



# 火星沙尘对极地冰盖和大气环流影响的数值模拟研究

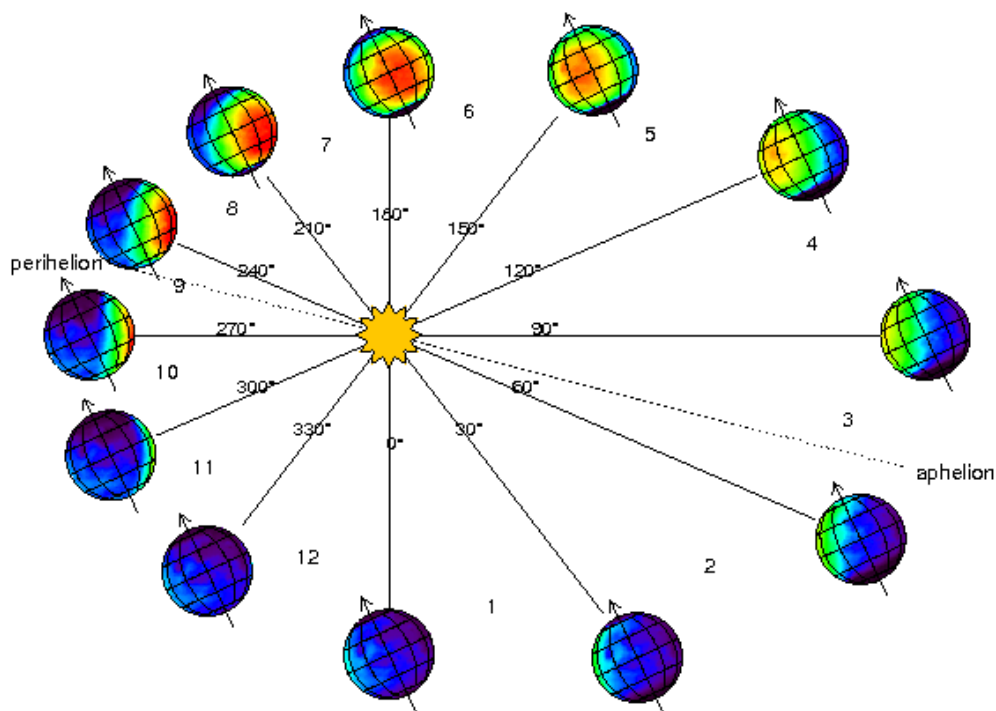
赵漾，仲雷

中国科学技术大学地球和空间科学学院，合肥，230026

## Martian Solar Longitude Ls

The solar longitude Ls is the Mars-Sun angle, measured from the Northern Hemisphere spring equinox where  $Ls=0$ .

$Ls=90$  thus corresponds to northern summer solstice, just as  $Ls=180$  marks the northern autumn equinox and  $Ls=270$  the northern winter solstice.



通常用**太阳经度Ls**来表示火星的季节变化；

火星气温有显著的季节变化，冬季的极地可达 $-143^{\circ}\text{C}$ ，夏季赤道的正午可达 $35^{\circ}\text{C}$ ，平均地表温度为 $-46^{\circ}\text{C}$ ；

火星地表引力是地球的38%，所以火星上的沙尘更容易被吹到大气中形成火星特有的全球性**沙尘暴**；

火星地表气压大约400–870Pa，相当于地球海平面气压的1%，地势北低南高即气压北高南低；

火星大气是由**96%的二氧化碳**，1.93%的氩气，1.89%的氮气以及微量的氧气和水组成，其南北两极覆盖着由冰冻的二氧化碳和水冰组成的冰盖；

A martian year is 668.6 sols (martian solar days) long and a sol is 88775.245 seconds long.



# 目 录

---

- 数值模型 — MarsWRF
- 火星沙尘含量对冰盖和环流的影响
- 火星沙尘暴发生时间对冰盖和环流的影响
- 主要结论



# 目 录

---

- 数值模型 — MarsWRF
- 火星沙尘含量对冰盖和环流的影响
- 火星沙尘暴发生时间对冰盖和环流的影响
- 主要结论

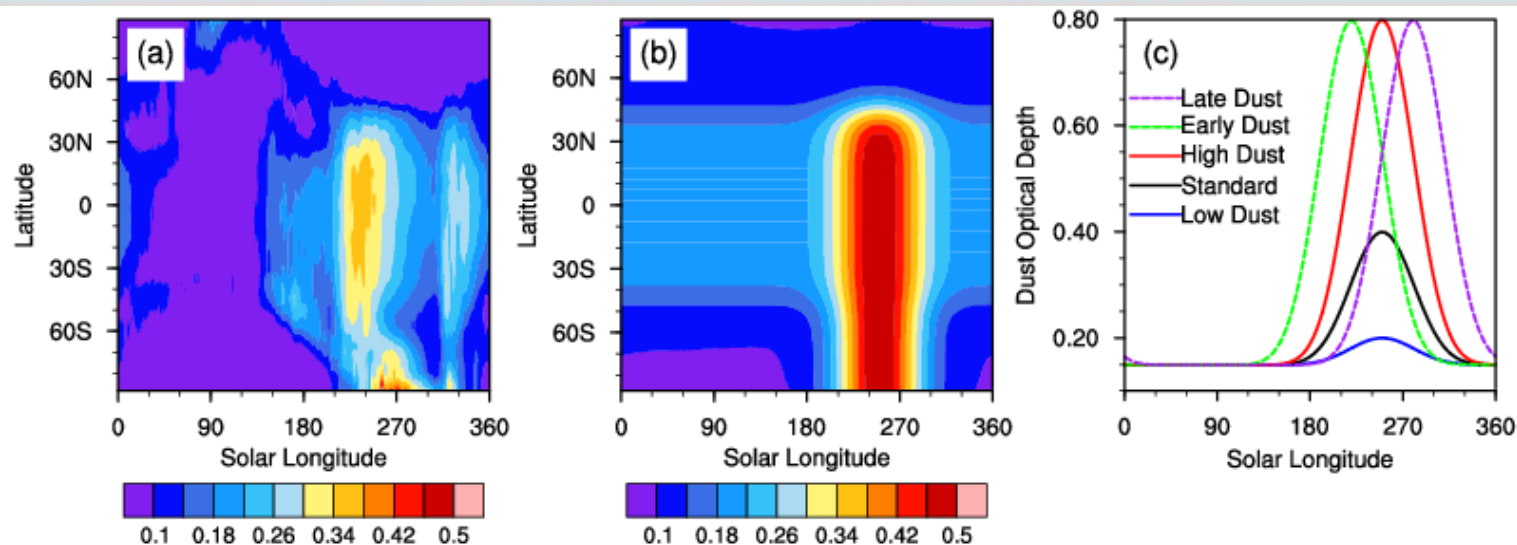
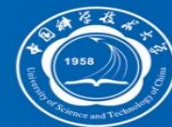
# 1.1 MarsWRF configurations



Physical processes	Parameterization schemes
Boundary layer	Medium Range Forecast Model (MRF)
Microphysics	marsdust1size
Longwave radiation	correlated-k coefficient model (KDM)
Shortwave radiation	correlated-k coefficient model (KDM)
Surface layer	Monin-Obukhov scheme
Land surface	Martian 12-layer subsurface diffusion scheme
Dust distribution	Mars Climate Database (MCD) “MGS dust scenario”

- Horizontal resolution:  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  36 latitude  $\times$  72 longitude grid points
- There are 52 vertical levels in terrain-following hydrostatic-pressure vertical coordinates with a top altitude of 80 km.
- The model was run for two Martian years, and the first year is the spin-up period.

## 1.2 实验设计



火星沙尘主要分布在  
南半球夏半年

(a) The reconstructed observational dust optical depth

(b) Simulated column dust optical depth for the "Standard" dust scenario (normalized to a 700 Pa surface)

Low Dust: 将沙尘年变化的峰值修改为 "Standard" 情景下的0.5倍

Standard: "MCD MGS" 沙尘分布方案 (峰值在 $L_s=250^\circ$ )

