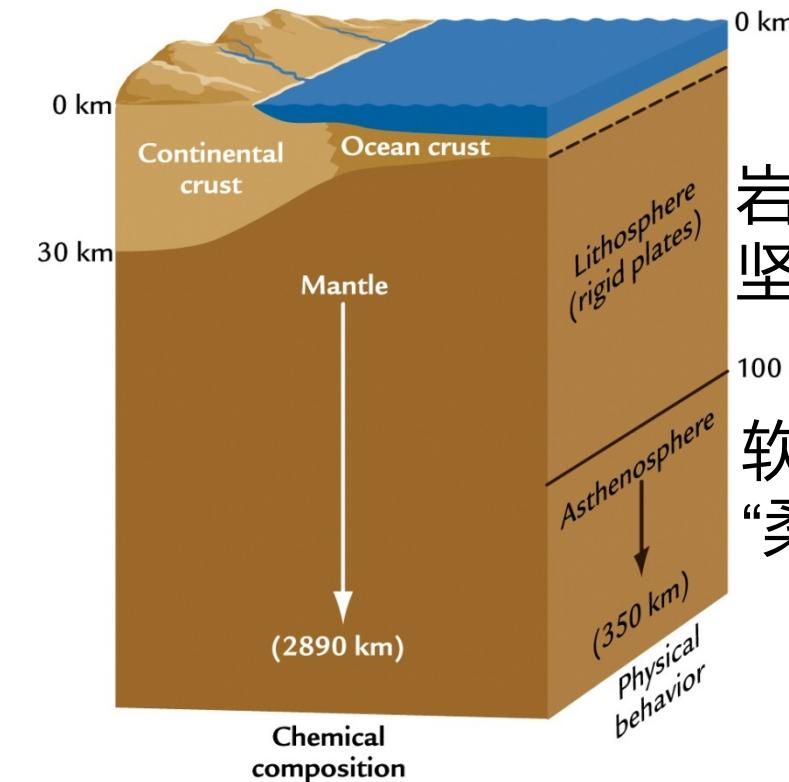
大陆漂移说

Alfred Wegener (1914, 德国气象学家)



1-10 cm/yr ==> 5000km/100myr

地球构造



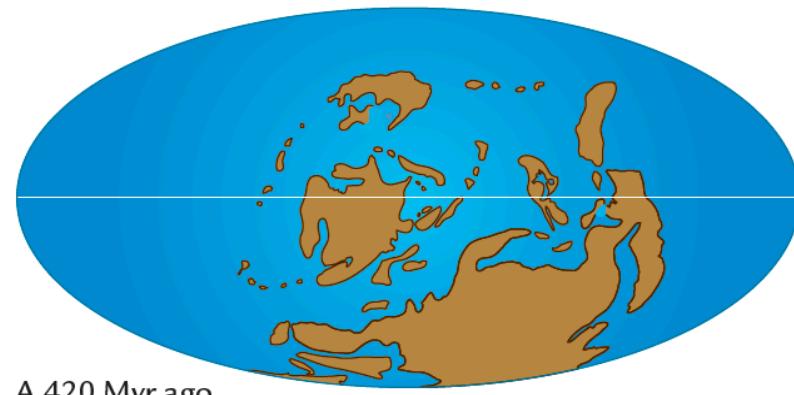
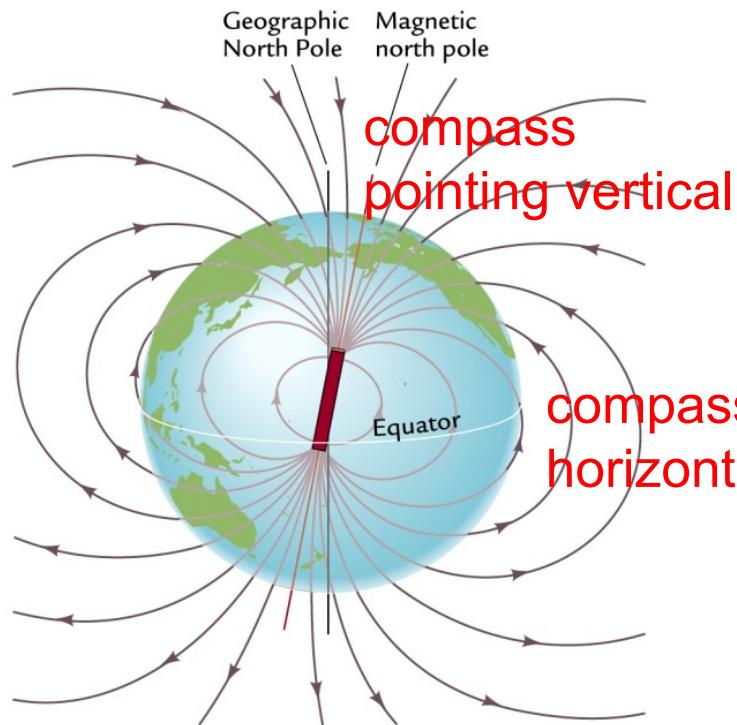
岩石圈：
坚硬，刚性

