

个人介绍&现有工作

文献阅读：类地系外行星上的 CO_2 海洋双稳态



王胤杰
2024. 1. 17

Paper Reading

类地系外行星上的 CO_2 海洋双稳态 发表日期: 2022年10月5日

作者: R.J.Graham, Tim Lichtenberg, Raymond T.Pierrehumbert

AGU
ADVANCING
EARTH AND
SPACE SCIENCES

Search

JOURNALS

TOPICS

BOOKS

OTHER PUBLICATIONS

POLICIES

Key Points:

- 宜居带内低日照下, 具液态水海洋的类地行星也可能形成冷凝 CO_2 海洋
- 具 CO_2 海洋气候态与传统地球类气候 (仅水在表面冷凝) 存在双稳态
- 即使存在硅酸盐风化负反馈, CO_2 海洋仍可能稳定存在

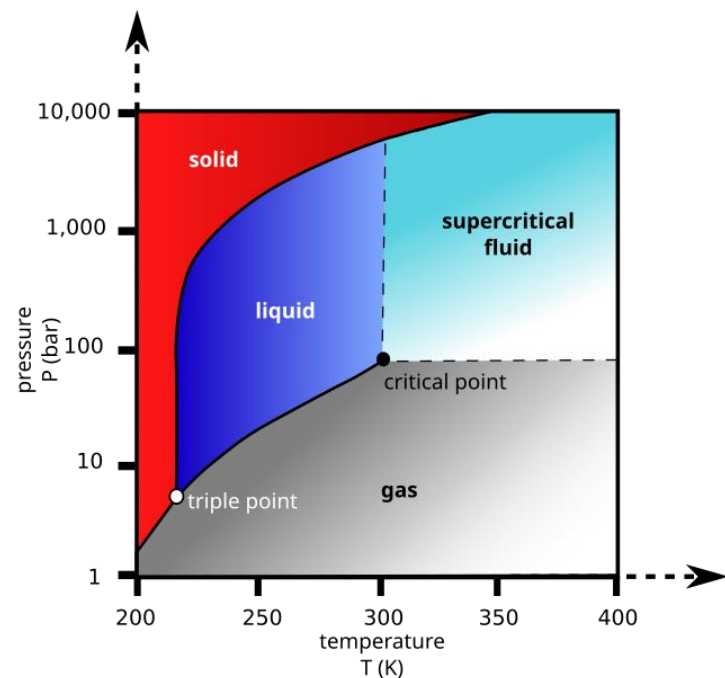
JGR Planets

Research Article | [Open Access](#) | [CC](#) [BY](#) [NC](#) [ND](#)

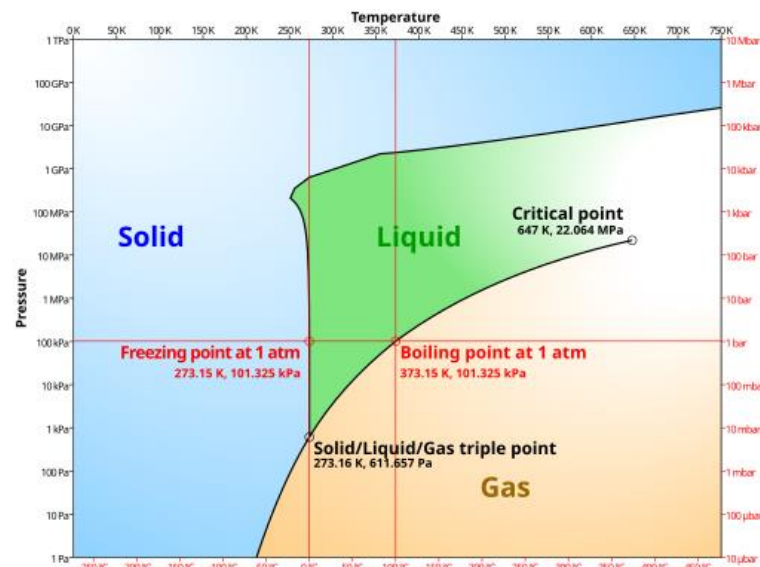
CO_2 Ocean Bistability on Terrestrial Exoplanets

R. J. Graham, Tim Lichtenberg, Raymond T. Pierrehumbert

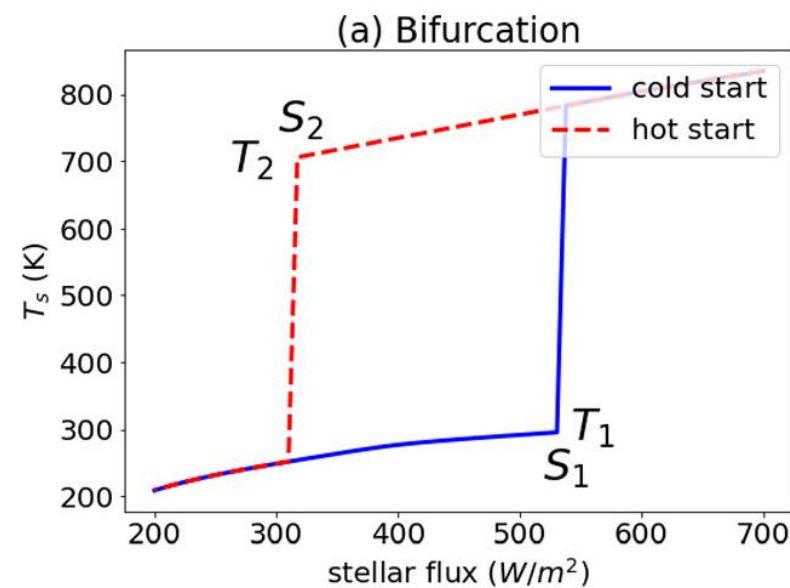
First published: 05 October 2022 | <https://doi.org/10.1029/2022JE007456> | Citations: 1



CO_2 相图



水相图



双稳态

Premise Concept Explanation

碳酸盐-硅酸盐循环的负反馈 (Berner 等, 1983; Coogan & Gillis, 2013; Penman 等, 2020)

乌雷反应 (Urey Reaction)

- 大陆地壳是地球上碳的主要储存库
- 碳循环是稳定地球气候的关键

酸雨溶解钙硅酸盐沉积物从而固定碳为碳酸钙

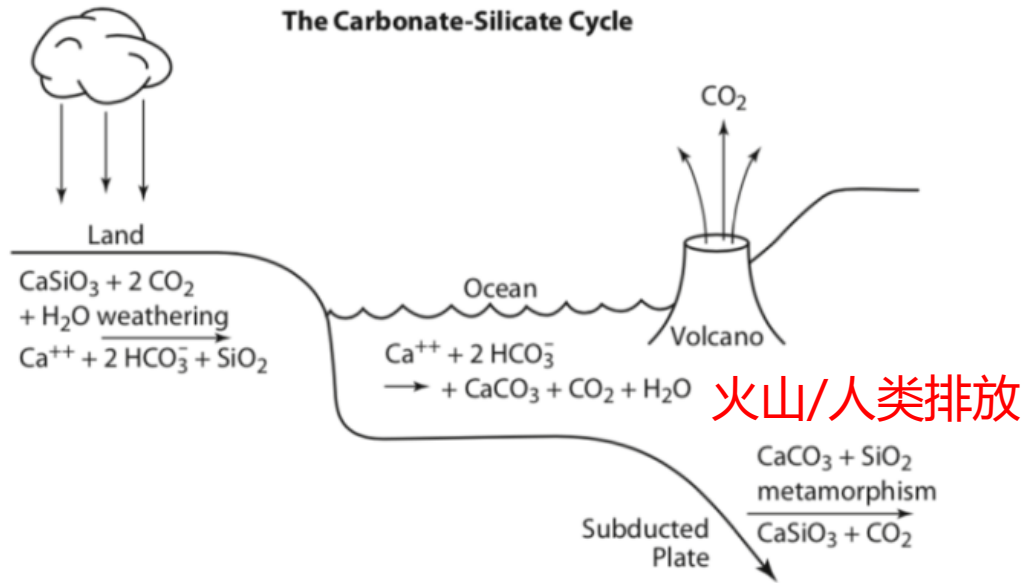
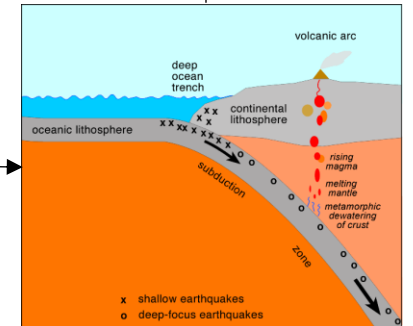
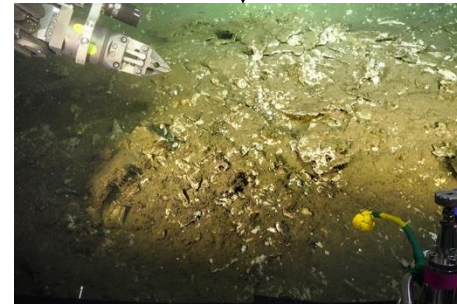
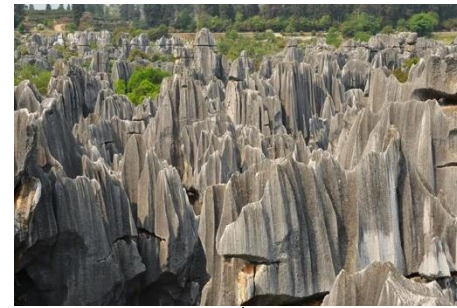
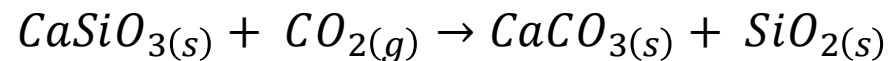


Figure 3.5 Diagram illustrating the carbonate-silicate cycle.



Premise Concept Explanation

双稳态 (Bistability)

多稳定性 (Multistability) :

相同外部条件下，一个系统可存在多个稳定的平衡状态。由不同的吸引子 (attractors) 表示，系统可以在这些吸引子之间进行跃迁，通常是由外部扰动或内部反馈机制驱动

阈值： 阈值可以标志不同平衡之间的边界，因此跨越阈值可能会导致系统的显著变化

还可以标志不同系统动力学之间的过渡，由一组不同的微分方程控制（也称为分岔），通常伴随着显著变化

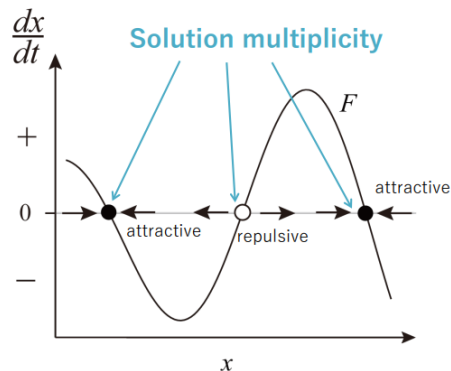
Solution multiplicity 解の多重性

Q. How many steady-state solutions are there ?

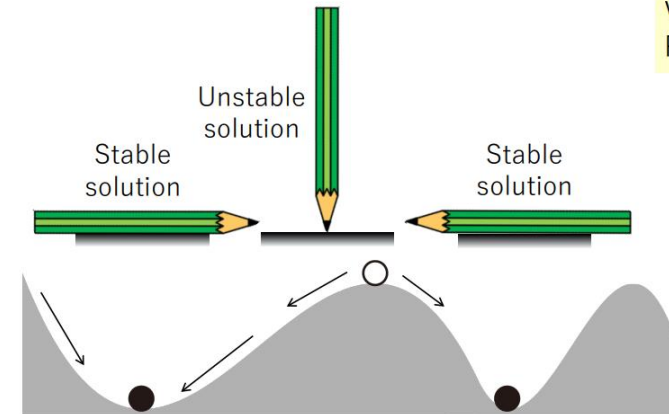
Q. Are those steady state solutions stable?

Systems with strong nonlinearities often have multiple solutions with the same boundary conditions.
強い非線形性を含むシステムでは、しばしば同じ境界条件で複数の状態（解）をもつことがある

- Early theoretical work can be found in oceanography in the 1960s. It was also recognized in climatology and ecology by the late 1960s.