High Dust: 将沙尘年变化的峰值修改为 "Standard" 情景下的2倍

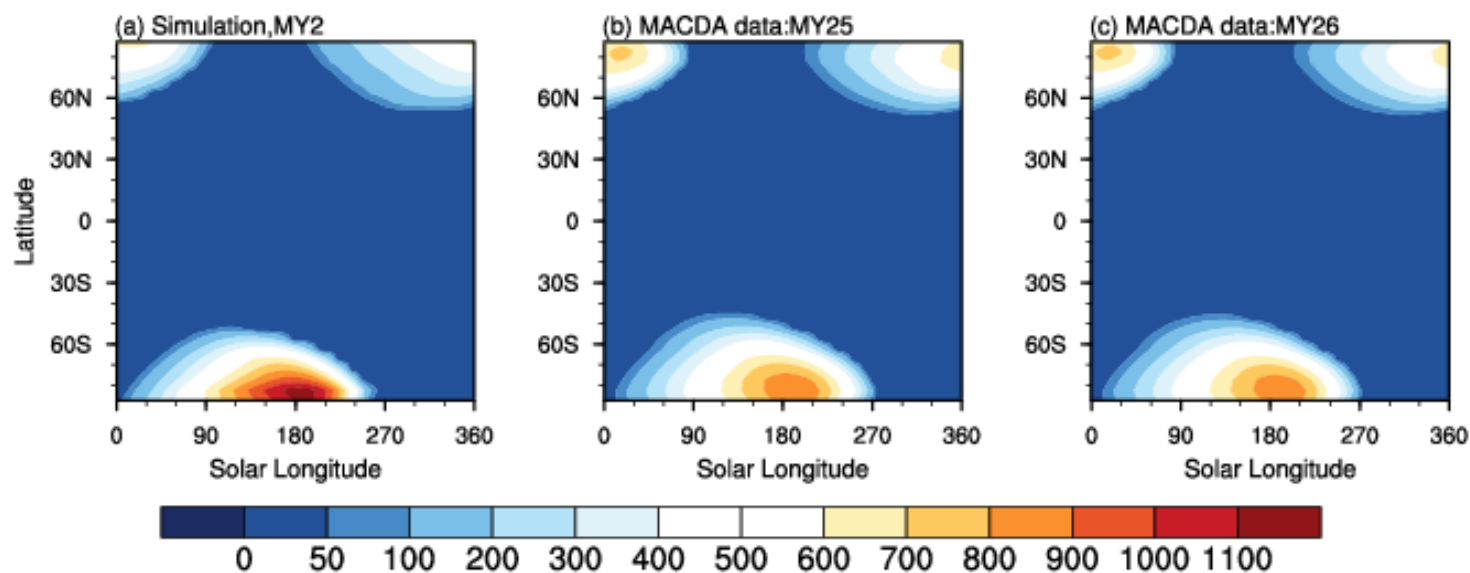
Early Dust: 将沙尘峰值修改到 $L_s=230^\circ$

Late Dust: 将沙尘峰值修改为到 $L_s=280^\circ$

## 1.3 模型验证 – CO<sub>2</sub> Ice



模拟结果与MACDA(Mars Analysis Correction Data Assimilation)的对比：



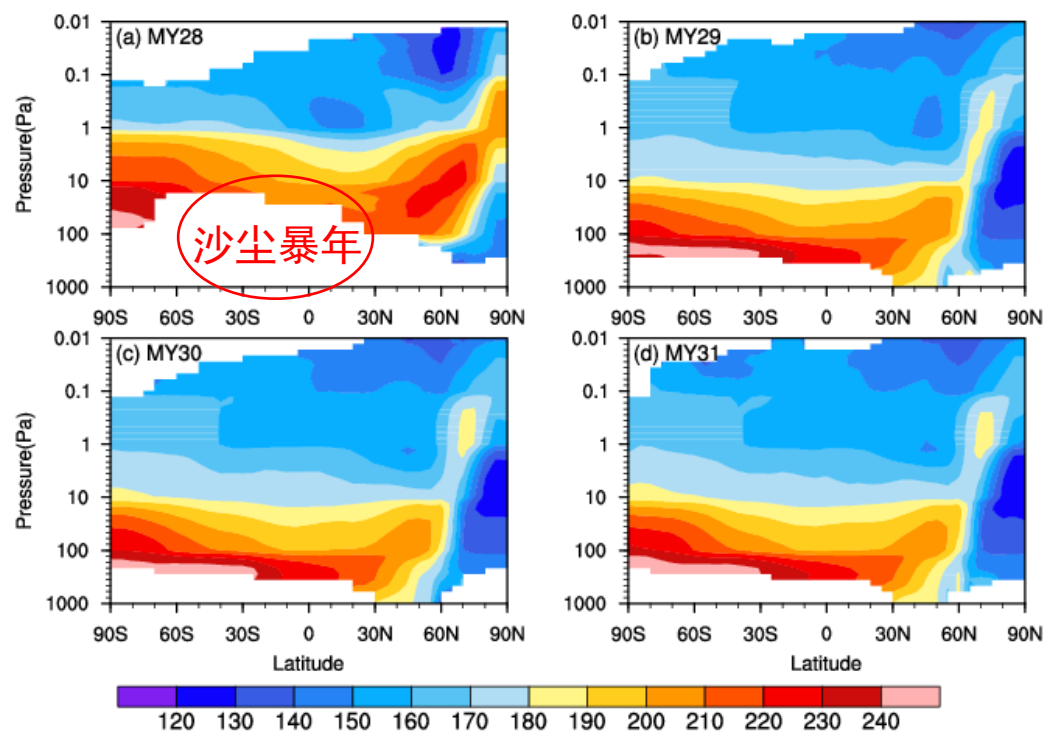
The model can reproduce the evolution of the CO<sub>2</sub> ice cap.



## 1.3 模型验证 – 气温



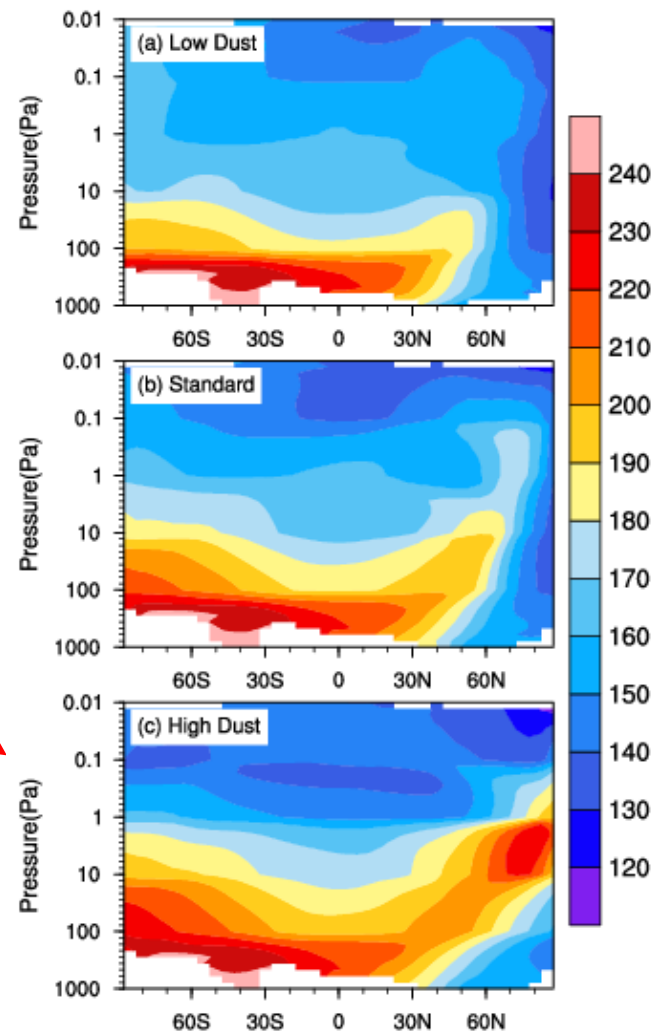
Mars Climate Sounder (MCS) observation:



火星28年存在全球尺度的沙尘暴，这时在南半球夏半年  
北极地区上空的气温会比一般情况下更高。

$L_s \approx 270^\circ$

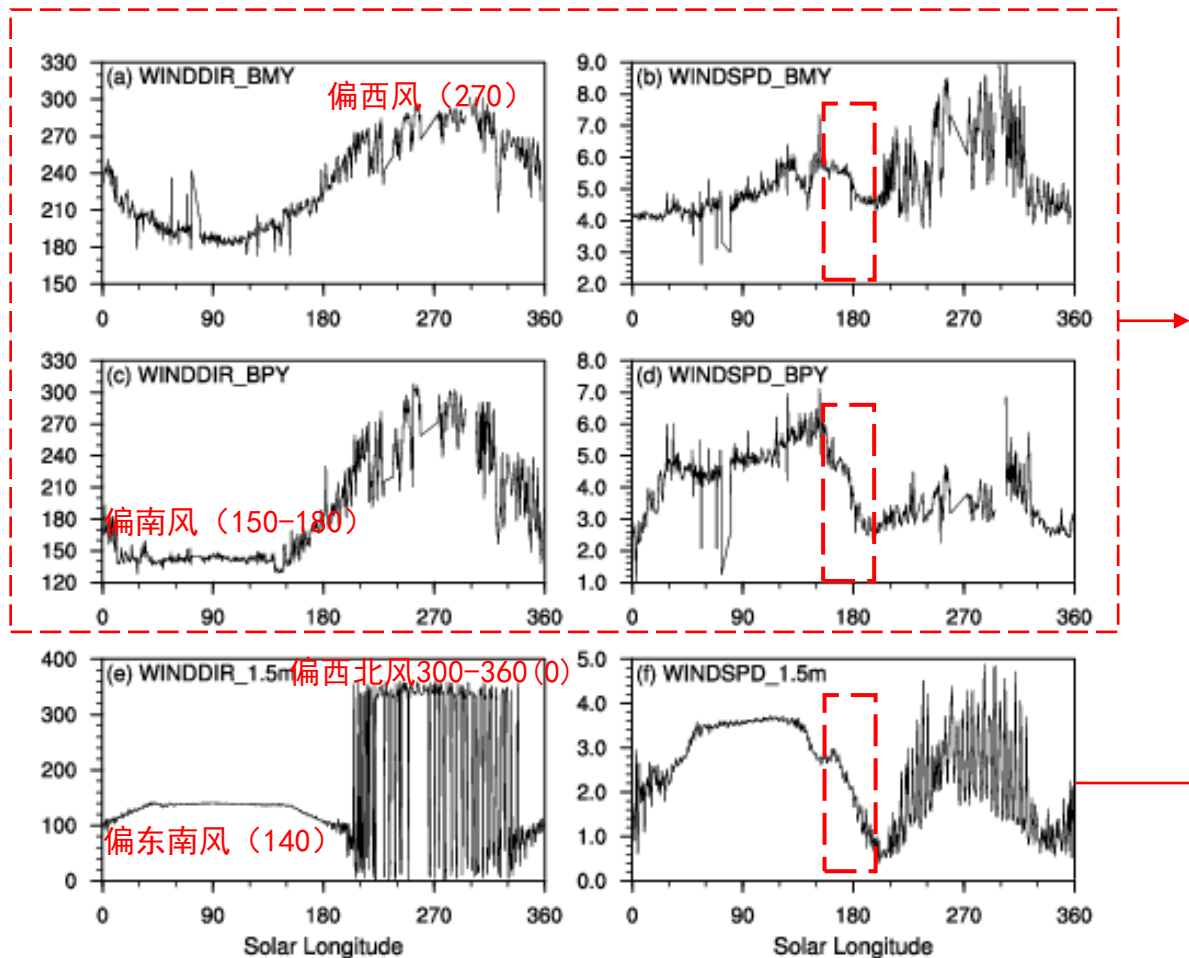
Simulation results:



模拟的“High Dust”  
情景还原了北极上空  
极涡变暖这一现象



## 1.3 模型验证 – 风场



### InSight Lander Observation:

Currently available data extend from 2018-11-30 to 2020-10-14  
(Ls 298 MY 34 to Ls 295.0 MY 35 ) [ongoing]

+Y和-Y方向各有一个探测器: BMY、BPY (1.4m)

登陆地点:  $4.5^{\circ}$  N,  $135.9^{\circ}$  E

模拟结果: ( $2.5-7.5^{\circ}$  N,  $132.5-137.5^{\circ}$  E 平均1.5m风场)