软流圈：
“柔软”，易流动

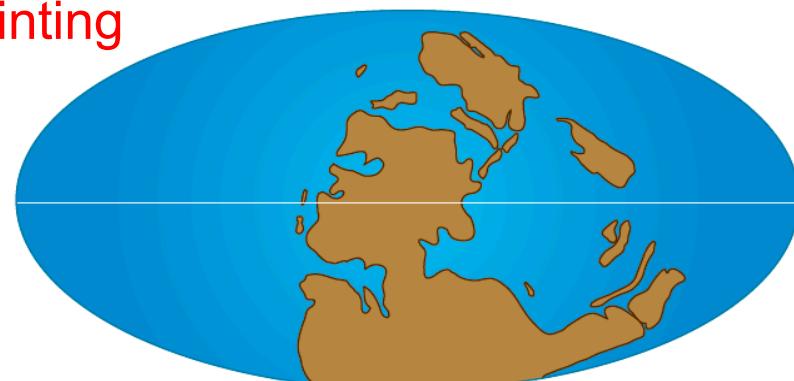
9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

b. 板块构造与气候 (~ 5.5亿年前 550Myr)

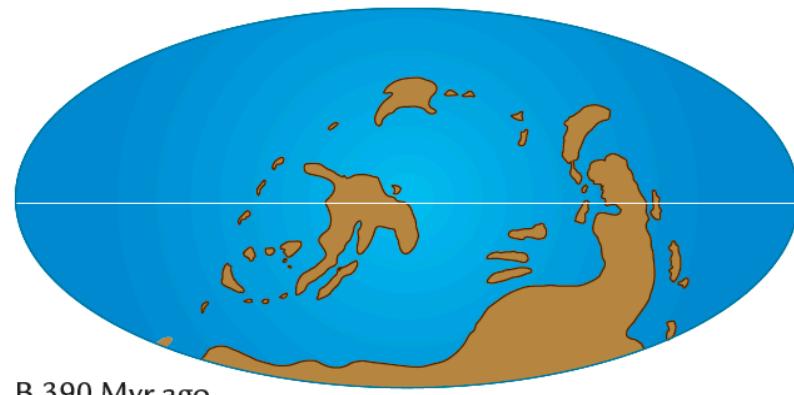
地球磁场



A 420 Myr ago



C 350 Myr ago



B 390 Myr ago



D 260 Myr ago

Pangaea



第九章 地球气候的演变

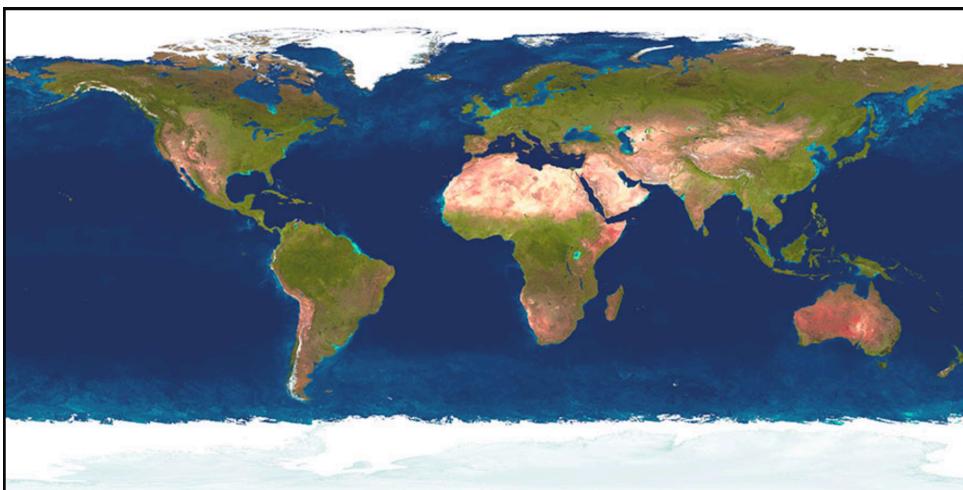


9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

b. 板块构造与气候 (~5.5亿年前 550Myr)