Stability of the system

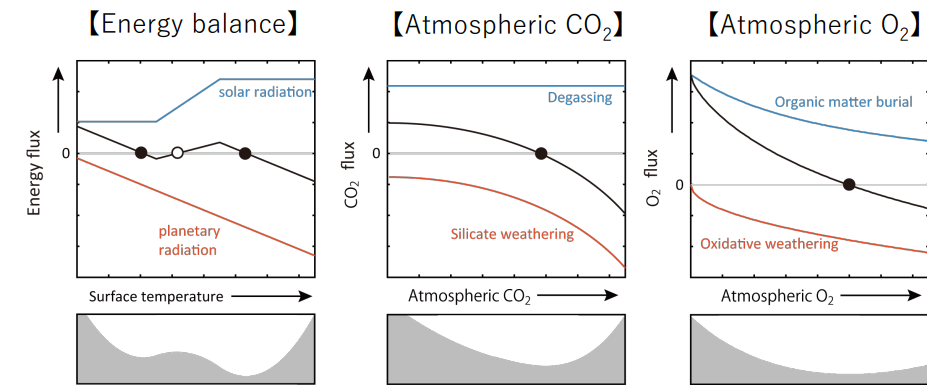


Valleys of potential = stable
Peaks of potential = unstable

The slightest disturbance to an unstable solution pushes the state of the system toward a new stable equilibrium (if one exists).

The locally stable steady state is unaffected by small perturbations, but larger perturbations carry the reservoir to another stable steady state.

Dynamic equilibrium & Earth's habitability



- ✓ Dynamic equilibrium is at the heart for considering the regulation mechanism of the Earth system.
- ✓ Understanding what dependencies exist in the interactions (i.e., functional relationship of energy flow and material cycles) is critical.

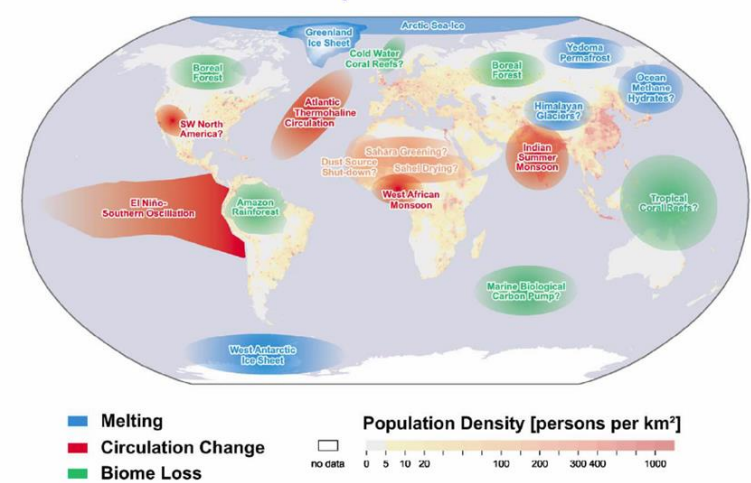
Premise Concept Explanation

多稳态 (Multistability)

行星气候例：地球的气候可在温暖状态和雪球状态之间转换，与冰-反照率反馈等正反馈机制密切相关
Lenton 等 [2008] 召集了一个国际科学家团队，对潜在政策相关的“临界要素”进行评估

临界元素	系统变化方向	控制参数 ρ	临界值 ρ_{crit}	全球变暖范围	转变时间尺度 T	主要影响
北极夏季海冰	面积范围 (减少)	局地 ΔT 空气, 海洋热传输	未明确	+0.5–2°C	≈10年 (快速)	加速变暖, 生态系统变化
格陵兰冰盖 (GIS)	冰体积 (减少)	局地 ΔT 空气	≈+3°C	+1–2°C	>300年 (缓慢)	海平面上升 +2–7 米
西南极冰盖 (WAIS)	冰体积 (减少)	局地 ΔT 空气, 或较小 ΔT 海洋	≈+5–8°C	+3–5°C	>300年 (缓慢)	海平面上升 +5 米
大西洋热盐环流 (THC)	翻转流 (减少)	北大西洋淡水输入	+0.1–0.5 Sv	+3–5°C	≈100年 (渐进)	区域变冷, 海平面, 热带辐合带位移
厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)	振幅 (增加)	热跃层深度, 东赤道太平洋锋面	未明确	+3–6°C	≈100年 (渐进)	东南亚及其他地区干旱
印度夏季季风 (ISM)	降雨量 (减少)	印度地区行星反照率	0.5	不可用	≈1年 (快速)	干旱, 承载能力下降
撒哈拉/萨赫勒与西非季风 (WAM)	植被覆盖率 (增加)	降水量	100 mm/年	+3–5°C	≈10年 (快速)	承载能力增加
亚马逊雨林	树木覆盖率 (减少)	降水量, 旱季长度	1,100 mm/年	+3–4°C	≈50年 (渐进)	生物多样性丧失, 降水减少
北方针叶林	树木覆盖率 (减少)	局地 ΔT 空气	≈+7°C	+3–5°C	≈50年 (渐进)	生态群落转换

Updated Map of Tipping Elements in the Earth System



Hans Schellnhuber after T. Lenton

Introduction

CO₂的双重性: •普通浓度: 作为净温室气体起到温控器的作用 •**足够高的浓度**: 冷却, 碳循环转变为不稳定的正反馈

高浓度状态下两种气候态: 1.高日照条件: 高温超临界的类金星大气

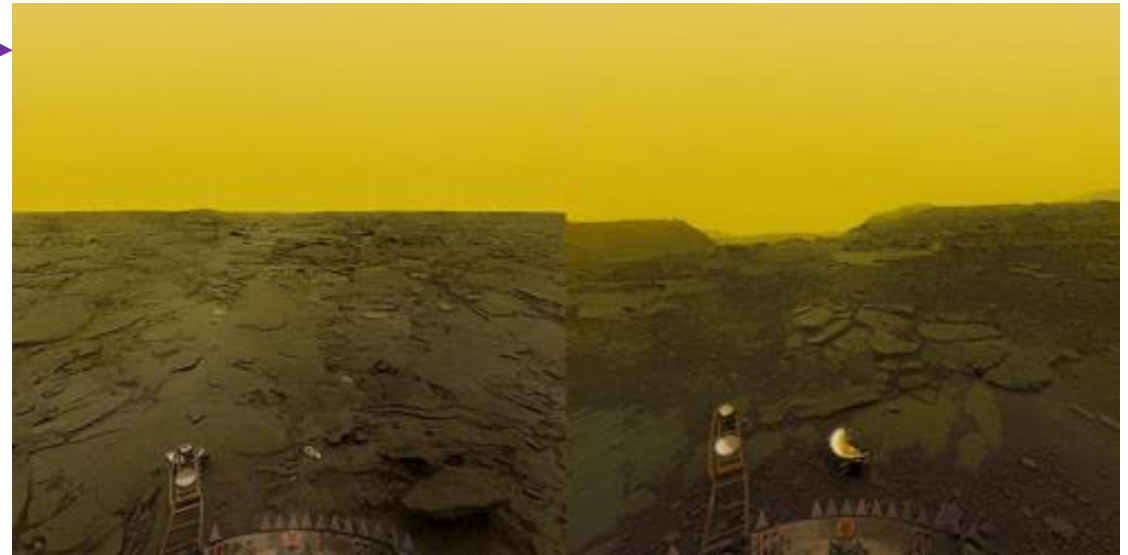
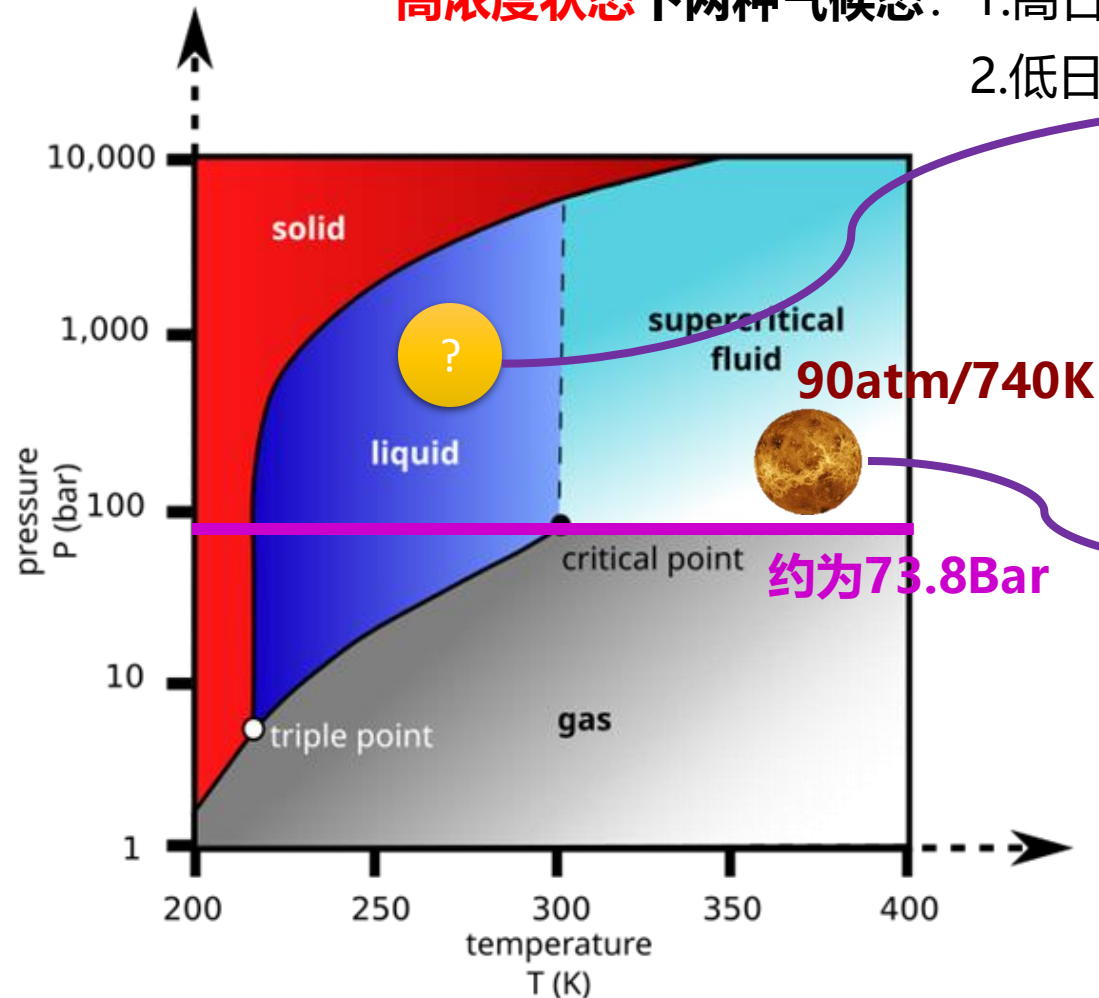
2.低日照条件: 液态 CO₂ 冷凝与液态水海洋共存的亚临界大气

即使表面温和 (可以达到0-30°C人类生活温度), 但 CO₂可以冷凝, 与地球不同, 观测上也可能难区别。

潜在的多样化气候态:

太阳系内类地行星比太阳&星际介质的碳含量明显贫乏

挥发性物质在金属与熔体间分配会重塑其在行星内部各系统间分布



金星14号-苏联-1981年

Method

辐射传输: Socrates代码:求解包含散射的平面平行两流近似辐射传输方程、不透明系数取自 HITRAN 数据库

CO2 和 N2 的瑞利散射截面根据 Vardavas 和 Carver (1984) 计算:

$$\sigma_{R,i} = 0.2756 \cdot \mu_i \cdot \frac{6 + 3\Delta}{\lambda^4 (6 - 7\Delta)} \left[A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2} \right) \right]^2$$

$\sigma_{(r,i)}$: 瑞利散射截面 ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) μ_i : 物种 i 的摩尔质量 ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)
 λ : 波长 (μm) **A** 和 **B**: 散射系数 (Cox, 2015) Δ : 退偏因子

H2O使用简单的 $\lambda-4$ 缩放计算使用简单的 $\lambda-4$ 缩放计算 (因为无A和B):

$$\sigma_{R,\text{H}_2\text{O}} = \sigma_{R,0} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4$$

$\sigma_{(r,0)} = 9.32 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ (Pierrehumbert, 2010)
 $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$

总瑞利散射截面加权各物种的体积混合比来求和:

$$\sigma_{R,\text{tot}} = \sum_i x_i \sigma_{R,i}$$

x_i 表示物种 i 的体积混合比 ($\sum x_i = 1$)。
socrates不支持垂直变化的瑞利散射系数, 使用表面混合比计算总散射截面

拟绝热线公式 (Graham 等, 2021) 计算不同大气组成和表面条件下的温压剖面:

$$\frac{dT}{dp} = -\frac{g}{c_p} \left(1 + \frac{L \cdot q}{R \cdot T} \right)$$

分子	A ($\times 10^{-6}$)	B ($\times 10^{-3}$)	Δ	$\sigma_0 (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$
CO ₂	4.39	6.4	0.0805	—
N ₂	2.906	7.7	0.0305	—
H ₂ O	—	—	—	9.32