能捕捉到主要风向;

能展现出风速在  $L_s=160-200^{\circ}$  期间明显的下降特征;



# 目 录

---

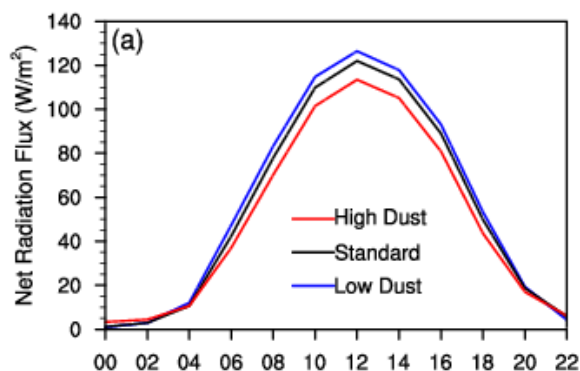
- 数值模型 — MarsWRF
- 火星沙尘含量对冰盖和环流的影响
- 火星沙尘暴发生时间对冰盖和环流的影响
- 主要结论

## 2. 火星沙尘含量的影响——南半球

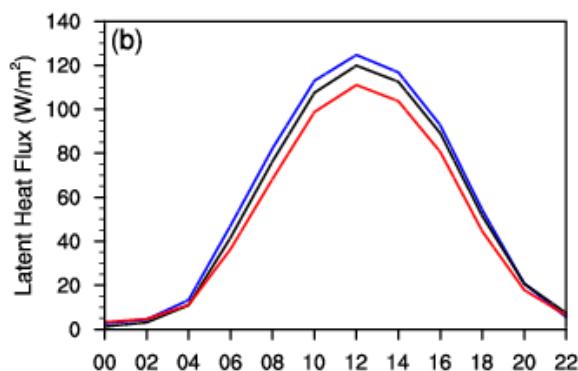


### 南半球冰盖区

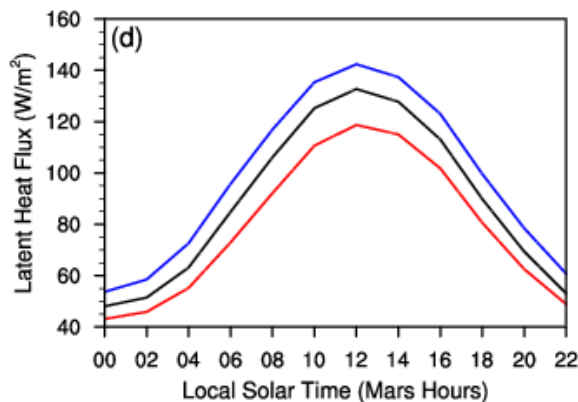
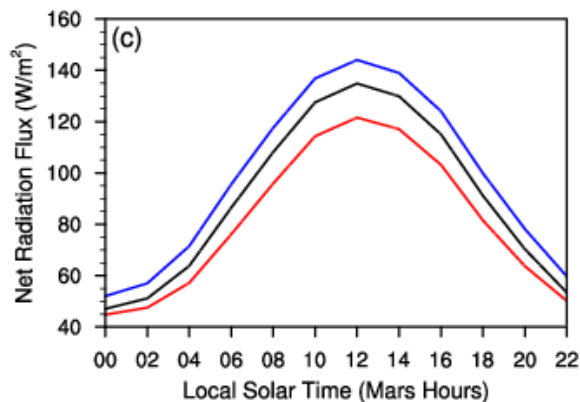
地表净辐射通量：



地表潜热通量：



$L_s=210^\circ$

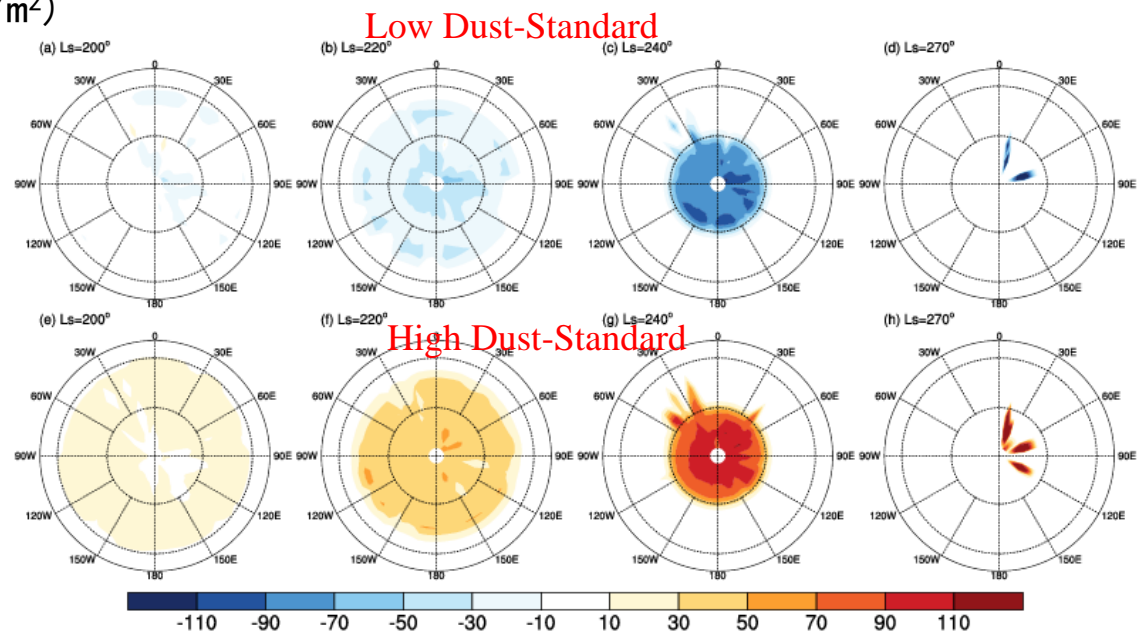
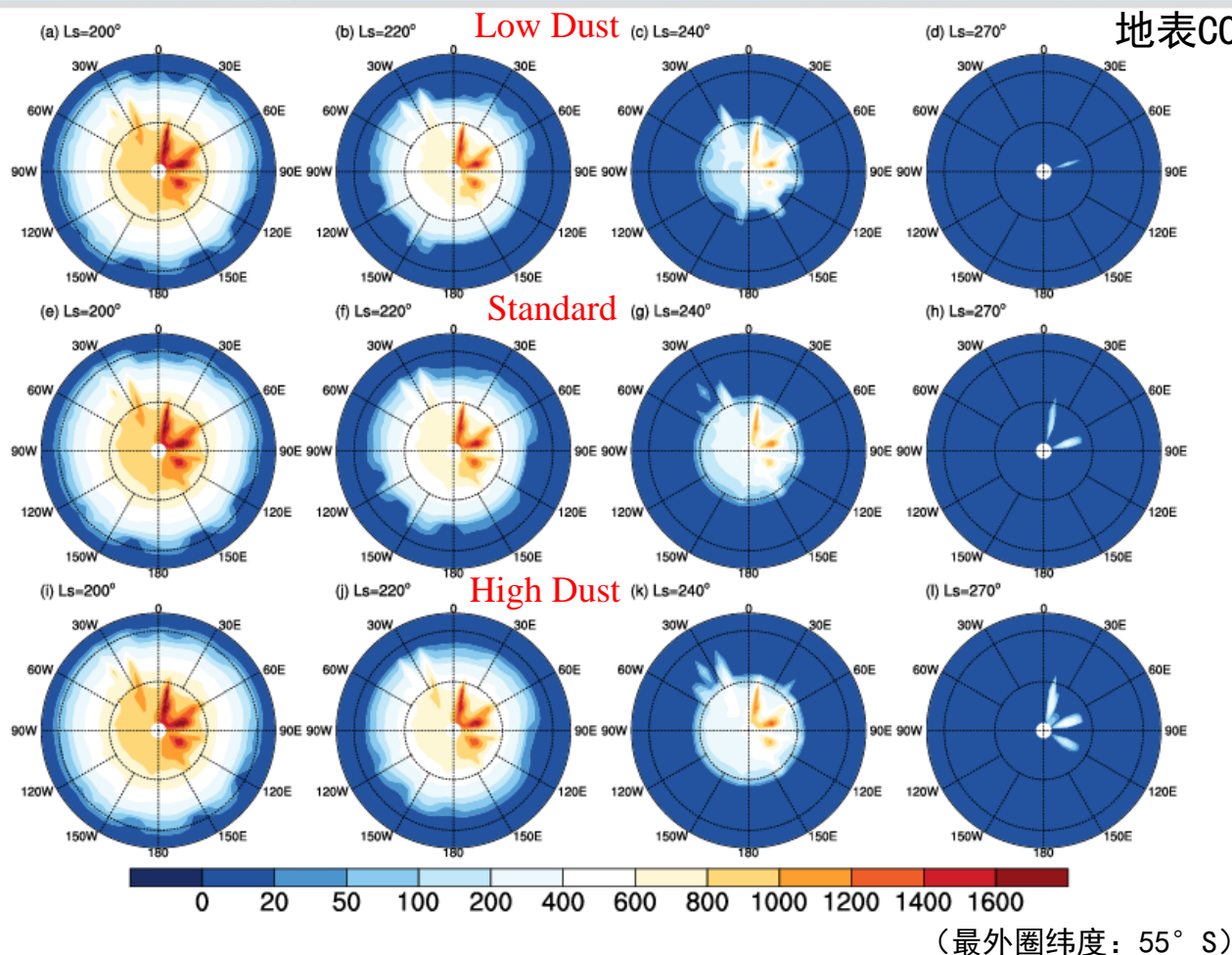
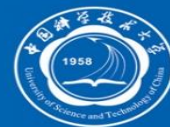