极地位置假说(The Polar Position Hypothesis) : 交替的冰室和温室气候

现代冰盖主要在极地



板块位置解释气候变化：

- (1) 冰盖出现在极地或极地附近；
- (2) 当大陆不在极地附近时不应该有冰。

Table 5-1 Evaluation of the Polar Position Hypothesis of Glaciation

Time (Myr ago)	Ice sheets present?	Continents in polar position?	Hypothesis supported?
445	Yes	Yes	Yes
425-325	No	Yes	No ?
325-240	Yes	Yes	Yes
240-125	No	No	Yes
125-35	No	Yes	No ?
35-0	Yes	Yes	Yes



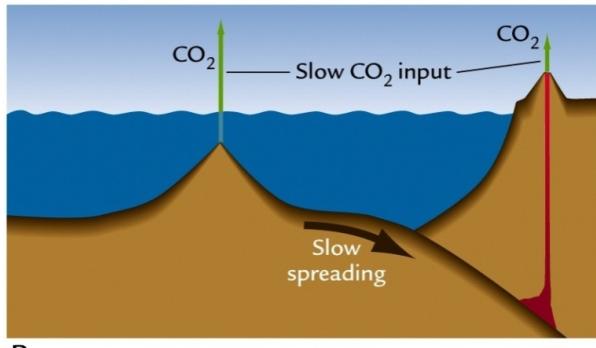
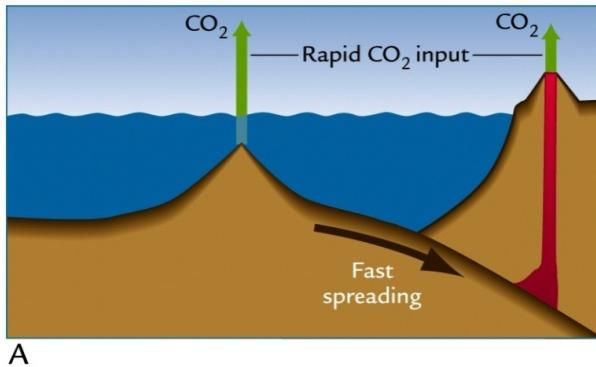
9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

b. 板块构造与气候 (~ 5.5亿年前 550Myr)

板块构造与CO₂ : BLAG spreading rate hypothesis

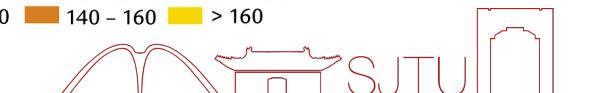
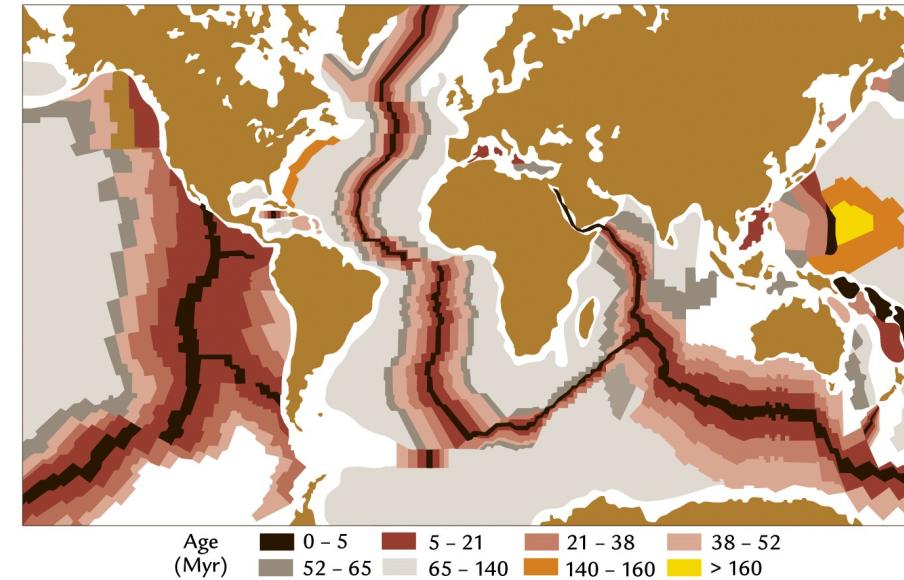
(Robert Berner, Antonio Lasaga, Robert Garrels, 1983)

大气 CO₂浓度由平均海底扩张速度驱动



海底扩张速度增快
→ 更多火山活动
→ 更多大气CO₂

海底年龄 → 海底扩张速度



9.2.1 构造尺度 (tectonic scale)

b. 板块构造与气候 (~ 5.5亿年前 550Myr)

板块构造与CO₂ : BLAG spreading rate hypothesis

(Robert Berner, Antonio Lasaga, Robert Garrels, 1983)