维持全球平均能量平衡所需的入射辐射: 维持全球平均能量平衡所需的入射辐射:

$$S = \frac{F_{\text{out}}}{1 - \alpha}$$

Method

恒星光谱:太阳光谱辐照度 (G2V)

AD Leonis(M3.5V)

Sigma Boötis(F2V)

测试气候行为如何依赖于恒星
类型与年龄

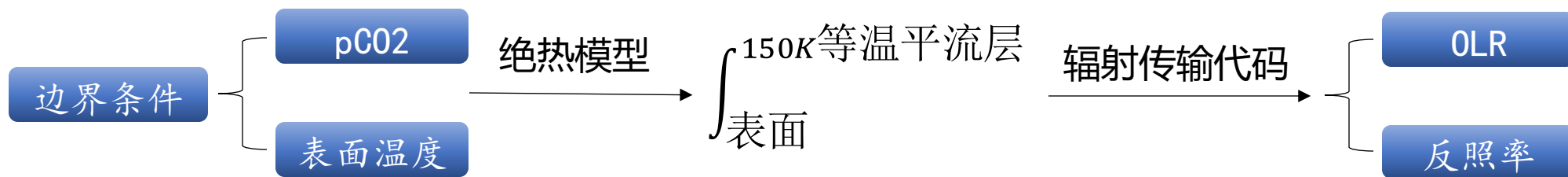
太阳光谱 (4.5亿年前和3.8亿年前) - 和现代情况几乎没有差异

恒星类型	温度范围 (K)	颜色	光谱特征	宜居带位置	代表恒星
G2V	5,300–6,000	黄色	稳定光谱	适中	太阳
M3.5V	2,400–3,700	红色	低温、红外辐射	非常靠近	比邻星
F2V	6,000–7,500	白黄色	高温、强紫外辐射	较远	北落师门

假设所有冷凝物在冷凝时会立即降水、**假设**在本文讨论的主要模拟集中 H2O 饱和 (H2O saturation in the main set of simulations)

大气假定为等温平流层 (敏感性较低) , Tstrat=150K

逆向气候建模: 不从恒星辐射&大气条件出发, 向下逐层推表面的温压分布, 而**反向操作**, 从已知的表面温度和大气条件出发, 推导出所需的辐射平衡条件



计算维持全球平均能量平衡 (入射辐射与向外辐射相等) 所需的日照量:

$$(1 - \alpha(T, pCO_2)) \cdot \frac{S}{4} = F_{out}(T, pCO_2)$$

1 到 73 bar 的 pCO2 水平 (1 bar 步长) 从 250 到 365 K 的表面温度 (5 K 步长) 进行逆向气候计算网格

$$S_{eff}(T, pCO_2) = \frac{S}{S_{Earth}} = \frac{4F_{out}(T, pCO_2)}{S_{Earth}(1 - \alpha(T, pCO_2))}$$

Method

碳循环:理想化的全球平均风化公式 **W** (Graham & Pierrehumbert, 2020)

$$W = \gamma \frac{\alpha}{\left(\frac{1}{k_{\text{eff}}} + m A t_s + \frac{\alpha}{q C_{\text{eq}}} \right)}$$

W: 全球平均风化通量, 单位为 $\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$, 从陆地或海底输送到海洋并与碳反应形成碳酸盐矿物的二价阳离子数量

γ : 可风化的行星表面比例

α : 描述了风化带的特性, 如水流(length scale)、孔隙率、矿物质量与流体体积的比率, 以及可风化矿物的质量分数

k_{eff} : 有效动力学风化速率, 单位为 $\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$, 表示没有与粘土沉淀发生化学平衡时风化速率

m : 被风化矿物的平均摩尔质量, 单位为 kg mol^{-1}

A : 被风化矿物的平均比表面积, 单位为 m^2kg^{-1}

t_s : 被风化材料的平均年龄, 单位为 yr

q : 全球平均水通量, 单位为 m yr^{-1} , 给出如下关系:

$$q = q_{\text{ref}} \left(1 + \varepsilon (T_{\text{surf}} - T_{\text{surf,ref}}) \right)$$

q_{ref} 为参考水通量, ε 表温度依赖系数, T_{surf} 和 $T_{\text{surf,ref}}$ 是当前和参考的地表温度

C_{eq} : 水在风化带与矿物溶解达到化学平衡时的二价阳离子最大浓度, 给出如下关系:

$$C_{\text{eq}} = A (p\text{CO}_2)^n \quad A \text{ 和 } n \text{ 是常数, } p\text{CO}_2 \text{ 表示二氧化碳分压}$$

参数	单位	定义	默认值
γ	—	陆地比例	0.3
a_g	—	地表反照率	0.0
R_{planet}	m	行星半径	6.37×10^6
T_{ref}	K	参考全球平均温度	288
$p\text{CO}_2, \text{ref}$	bar	参考 CO_2 分压	280×10^{-6}
q_{ref}	m yr^{-1}	现代全球平均径流	0.20
δ	1/K	温度变化每 K 导致降水的分数变化	0.03
V_{ref}	mol yr^{-1}	现代全球 CO_2 释放通量	7.5×10^{12}
v	$\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	每单位行星表面积的现代 CO_2 释放	0.0147
Λ	—	C_{eq} 的热力学系数	1.4×10^{-3}
n	—	热力学 CO_2 分压依赖	0.316
α^*	—	$L\phi_{\text{st}}AX_r\mu$	3.39×10^5
$k_{\text{eff,ref}}^*$	$\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$	参考反应速率常数	8.7×10^{-6}
β	—	动力学风化 CO_2 分压依赖	0.2
T_e	K	动力学风化温度依赖	11.1

火山等源头的 CO_2 释放通量 **V**, 由于负反馈调节使得总体上**V=W** (但也非必然, 异常的构造状态? 特殊气候? 陆地分布?)

对于低光照行星, 我们要注意到**另外一个重要的汇!**

CO_2 冷凝条件下, 即使释放速率 $\neq$ 风化速率, 仍可以达到平衡:

$$F_{\text{cond}} = V - W$$

F_{cond} (摩尔·m⁻²·年⁻¹) 是从大气中冷凝到表面的 CO_2 的通量

Results

冰-反照率反馈导致的气候滞后现象 (Abbot et al., 2018)

反馈机制:

- 冰层高反照率使更多的太阳辐射被反射回太空，导致地表温度进一步下降，形成正反馈效应
- 冰层融化，海洋或陆地具有较低的反照率，吸收更多太阳能，温度进一步上升

滞后特性:

恒星辐射通量需要显著增加才能将行星从雪球状态解冻回温暖状态，反之亦然

关键表现:

1. 存在“温暖-雪球”和“雪球-温暖”两种不同的过渡阈值
2. 即使恒星辐射或温室气体浓度回到先前的温暖状态，行星可能仍然停留在雪球状态，而不会立即恢复到温暖状态。

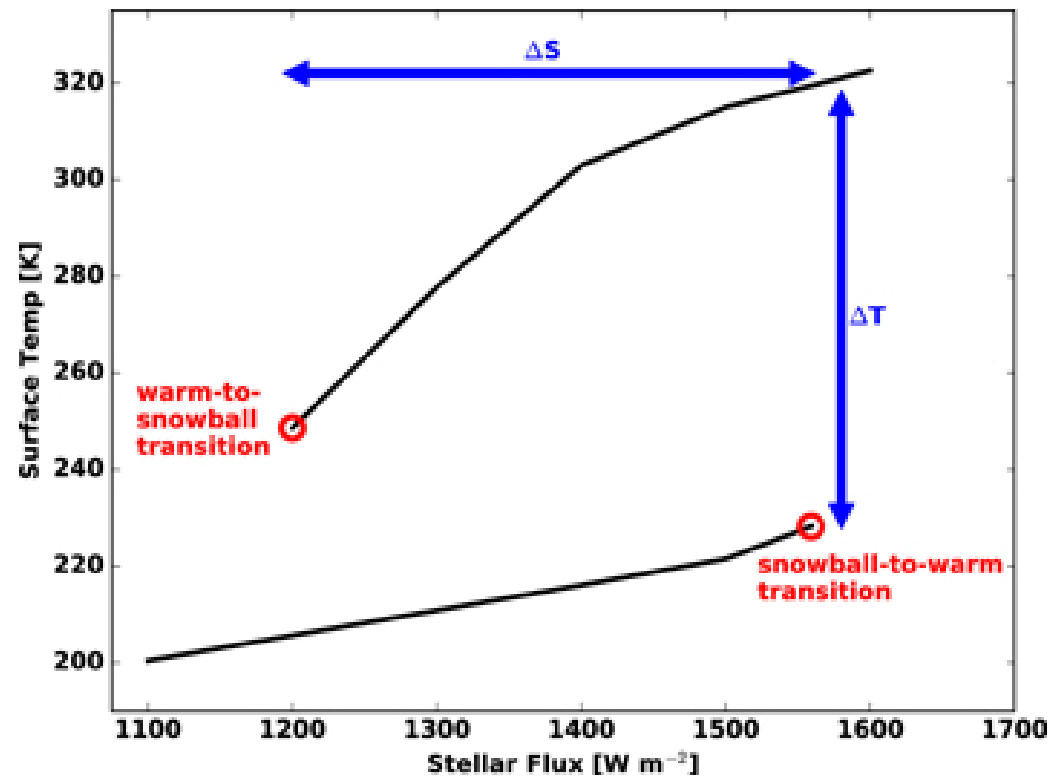
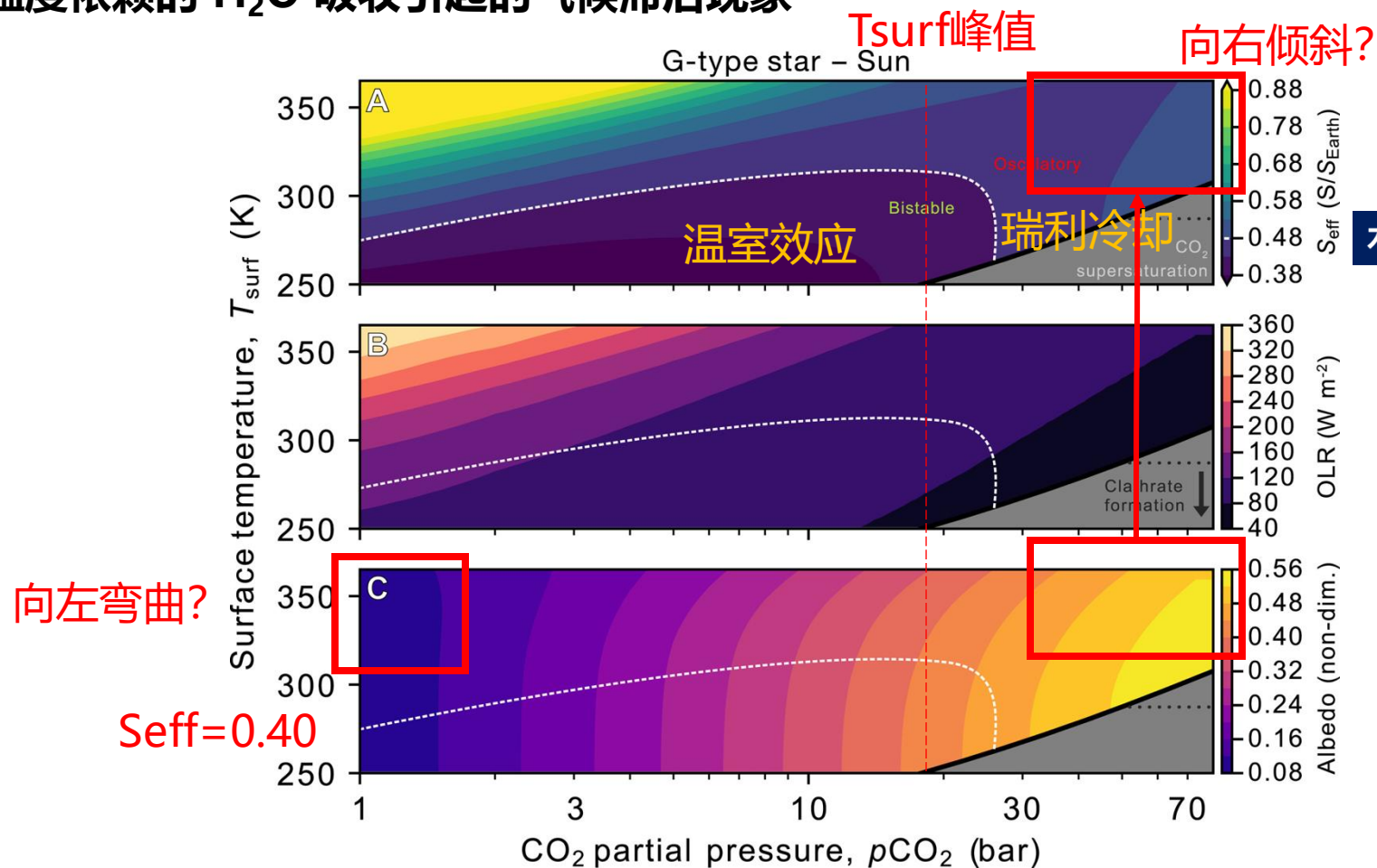