$L_s=230^\circ$

地表净辐射通量和潜热通量的大小相当，变化趋势一致，说明地表接收的辐射主要用于 $\text{CO}_2$ 冰的升华；

高沙尘情景下的地表净辐射通量和潜热通量更小，说明沙尘会通过辐射效应抑制南半球 $\text{CO}_2$ 冰的升华；

## 2. 火星沙尘含量的影响——南半球



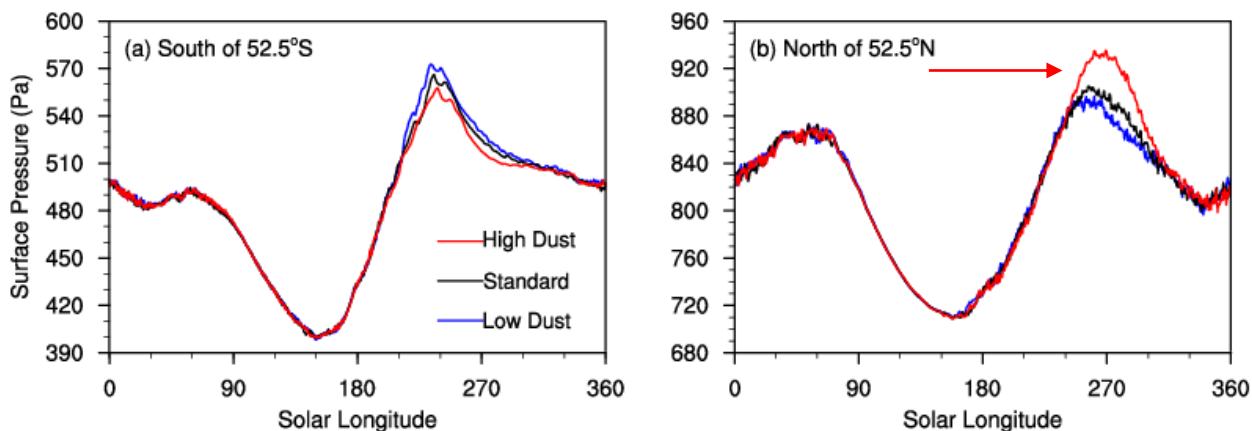
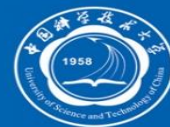
低沙尘情景下, 南半球冰盖加速**后退**, 地表冰质量**减小**;  
高沙尘情景下, 南半球冰盖后退**减慢**, 地表冰质量**增加**;

30W-90W的冰盖范围变化较小;

$\text{Ls}=220^\circ$  时, 高沙尘情景下东半球的冰缘较一般情景可向北多出**5个纬度**;



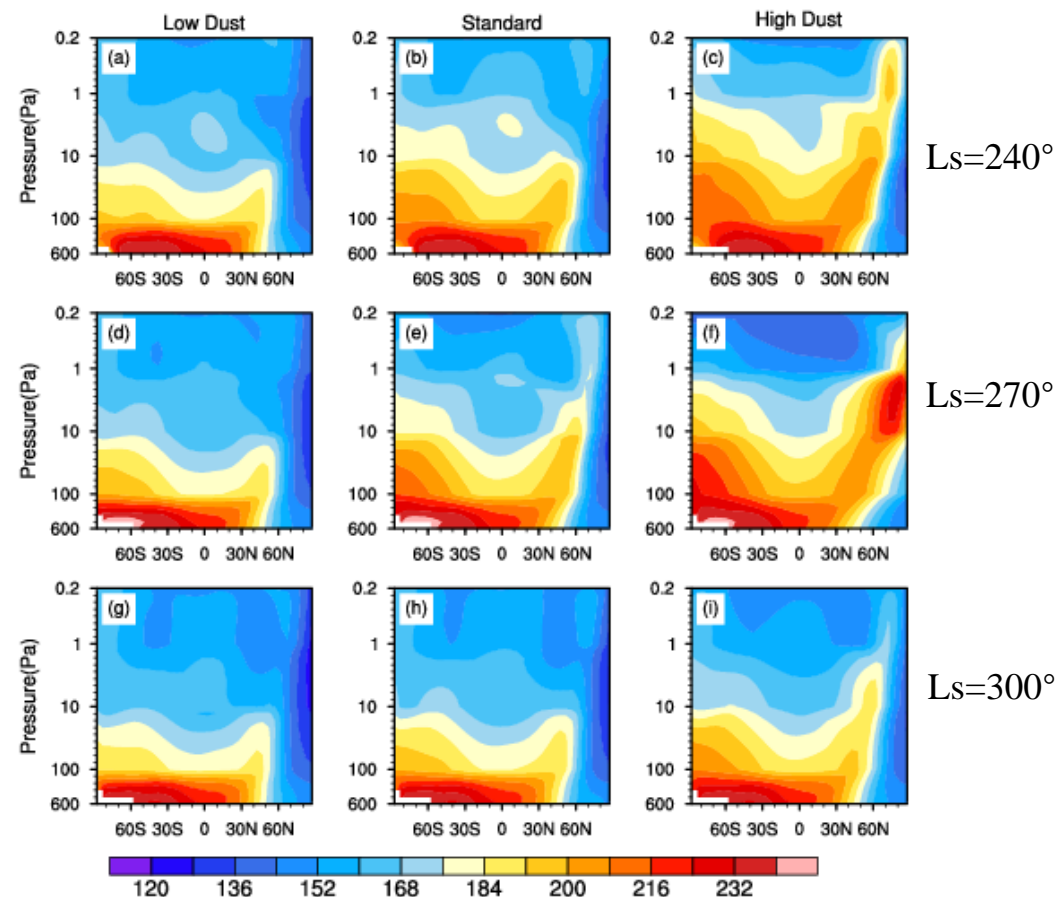
## 2. 火星沙尘含量的影响——南半球



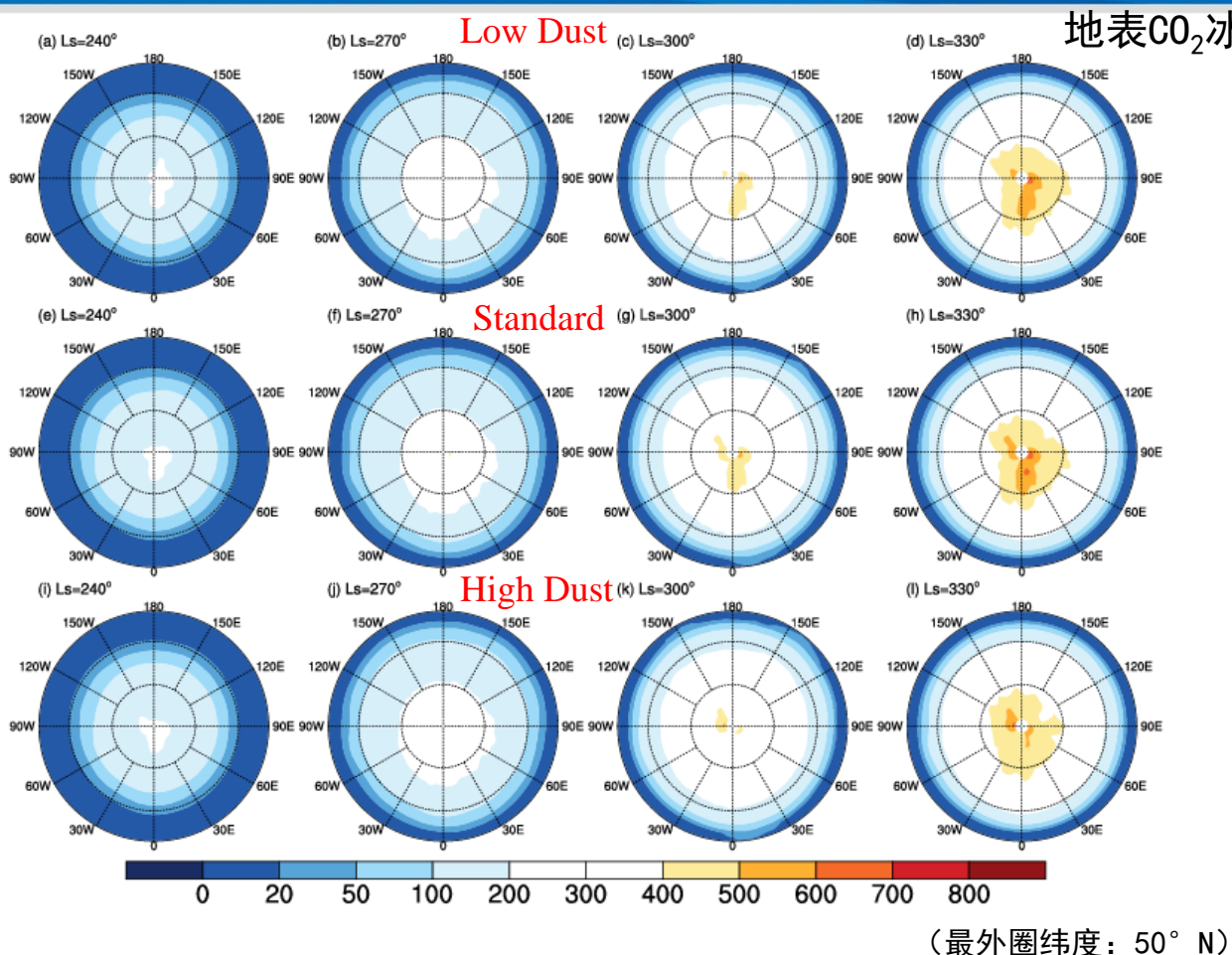
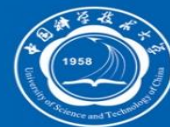
高沙尘情景下:

- 南半球冰盖升华受到抑制, 地表气压**减小**;
- 南半球夏至日附近( $L_s=240-300^\circ$ ), 北极地区地表气压突然**升高**, 这与北极上空大气变暖的时间相对应;

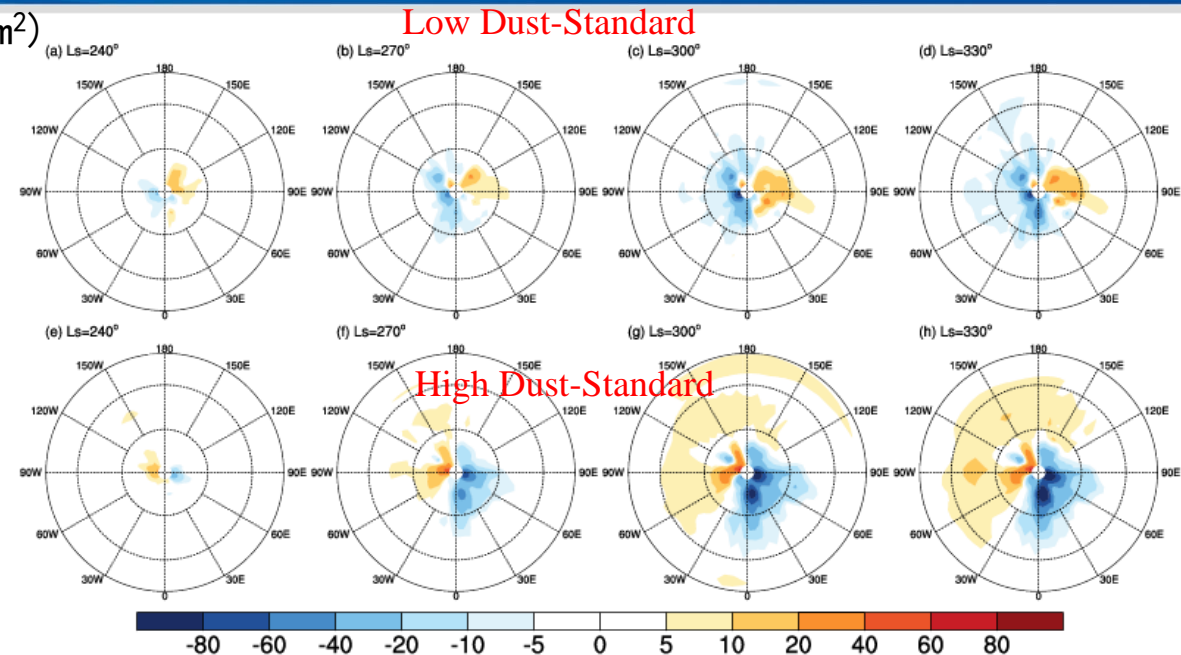
升高的气温会减小大气密度, 但地表气压为什么会升高?



## 2. 火星沙尘含量的影响——北半球



北半球冰盖的范围几乎没有变化, 因为对冰盖的影响主要集中在80° N以北的极区;

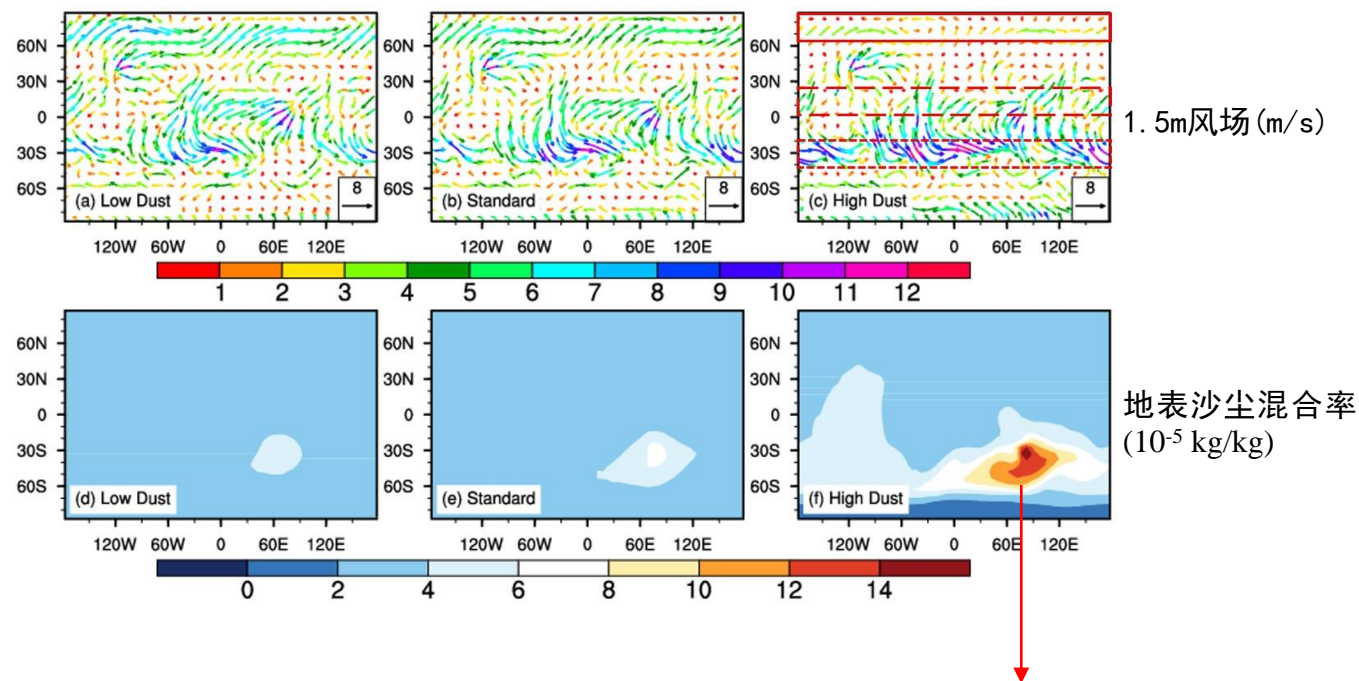
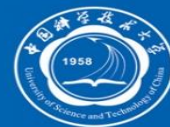


南半球夏半年, 北极地区的 $\text{CO}_2$ 主要以气态形式存在, 处于凝华过程中;  
高沙尘情景下, 北极上空大气变暖会抑制凝华过程, 导致地表气压升高;

东西半球的差异? → 与大气环流有关



## 2. 火星沙尘含量的影响



近地表风场存在三个风带的改变：

加剧Hellas盆地的沙尘暴

- (1) 30° S附近的西风带增强
- (2) 10° N附近的东风带减弱
- (3) 北极地区的西风带减弱

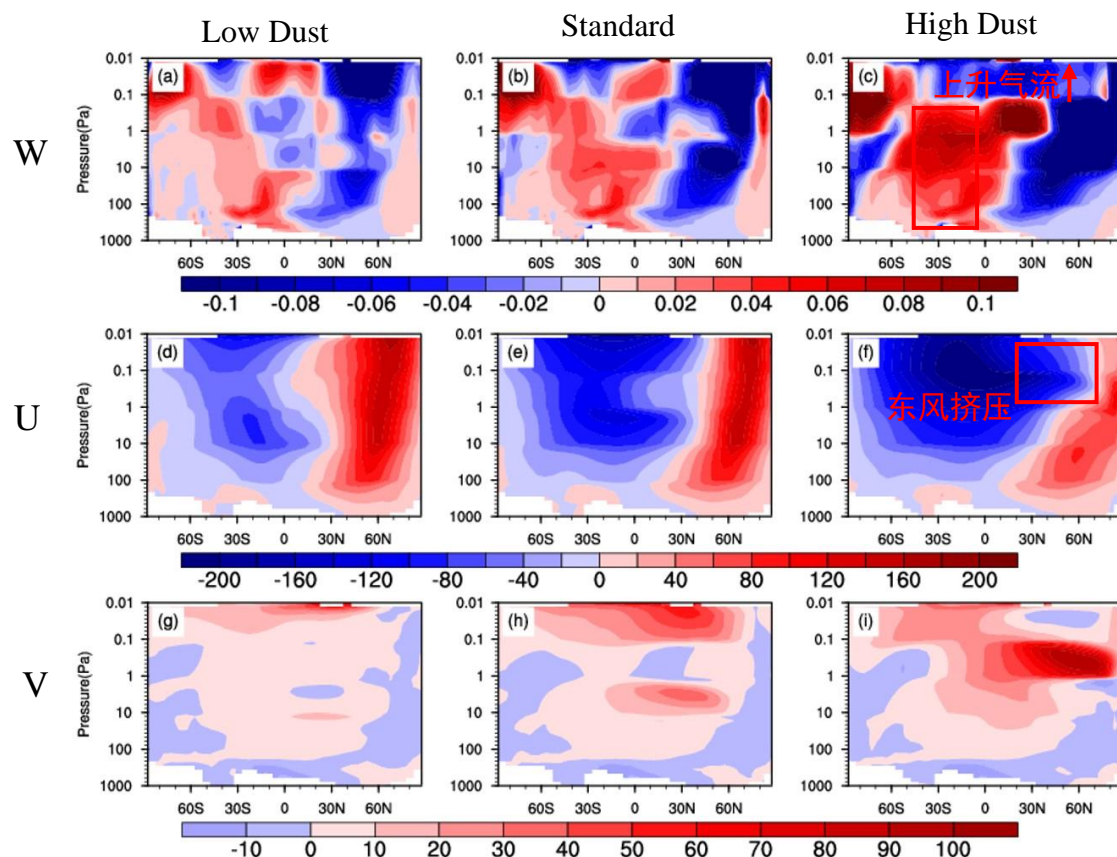
( $L_s=267.35-272.53^\circ$ )