图 1。理想快速旋转行星（黑线）的闭式滞后回线图描绘了可允许的 global 平均表面温度状态与恒星通量的关系系统中的两个分叉用红色圆圈表示，分别为“暖态到雪球态转变”和“雪球态到暖态转变”
行星处于双稳态的恒星通量范围 (ΔS)
雪球到暖态转变相关的 global 平均表面温度增加 (ΔT) 用蓝色双箭头表示

Results

温度依赖的 H₂O 吸收引起的气候滞后现象



$$\text{Seff} \propto \text{OLR} + \text{ALBEDO}$$

图A $\propto$ 图B + 图C

水 T-V 线图

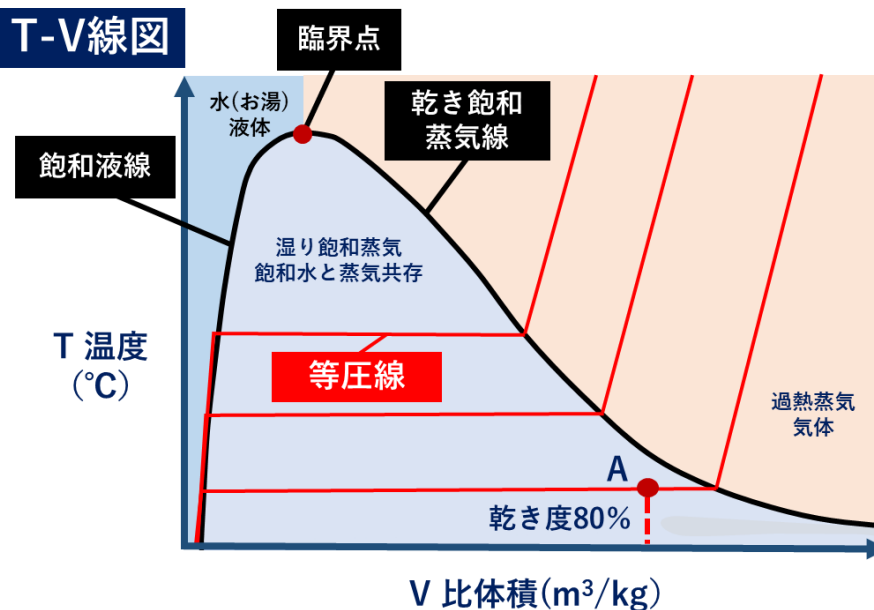


图 1: 表面温度 T_{surf} (y 轴) 与 CO₂ 分压 (x 轴) 下, 低日照类地行星气候的能量特性。

黑色实线: CO₂ 饱和蒸气压曲线, 灰色区域: CO₂ 高于饱和蒸气压处于过饱和状态,

白色虚线: 分隔 CO₂ 双稳态气候与可能在冷凝和非冷凝状态间循环的气候的 Seff 近似等值线, 黑色虚线: CO₂ 可能稳定的温度下限

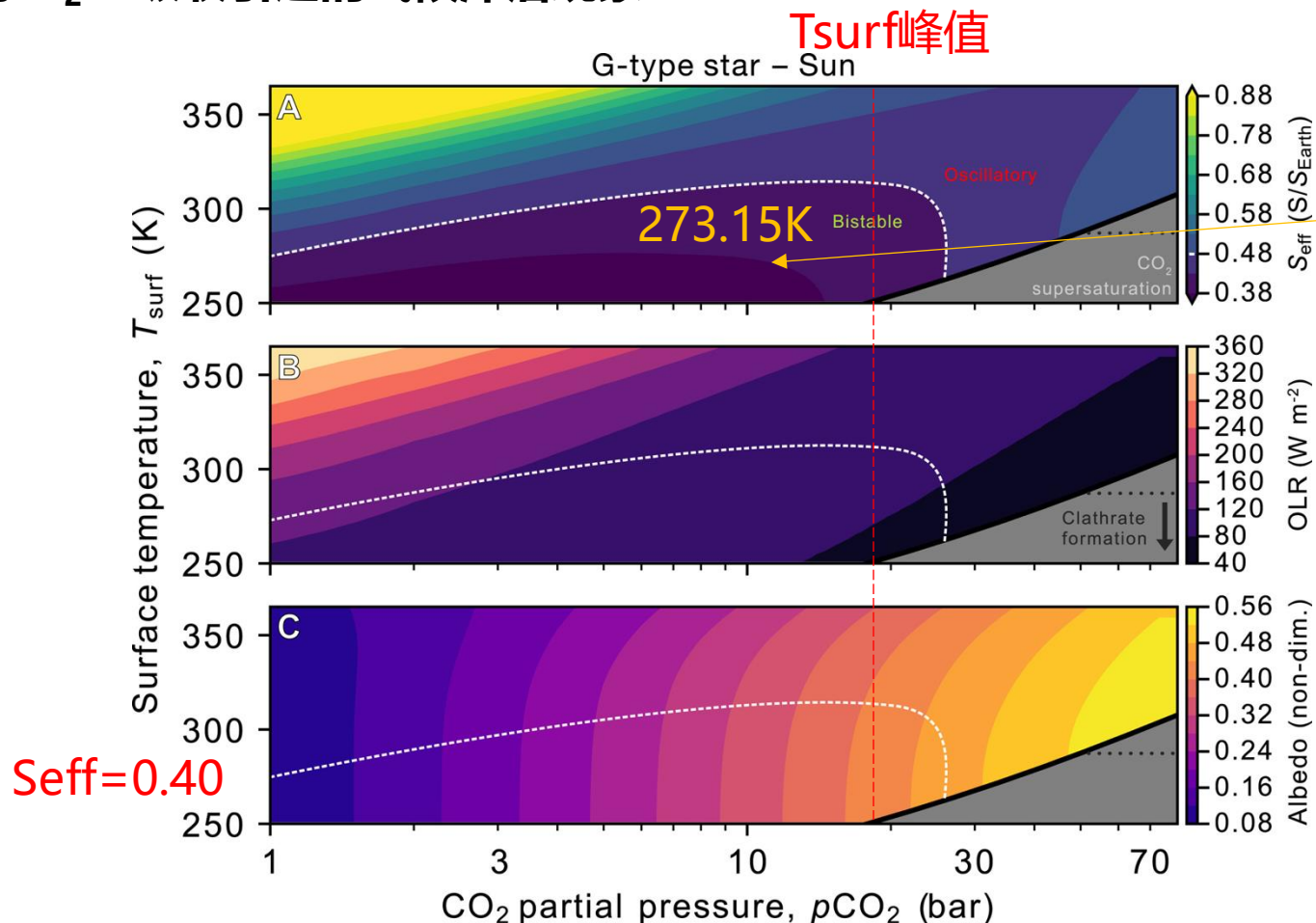
a: 等值线表示维持特定表面温度和 CO₂ 分压的所需大气顶恒星辐射, 归一化为地球接收的入射辐射 ($S/S_{\text{Earth}} = \text{Seff}$)

b: 展示全球平均出射长波辐射 (OLR)

c: 展示全球平均行星反照率

Results

温度依赖的 H_2O 吸收引起的气候滞后现象



该曲线特征用来定义HZ外缘
1 bar N_2 饱和 H_2O 大气，全球平均表面温度
高于冰点 (273.15 K)

该“最大温室限制”对应液态水宜居带的
外缘被放置在 1.67 天文单位
即 $\text{Seff}=0.359$ ，与 Kopparapu et al.
(2013) $\text{Seff}=0.373$ 接近

差异原因：我们模拟缺少 N_2

图 1：表面温度 T_{surf} (y 轴) 与 CO_2 分压 (x 轴) 下，低日照类地行星气候的能量特性。

黑色实线： CO_2 饱和蒸气压曲线，灰色区域： CO_2 高于饱和蒸气压处于过饱和状态，

白色虚线：分隔 CO_2 双稳态气候与可能在冷凝和非冷凝状态间循环的气候的 Seff 近似等值线，黑色虚线： CO_2 可能稳定的温度下限

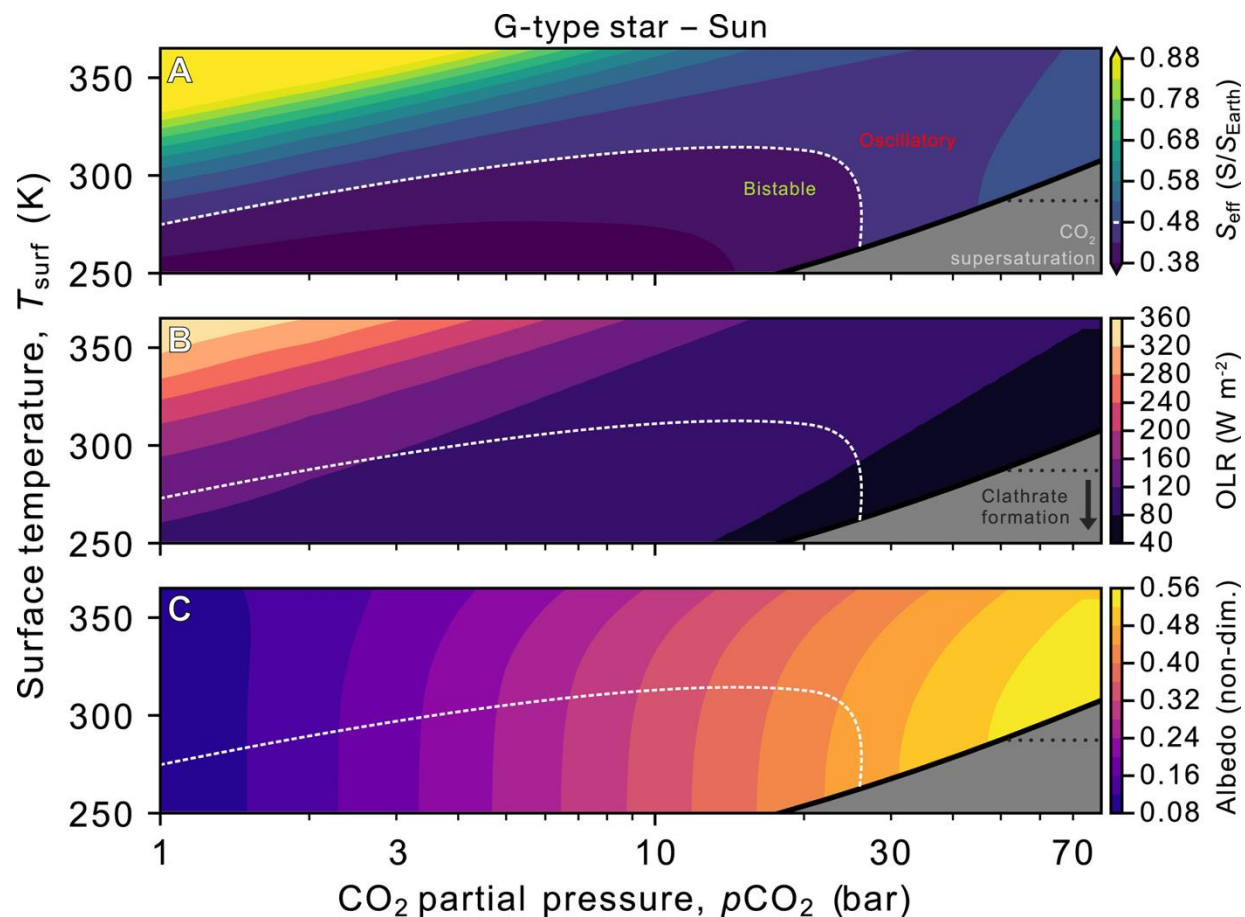
a：等值线表示维持特定表面温度和 CO_2 分压的所需大气顶恒星辐射，归一化为地球接收的入射辐射 ($S/S_{\text{Earth}}=\text{Seff}$)

b：展示全球平均出射长波辐射 (OLR)

c：展示全球平均行星反照率

Results

温度依赖的 H₂O 吸收引起的气候滞后现象



H₂O 短波和近红外辐射吸收影响行星反照率

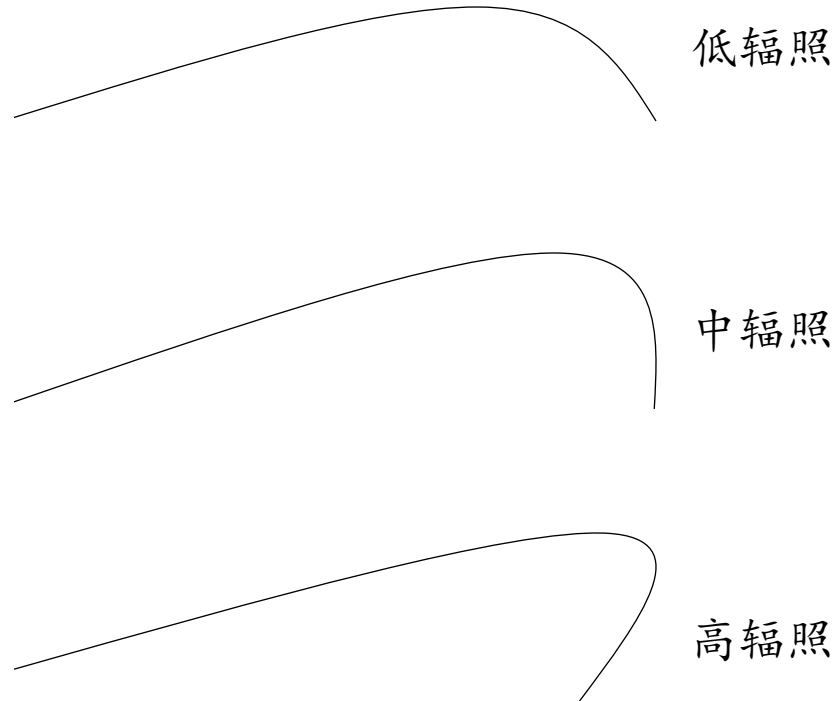


图 1: 表面温度 T_{surf} (y 轴) 与 CO₂ 分压 (x 轴) 下, 低日照类地行星气候的能量特性。

黑色实线: CO₂ 饱和蒸气压曲线, 灰色区域: CO₂ 高于饱和蒸气压处于过饱和状态,

白色虚线: 分隔 CO₂ 双稳态气候与可能在冷凝和非冷凝状态间循环的气候的 S_{eff} 近似等值线, 黑色虚线: CO₂ 可能稳定的温度下限

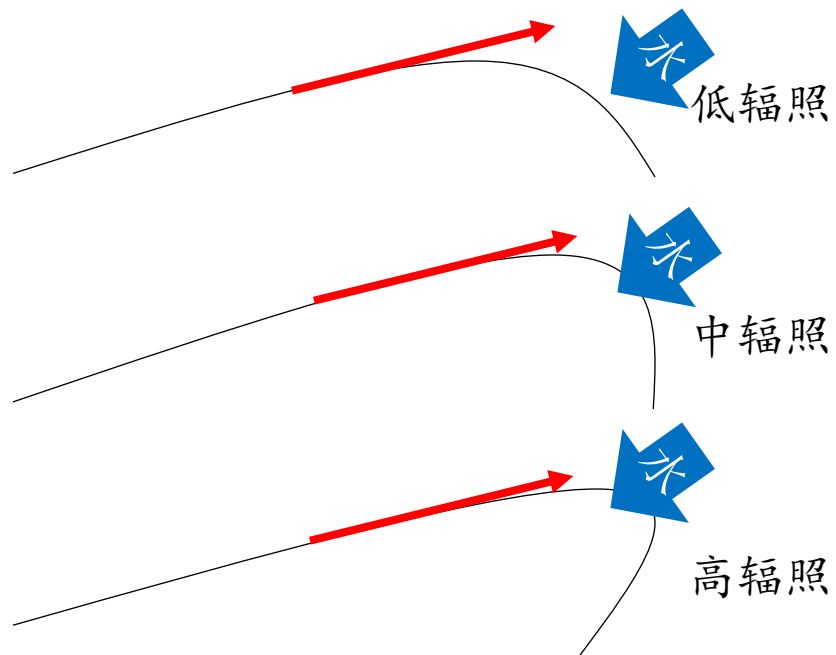
a: 等值线表示维持特定表面温度和 CO₂ 分压的所需大气顶恒星辐射, 归一化为地球接收的入射辐射 ($S/S_{\text{Earth}}=S_{\text{eff}}$)

b: 展示全球平均出射长波辐射 (OLR)

c: 展示全球平均行星反照率

Results

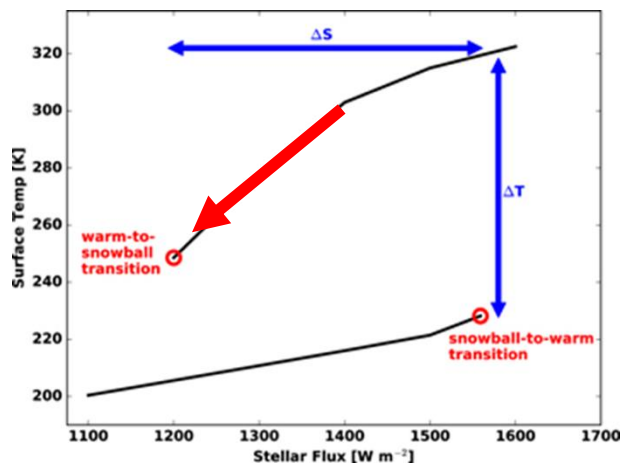
温度依赖的 H_2O 吸收引起的气候滞后现象



• **冰-反照率反馈**: 温度 $\downarrow$ $\rightarrow$ 表面冰 $\uparrow$ $\rightarrow$ 反照率 $\uparrow$ $\rightarrow$ 吸收太阳辐射 $\downarrow$ $\rightarrow$ 温度进一步 $\downarrow$

• **H_2O 的温度依赖吸收反馈**: 温度 $\uparrow$ $\rightarrow$ 水汽浓度 $\uparrow$ $\rightarrow$ 入射辐射吸收 $\uparrow$ (反照率 $\downarrow$) $\rightarrow$ 温度 $\uparrow$

省流: 本来该解冻却没解冻vs本来该温度下降却没下降



Results

温带系外行星上的 CO₂ 海洋振荡 **关键点:** H₂O 的温度依赖吸收造成向右歪的结构

$$S_{\text{eff}} \propto \text{OLR} + \text{ALBEDO}$$

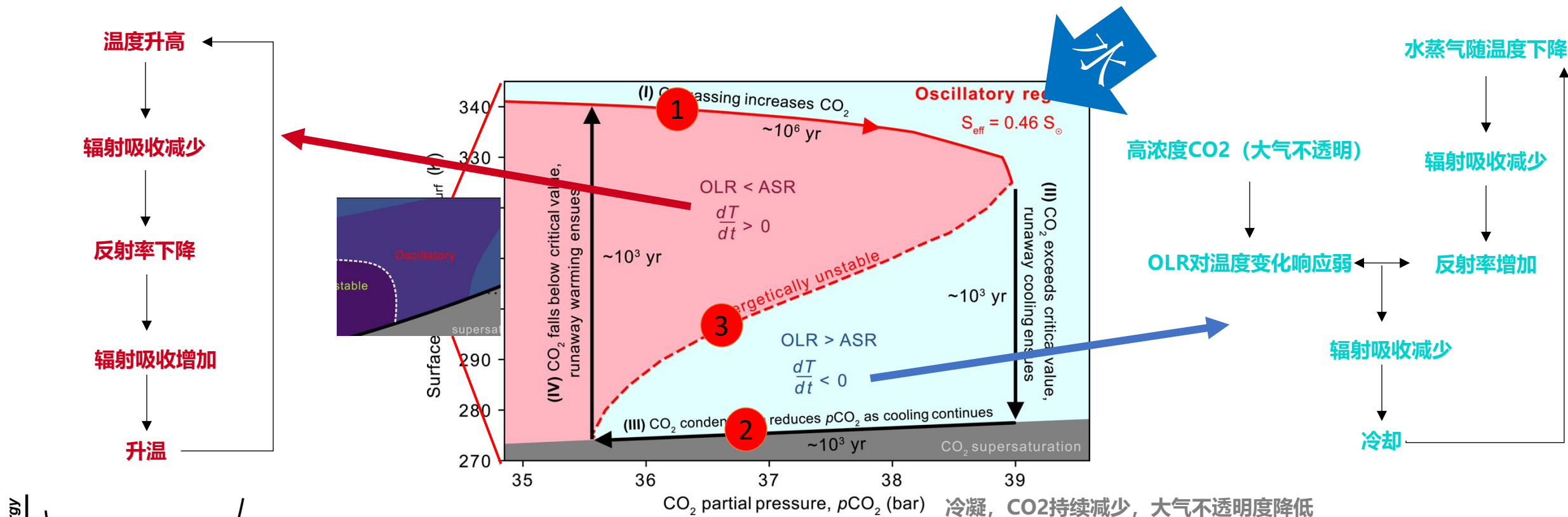


图 2: 由 CO₂ 喷发、瑞利散射、水的温度依赖性近红外吸收及表面 CO₂ 冷凝驱动的气候极限循环

步骤 (I): CO₂ 的喷发导致大气中 CO₂ 积累

步骤 (II): 当 $p\text{CO}_2$ 超过触发正反馈的阈值时, 表面温度下降并导致行星反照率增加, 进一步加剧冷却

步骤 (III): 行星表面温度足够低, 触发 CO₂ 冷凝, 导致大气中 CO₂ 含量迅速下降, 反照率随之降低, 吸收的恒星辐射增加

步骤 (IV): 温度升高引起水蒸气积累, 导致反照率减少, 形成失控变暖的正反馈, 最终恢复到稳定状态

Results

CO₂ 循环的双稳态及气候反馈机制-纳入风化反馈后 假设CO₂喷发速率 $15.8 \times 10^{12} \text{ mol/yr}$ (地球两倍)