经向环流：

30° S附近的上升支增强；

10° N高空下沉变上升，低空上升增强，减弱原本的下沉支；

北极-赤道的气温梯度增大→**热成东风**，往高纬地区挤压→**北极地区西风带减弱**；





# 目 录

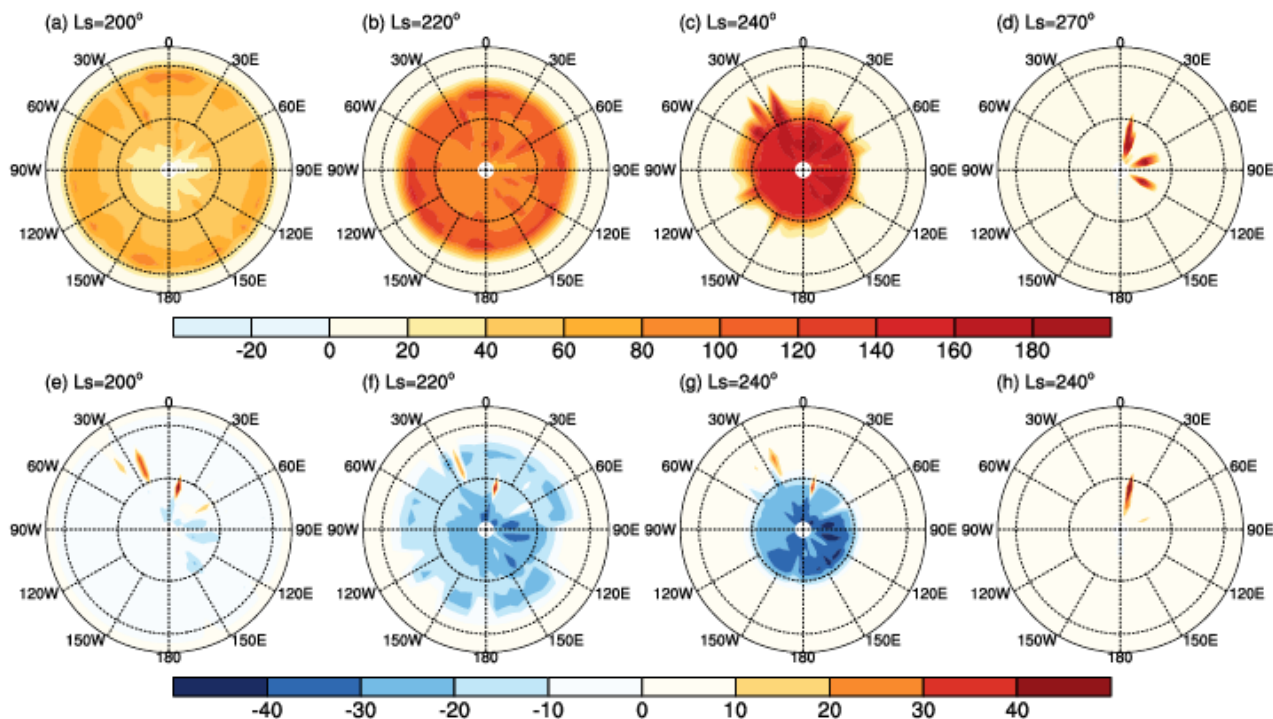
---

- 数值模型 — MarsWRF
- 火星沙尘含量对冰盖和环流的影响
- 火星沙尘暴发生时间对冰盖和环流的影响
- 主要结论

### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——南半球



地表 $\text{CO}_2$ 冰 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) :



Early Dust - Standard

Late Dust - Standard

在南半球 $\text{CO}_2$ 冰盖升华期间，呈现出相反的变化模态；

Early Dust: 减缓升华

Late Dust: 加速升华

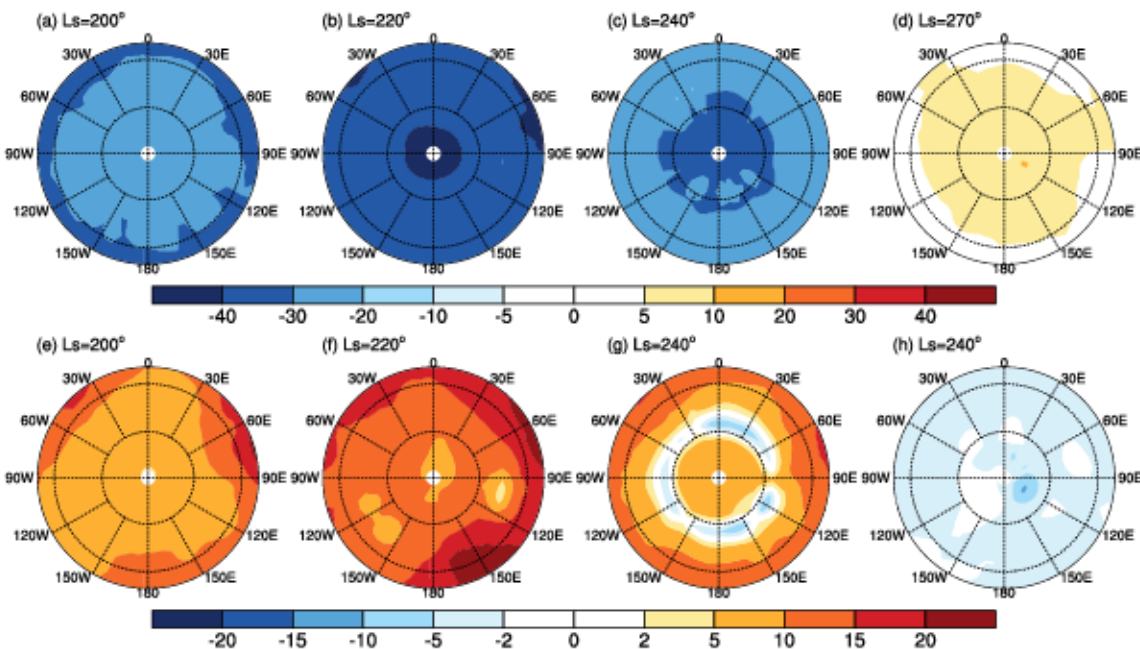


### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——南半球



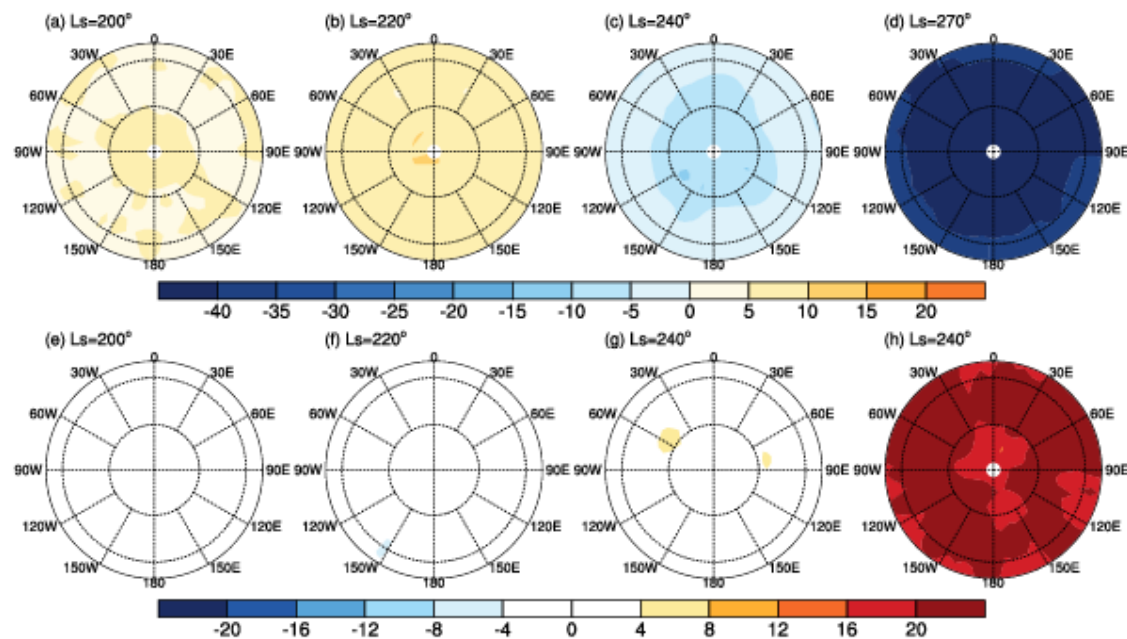
Early Dust - Standard

Late Dust - Standard



SWDOWN

GLW



SWDOWN: downward short wave flux at ground surface

GLW: downward long wave flux at ground surface

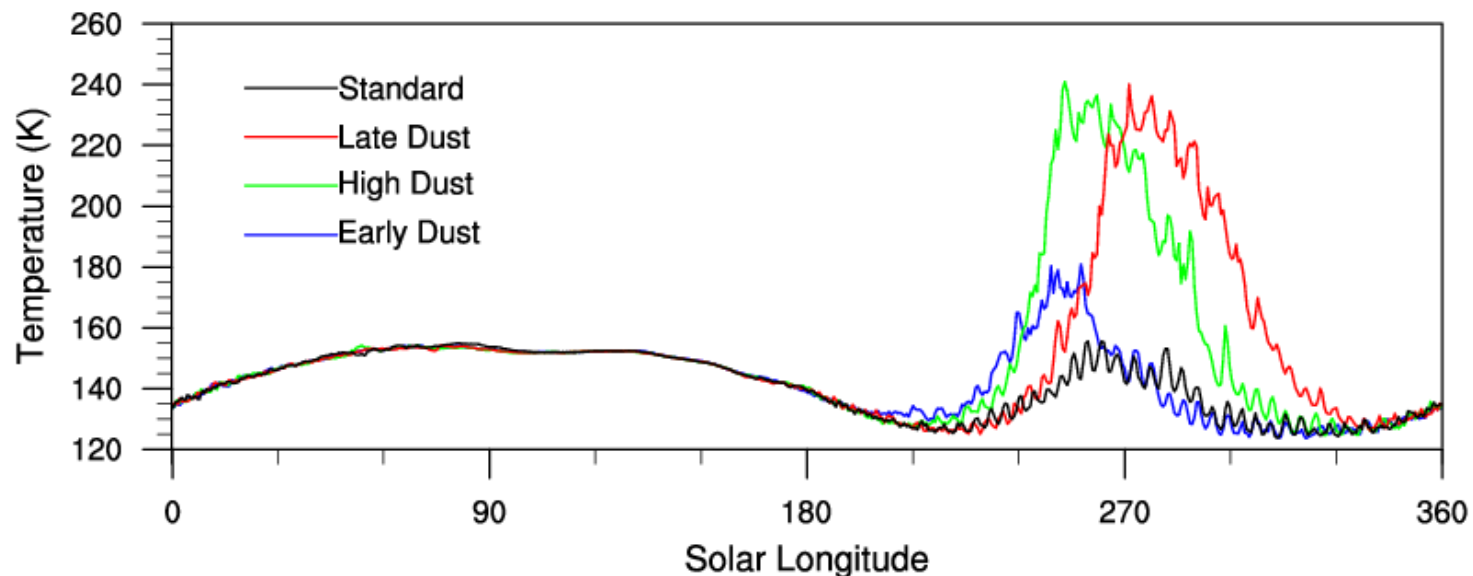
沙尘散射的短波能量要大于其发射的长波，大约为2倍的关系，因此沙尘对地表的能量作用为负；

升华期间，“Late Dust”的沙尘还处于未增加或刚开始增长的阶段，含量较一般情景更低，因此沙尘对地表能量的作用为正，加速升华；  
当“Late Dust”的沙尘暴来临时，虽然对地表作用为负，但此时冰盖已经升华完；

### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——北半球



5Pa气温：

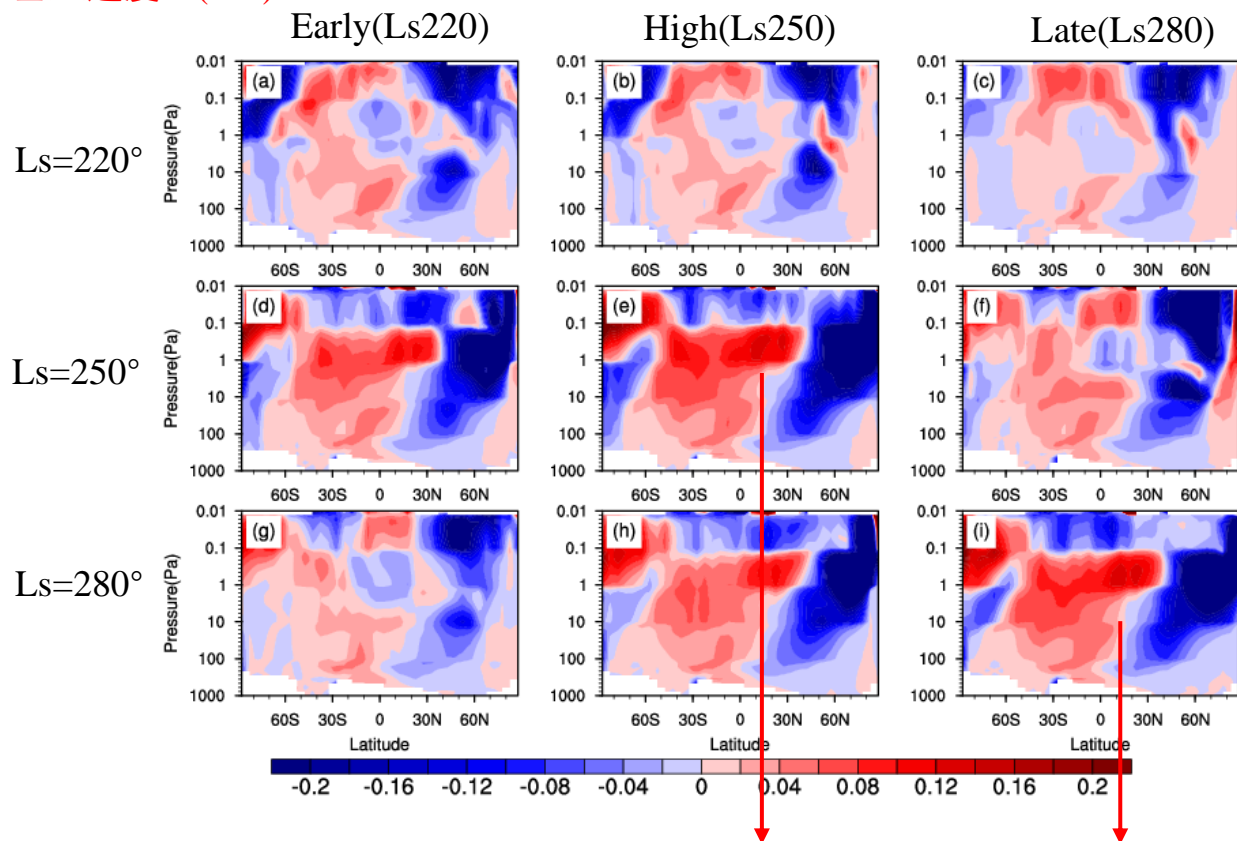


- 北极暖涡在“High Dust”和“Late Dust”情景下出现的时间分别为 $L_s=250^\circ$ ， $L_s=280^\circ$  左右，与沙尘峰值的时间相对应；
- 而在“Early Dust”情景下（峰值 $L_s=220^\circ$ ），暖涡出现的**时间后移**，并且**强度显著减弱**，可较“High Dust”，“Late Dust”**低60K**；

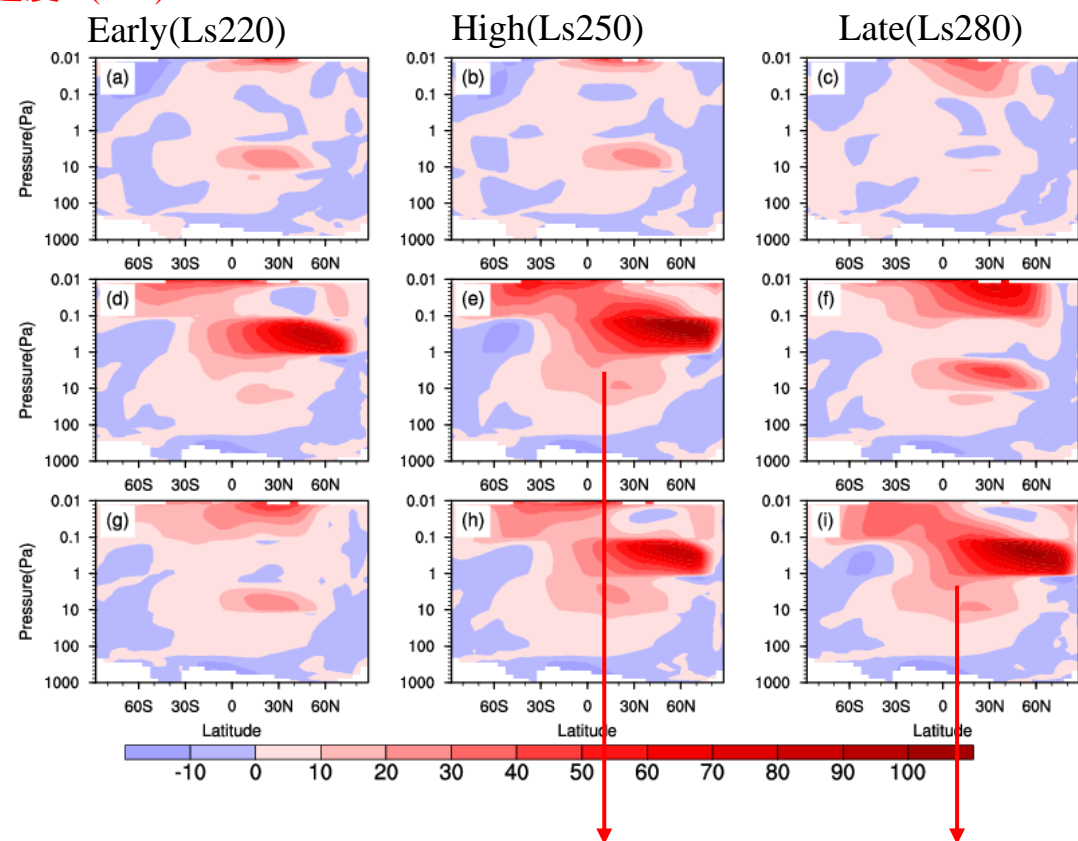
### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——北半球



垂直速度  $W$ (m/s):



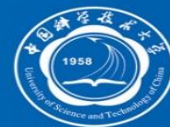
经向速度  $V$ (m/s):



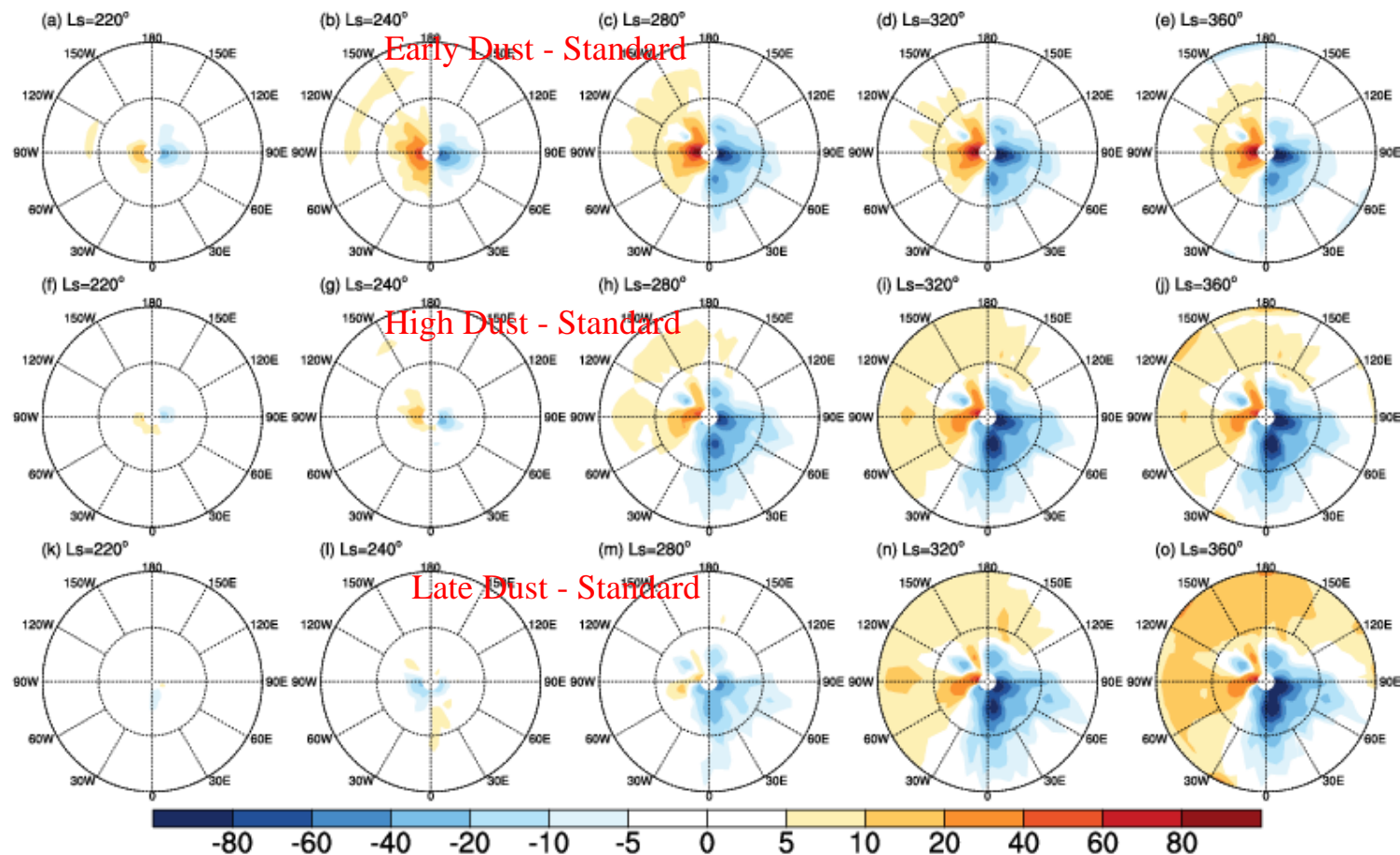
- “High Dust”和“Late Dust”情景下，高空经向风速和南半球垂直上升气流都在**沙尘峰值**时有着显著的增强(Figs. e and i)，与北极暖涡出现的时间相对应；
- “Early Dust”在沙尘峰值时垂直气流和经向气流变化较小(Fig. a) —> 此时北极上空还未出现明显的变暖现象；
- 随后，南半球积累的能量增加，尽管会引起“Early Dust”经向环流的增强，但是沙尘含量逐渐减小，因此北极暖涡强度较另外两种情景更弱；



### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——北半球



地表 $\text{CO}_2$ 冰 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) :

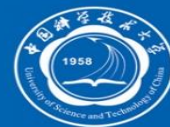


(最外圈纬度:  $60^\circ \text{ N}$ )

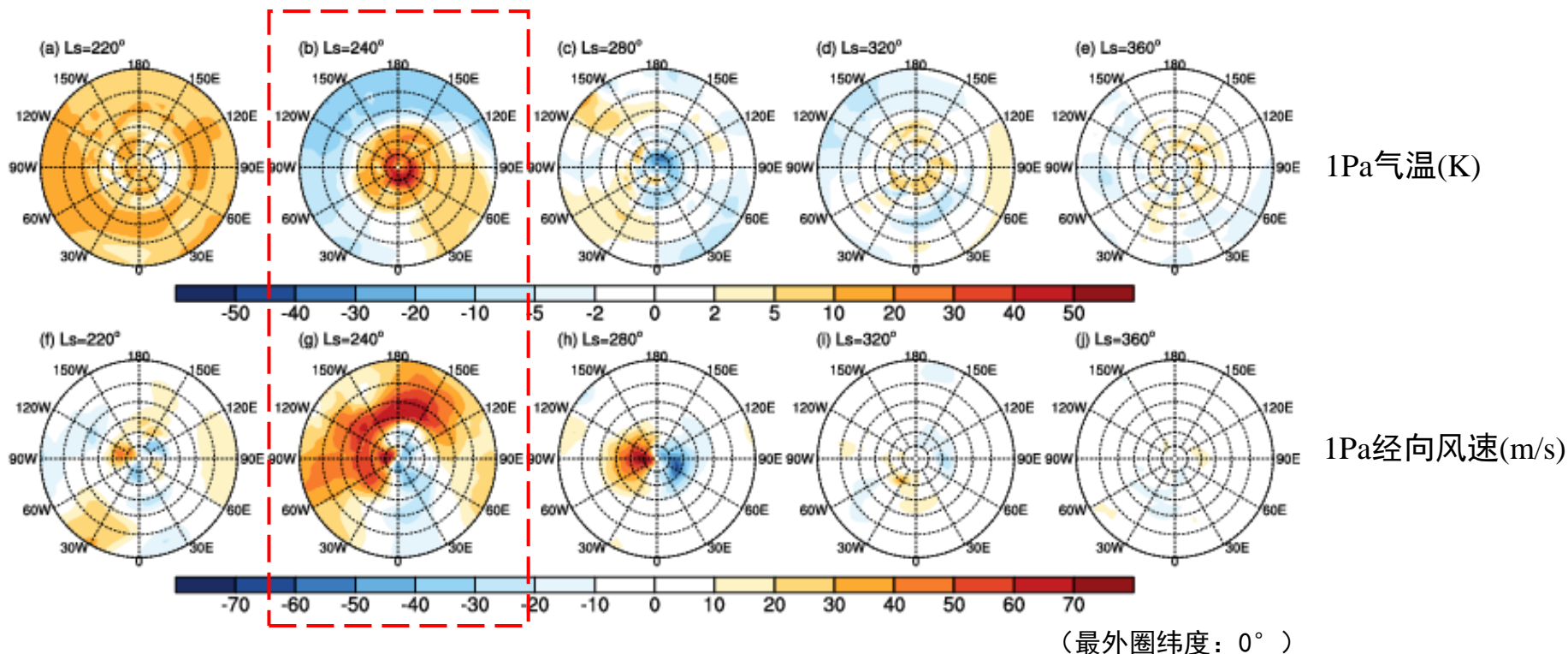
北极气温升高抑制北极冰盖凝华过程，导致地表冰盖减少，但在西半球仍存在地表 $\text{CO}_2$ 冰质量升高的区域；

Why?

### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——北半球

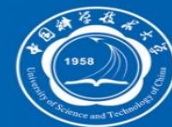


#### Early Dust - Standard

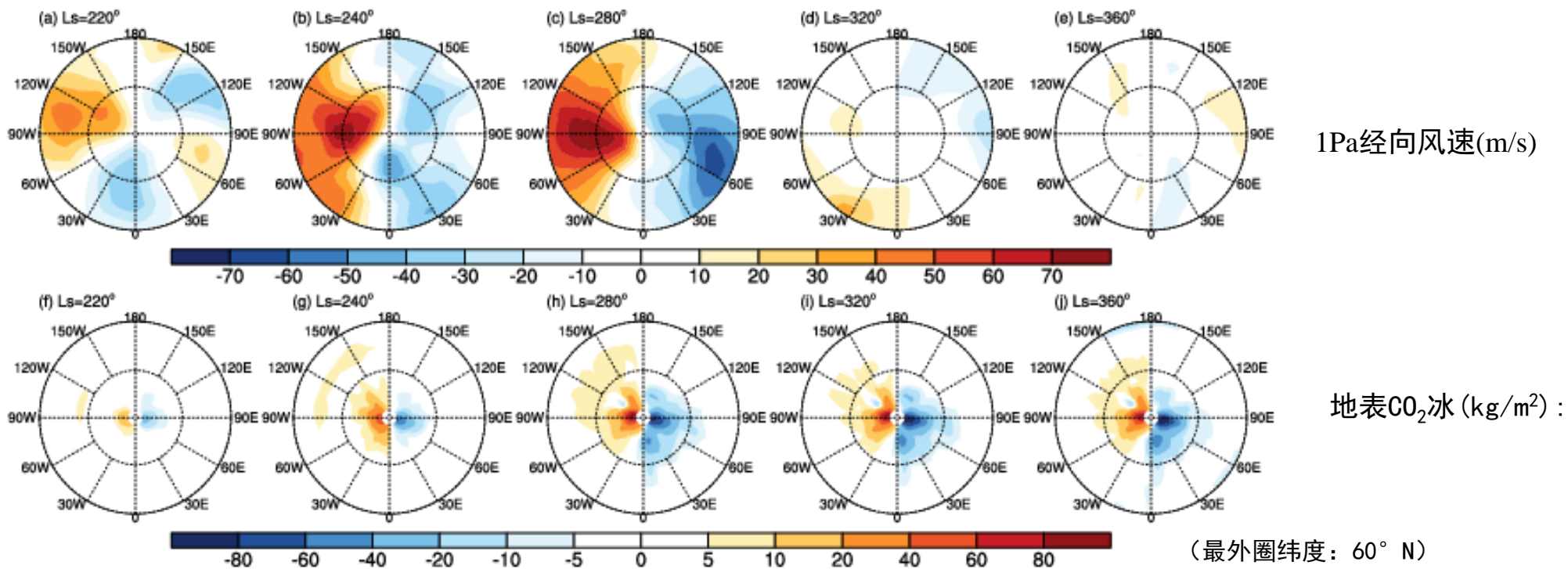


Ls=240° 附近出现了北极上空大气**变暖**，北半球低纬地区大气温度**降低**的情景；  
同时，**西半球**从赤道到极区的**经向环流也增强**，将赤道高空的冷气流带到极地，有助于CO<sub>2</sub>凝华；

### 3. 火星沙尘暴发生时间的影响——北半球



#### Early Dust - Standard



该过程主要发生在Ls=220° 以后, Ls=280° 之前, 因此Ls=280° 以后地表CO<sub>2</sub>冰的变化量没有太大变化;



# 目 录

---

- 数值模型 — MarsWRF
- 火星沙尘含量对冰盖和环流的影响
- 火星沙尘暴发生时间对冰盖和环流的影响
- 主要结论



## 4. 主要结论



### 沙尘含量:

- 低（高）沙尘情景下，南半球冰缘后退**加速（减慢）**，地表冰质量**减小（增加）**；其中 $L_s=240^\circ$  时，高沙尘情景下东半球的冰缘较低沙尘情景可向北多出**5个纬度**；北半球冰盖的范围几乎没有变化，因为对冰盖的影响主要集中在 **$80^\circ$  N以北**；
- 高沙尘情景下，南半球夏至日附近( $L_s=240-300^\circ$ )，北极地区地表气压突然**升高**，这与北极上空大气**变暖**从而抑制 $CO_2$ 的凝华过程有关；
- 沙尘含量的变化会导致**近地表三条风带**的改变，从而影响到Hell as盆地的沙尘暴强度，这与沙尘会导致的全球尺度经向环流的上升支增强，下沉支往极地挤压有关；

### 沙尘暴发生时间:

- "Early Dust"和"Late Dust"对南半球冰盖升华过程的影响呈现出**相反**的模式，这是因为"Late Dust"的沙尘暴延迟，升华期间的沙尘含量较一般情景更少；
- "Early Dust"情景下北极暖涡的出现的**时间推迟**，并且**强度显著减弱**，可较"High Dust", "Late Dust"**低60K**；
- 北极上空变暖的大气抑制凝华过程，导致地表冰盖减少，但在**西半球**仍存在地表 $CO_2$ 冰质量升高的区域，这是**赤道-极地的温度梯度和大气经向环流**共同作用的结果；



谢谢聆听！

欢迎批评和指正！