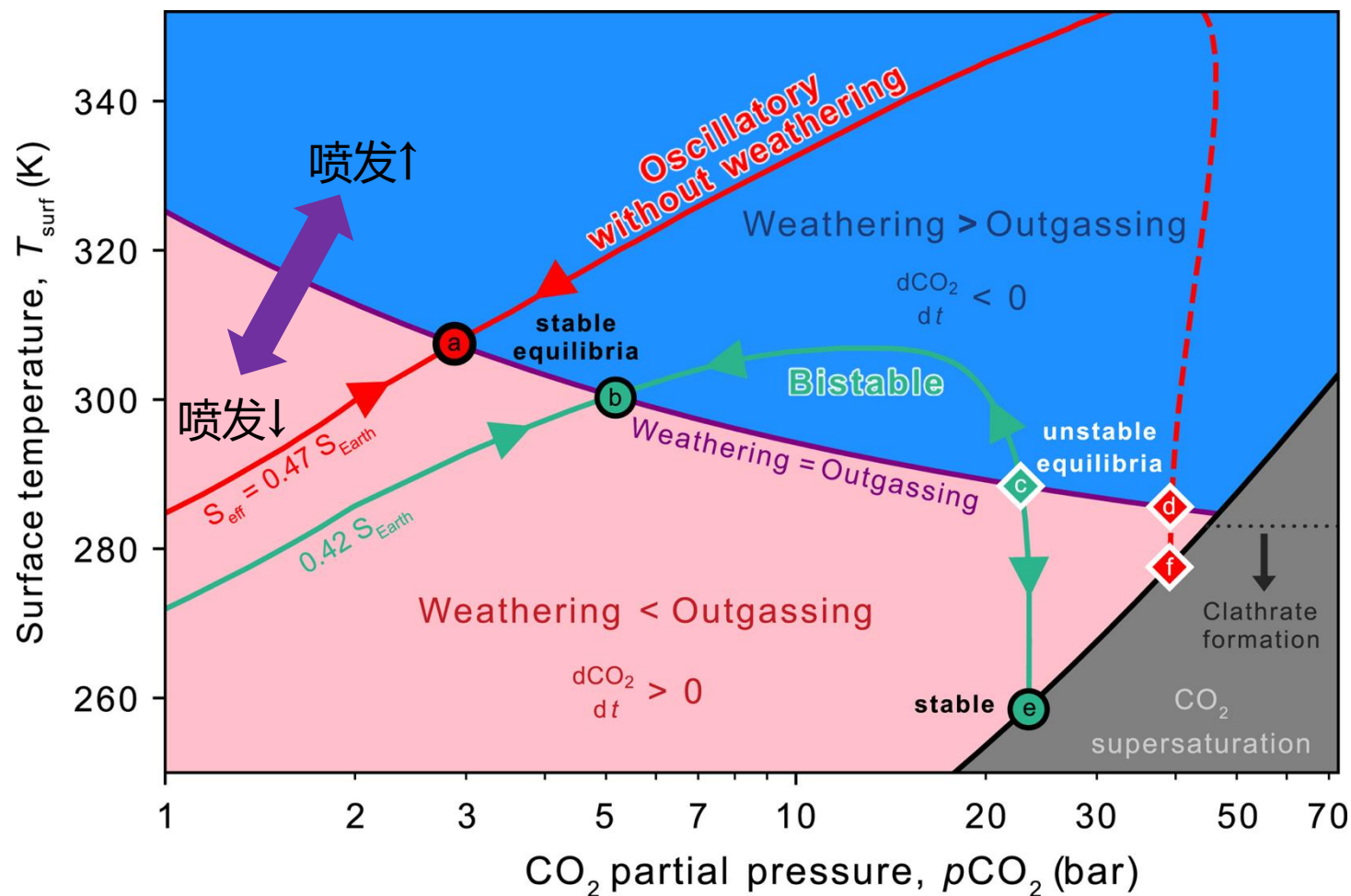


图 3: 在不同入射辐射条件下的稳定 (黑色圆点: a, b, e) 与不稳定 (白色菱形: c, d, f) 气候平衡态比较。

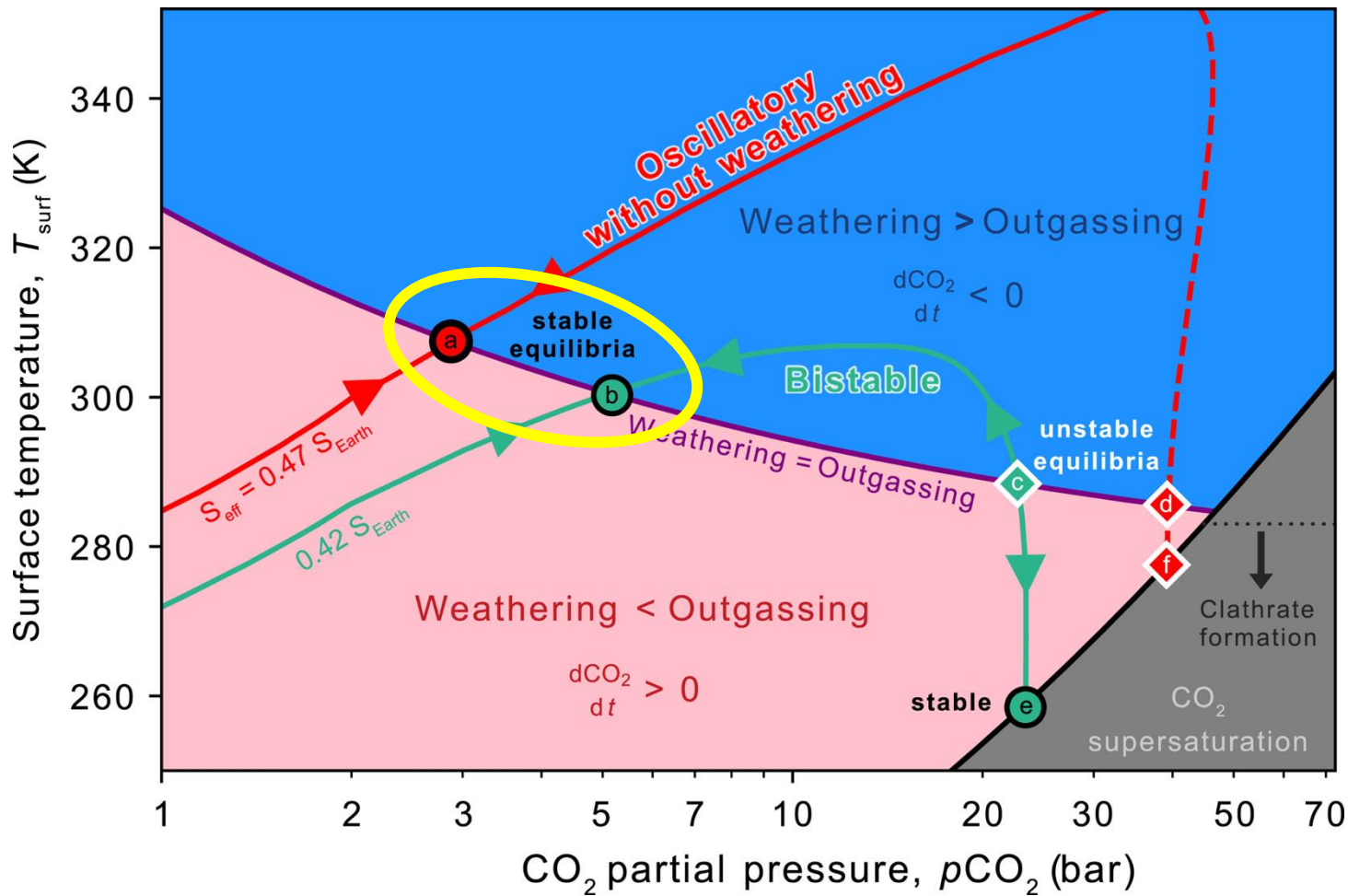
红色线代表 $S_{\text{eff}}=0.47 S_{\text{Earth}}$ 的气候状态, 其中实线部分表示能量稳定的气候, 虚线部分表示能量不稳定的气候

绿色线代表 $S_{\text{eff}}=0.42 S_{\text{Earth}}$ 的气候状态, 存在地球状气候和 CO₂ 冷凝状态的双稳态可能性

紫色线表示风化速率等于喷发速率的位置, 紫色线下方的浅红区域表示喷发超过风化 ($V>W$), 紫色线上方的浅蓝区域表示风化超过喷发 ($W>V$)

Results

CO₂ 循环的双稳态及气候反馈机制-纳入风化反馈后 假设CO₂喷发速率 $15.8 \times 10^{12} \text{ mol/yr}$ (地球两倍)



a、b点：温暖低CO2气候平衡态

能量与碳通量是稳定的

附近受到扰动会恢复到该平衡态

风化模型中通常讨论的情形

图 3: 在不同入射辐射条件下的稳定 (黑色圆点: a, b, e) 与不稳定 (白色菱形: c, d, f) 气候平衡态比较。

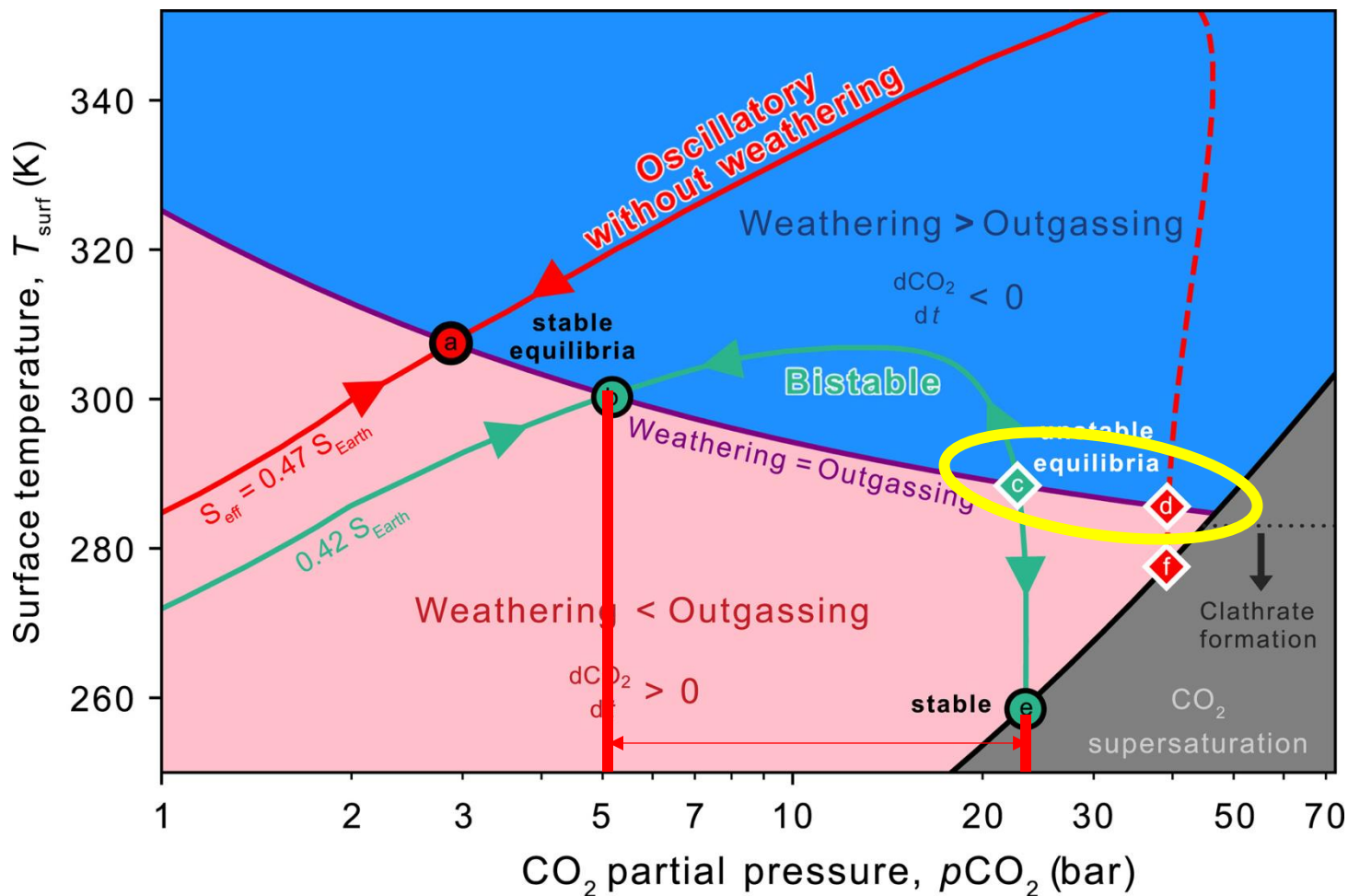
红色线代表 $S_{\text{eff}}=0.47S_{\text{Earth}}$ 的气候状态，其中实线部分表示能量稳定的气候，虚线部分表示能量不稳定的气候

绿色线代表 $S_{\text{eff}}=0.42S_{\text{Earth}}$ 的气候状态, 存在地球状气候和 CO_2 冷凝状态的双稳态可能性

紫色线表示风化速率等于喷发速率的位置, 紫色线下方的浅红区域表示喷发超过风化 ($V>W$), 紫色线上方的浅蓝区域表示风化超过喷发 ($W>V$)

Results

CO₂ 循环的双稳态及气候反馈机制-纳入风化反馈后 假设CO₂喷发速率 $15.8 \times 10^{12} \text{ mol/yr}$ (地球两倍)



c、d点：虽然平衡但不稳定

$p\text{CO}_2$ 向左扰动：瑞利散射减少、温度上升，CO₂继续减少，

向左滑到a、b

$p\text{CO}_2$ 向右扰动：温度降低、喷发超过风化，CO₂继续增多

向右滑到e、f

双稳态：相差一个数量级

图 3：在不同入射辐射条件下的稳定（黑色圆点：a, b, e）与不稳定（白色菱形：c, d, f）气候平衡态比较。

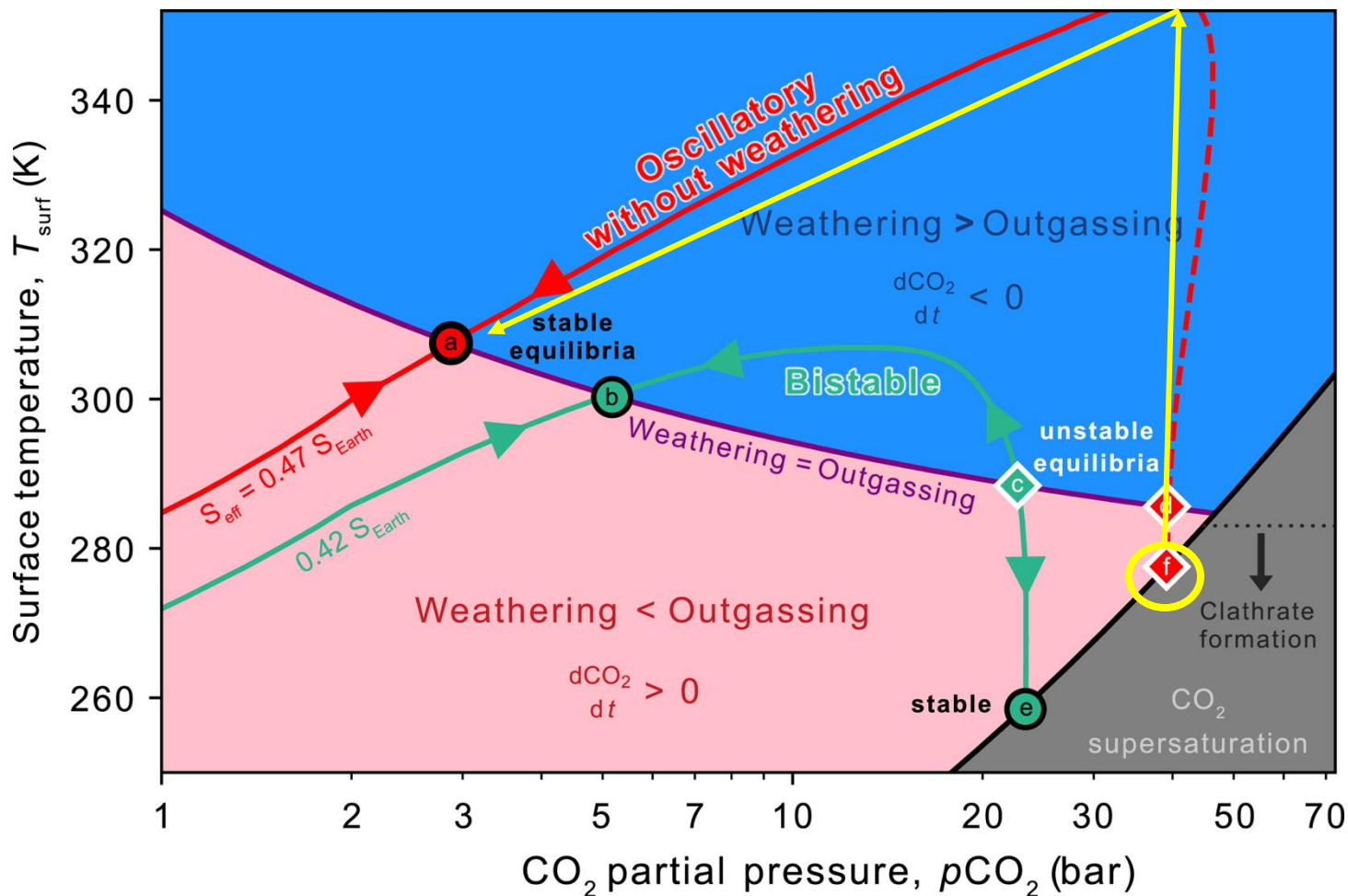
红色线代表 $S_{\text{eff}}=0.47S_{\text{Earth}}$ 的气候状态，其中实线部分表示能量稳定的气候，虚线部分表示能量不稳定的气候

绿色线代表 $S_{\text{eff}}=0.42S_{\text{Earth}}$ 的气候状态，存在地球状气候和 CO₂ 冷凝状态的双稳态可能性

紫色线表示风化速率等于喷发速率的位置，紫色线下方的浅红区域表示喷发超过风化 ($V>W$)，紫色线上方的浅蓝区域表示风化超过喷发 ($W>V$)

Results

CO₂ 循环的双稳态及气候反馈机制-纳入风化反馈后 假设CO₂喷发速率 $15.8 \times 10^{12} \text{ mol/yr}$ (地球两倍)



红线：前文讨论的CO₂海洋循环行星

F点：碳循环稳定、能量通量不稳定

微小扰动会导致其回到 $T_{\text{surf}} \approx 350\text{K}$

进一步由于风化回到a

图 3: 在不同入射辐射条件下的稳定 (黑色圆点: a, b, e) 与不稳定 (白色菱形: c, d, f) 气候平衡态比较。

红色线代表 $S_{\text{eff}} = 0.47 S_{\text{Earth}}$ 的气候状态, 其中实线部分表示能量稳定的气候, 虚线部分表示能量不稳定的气候

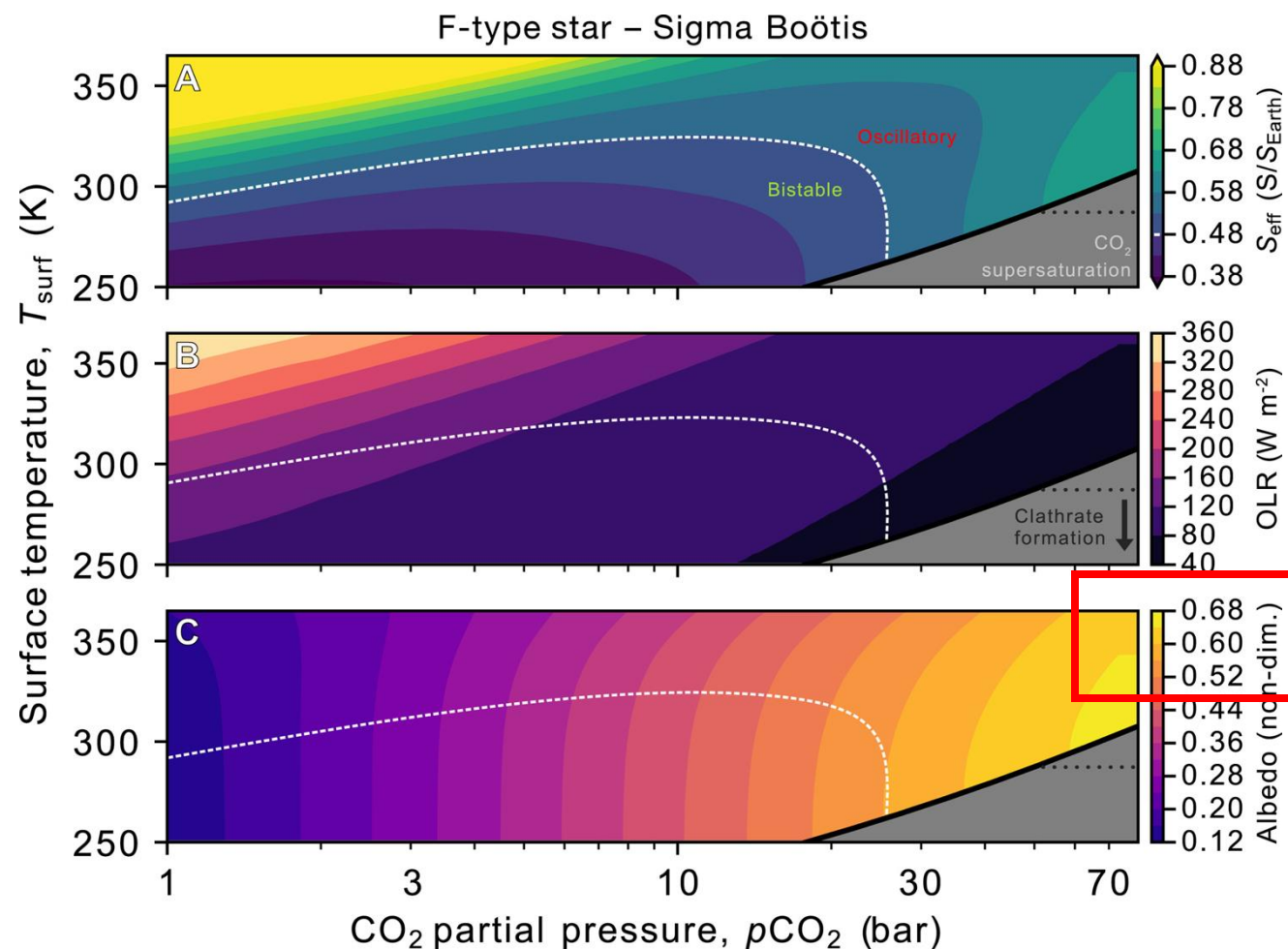
绿色线代表 $S_{\text{eff}} = 0.42 S_{\text{Earth}}$ 的气候状态, 存在地球状气候和 CO₂ 冷凝状态的双稳态可能性

紫色线表示风化速率等于喷发速率的位置, 紫色线下方的浅红区域表示喷发超过风化 ($V > W$), 紫色线上方的浅蓝区域表示风化超过喷发 ($W > V$)

Different Solar Type

F型恒星

对于CO₂更高敏感性
双稳态可以在更高入射辐射条件下维持（白线）



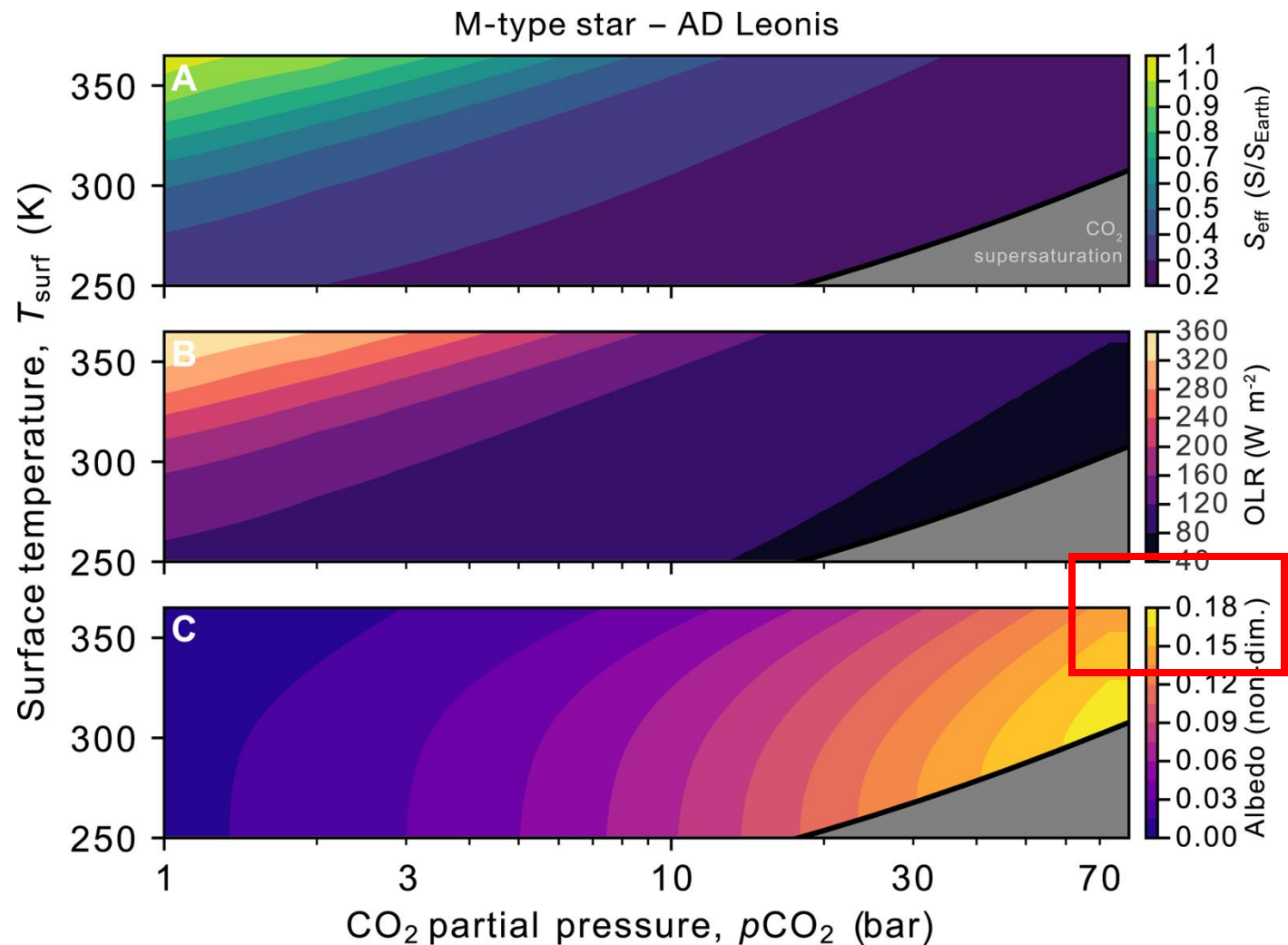
瑞利散射更为明显

图 4: Sigma Boötis (F2V 恒星) 光谱下的类地行星气候能量特性, 图中表面温度 T_{surf} (纵轴) 与 CO₂ 分压 $p\text{CO}_2$ (横轴) 相关。

Different Solar Type

M型恒星

较低频率辐射
完全不存在双稳态
类似地球的平稳状态



瑞利散射较弱

图 5: AD Leonis (M3.5V 恒星) 光谱下的类地行星气候能量特性, 图中表面温度 T_{surf} (纵轴) 与 CO₂ 分压 $p\text{CO}_2$ (横轴) 相关。

Discussion

关于CO₂与H₂O相态的讨论

低于282.91K的CO₂会形成水合物沉降到海底抑制海底硅酸盐风化

高于水合物四相点 (282.9K) 低于CO₂三相点 (304.5K)
液态CO₂和H₂O可以共存:

一般: CO₂浮在水面上

特殊: CO₂可压缩性强, 可能超过水密度
(足够深进入水体会沉入海底)
是否可以参与风化? 是否影响碳封存?

可能存在“分层蛋糕”式的海洋

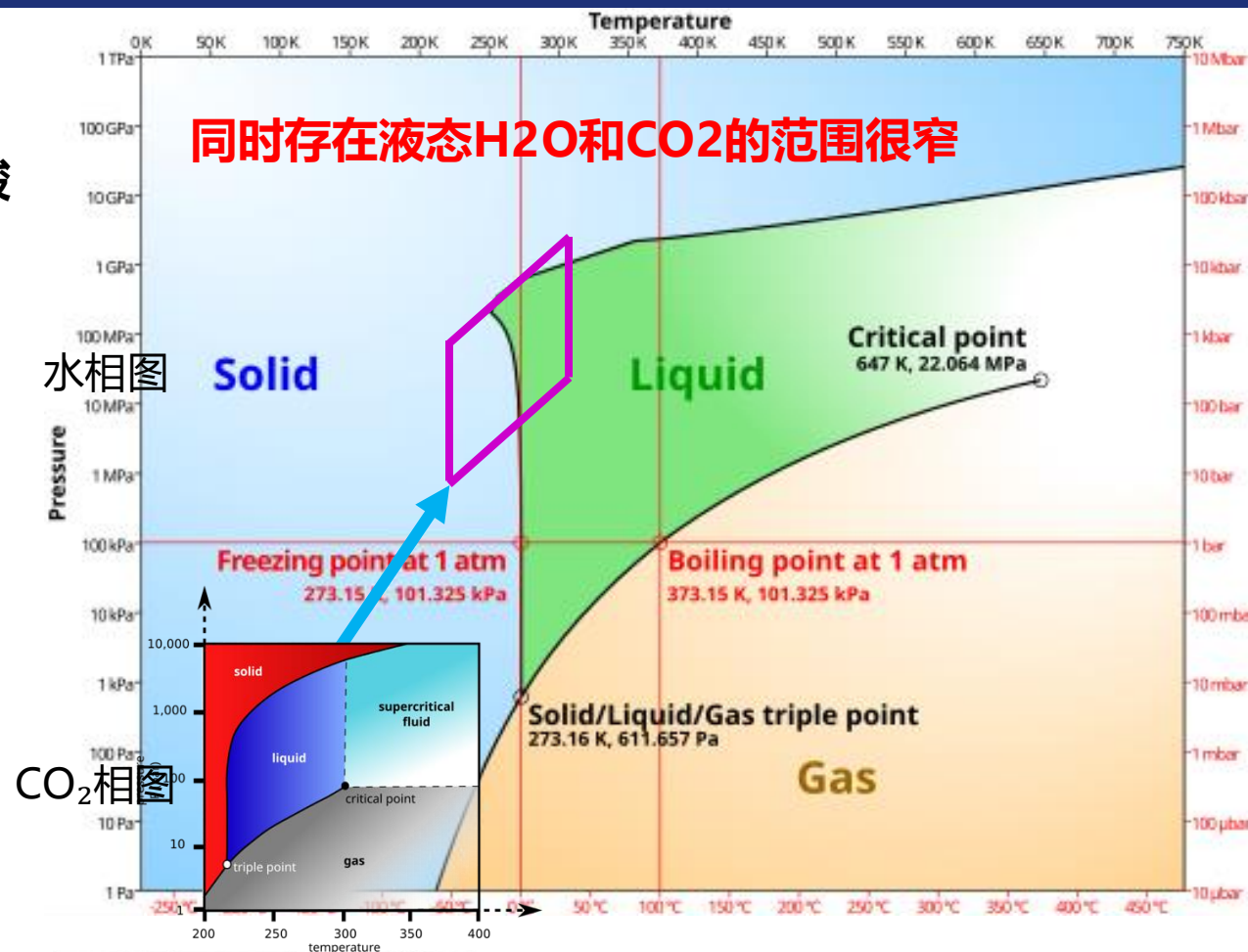
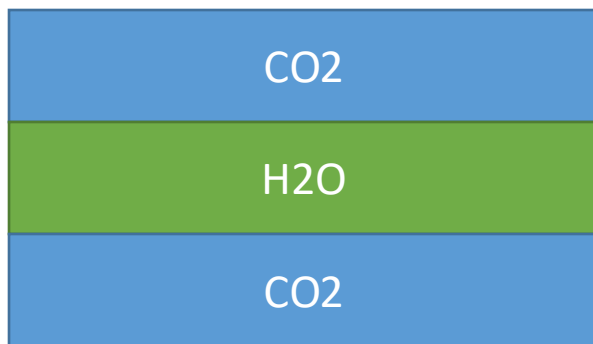


Fig. 5. Overflow of liquid CO₂ from the 4-liter beaker onto the sea floor at a 3650-m depth. A mass of transparent hydrate (CO₂·5.75H₂O), formed at the upper interface, sank to the bottom of the beaker and pushed out the remaining liquid CO₂. Ejected liquid CO₂ was highly mobile and did not appear to penetrate, or interact with, the sediments.

Brewer et al 1999

Discussion

对于生命起源的讨论

紫外线：被认为是驱动前生化反应重要因素

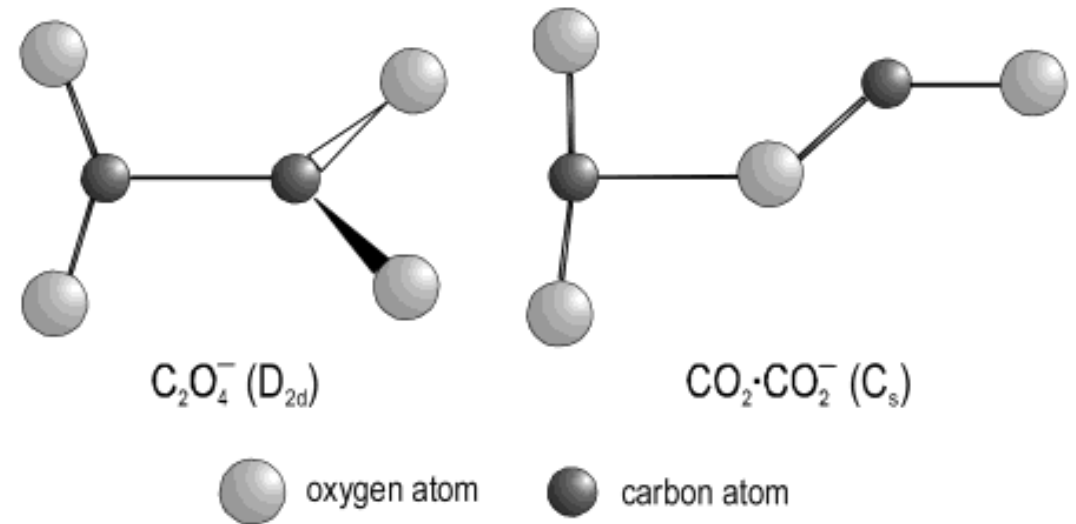
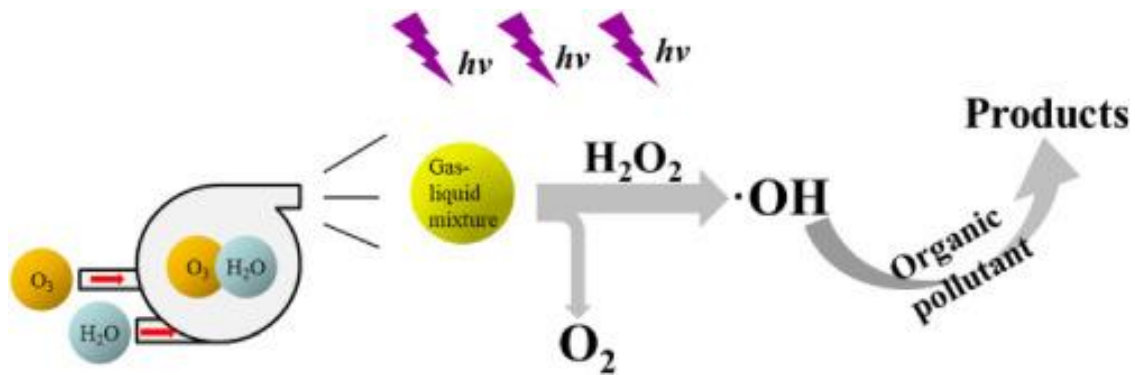
多BarCO₂压力会衰减紫外线辐射，限制生化反应

CO₂二聚体可能性：高压低温形成二聚体

较低非凝结pCO₂大气二聚体比例较低

例：6Bar CO₂和288K 二聚体比例不到1%

因此未来或许可以通过二聚体特征检测区分凝结与非凝结大气



Conclusion

CO₂富集大气**辐射特性与硅酸盐风化之间的相互作用**，导致**低入射辐射下G+恒星**周围行星的超饱和和循环气候
非常高的 CO₂ 水平下，瑞利散射的冷却效应引入了双稳态现象：

- 1.硅酸盐风化使 CO₂ 水平维持在较低水平的气候状态
- 2.CO₂ 喷发超过硅酸盐风化，使 CO₂ 浓度维持在足够高的水平，从而在表面发生 CO₂ 凝结

中等入射辐射：水蒸气含量增加显著影响行星反照率，CO₂冷凝气候状态不稳定，引发CO₂ 冷凝和非冷凝状态循环

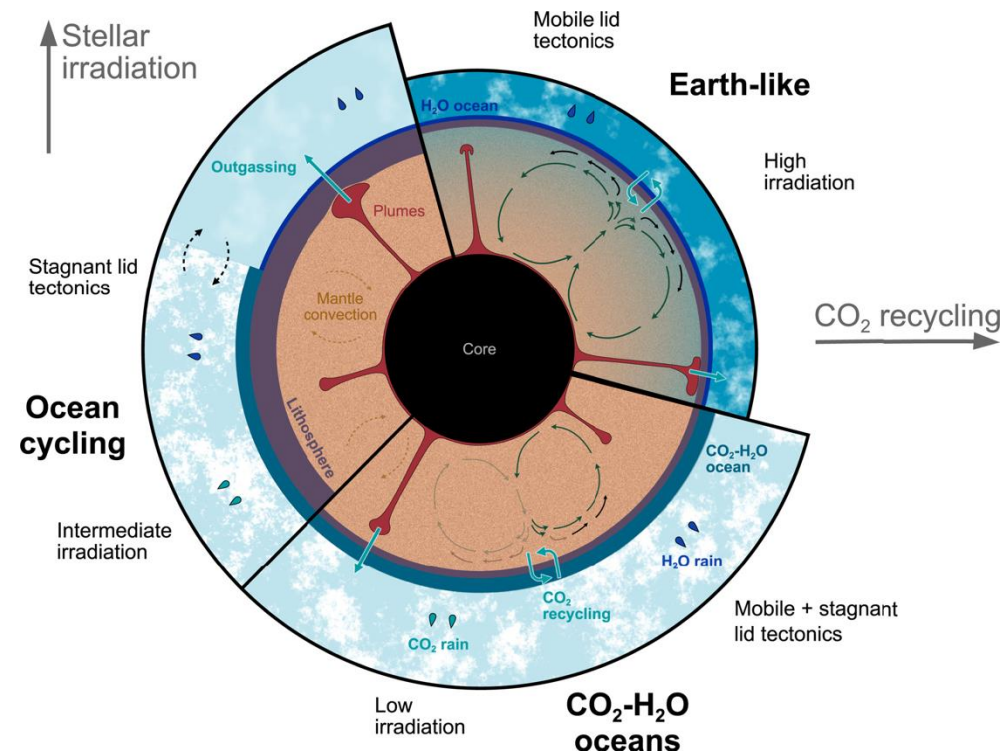


图 6: 本文研究中所探讨的气候状态示意图。

高入射辐射条件下，具有高效风化和活动性构造的行星可能会维持地球般的气候状态，拥有 H₂O 海洋和相对较薄的大气层。

低入射辐射下，可能存在厚 CO₂ 大气和地表 CO₂ 凝结，形成既含液态 CO₂ 也含液态 H₂O 的海洋。

在中等入射辐射下，风化作用较弱的行星可能会在 CO₂-H₂O 海洋状态和仅含 H₂O 海洋状态之间发生循环。