

金星上层霾消光和微物理特性的时空分布

李宜奇^{1,2,3}, 孙晓兵^{2,3*}, 黄红莲^{2,3}, 刘晓^{2,3}, 提汝芳^{2,3}, 郑小兵^{1,2,3}, 樊依哲⁴,
余海啸^{2,3}, 韦祎晨^{1,2,3}, 王宇轩^{2,3}, 王宇瑶^{2,3}

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

3. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

4. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

摘要: 金星上层霾消光和微物理特性的变化会影响金星大气的化学和辐射平衡, 为研究其时空分布, 选取 2006~2013 年间金星快车 SPICAV SOIR 仪器的太阳掩星数据进行分析。首先利用 MODTRAN 建模去除金星中上层大气的吸收效应, 后利用剥洋葱法计算 67~92 km 高度处金星上层霾的消光廓线。研究表明: 1) 金星上层霾的消光系数总体趋势是随着高度增加而减小。不同区域间的消光系数变化较大, 低纬度霾在任务开始时大幅增加, 昼夜间霾的平均消光系数略有变化。霾层的垂直光学厚度在 10^{-2} 数量级。2) 上层霾的数密度随高度增加而减小, 从南极到北极, 上层霾的数密度呈现先增加后减小的趋势。3) 低纬度地区的云顶高度较高, 为 82.7 ± 5.8 km; 极区的云顶高度较低, 北极地区云顶高度为 73.3 ± 2.4 km, 南极地区为 79 ± 3.5 km。北极地区上霾层平均标高为 4.0 ± 0.9 km。

关键词: 金星大气; 上层霾; MODTRAN 建模; 剥洋葱法; 消光系数; 数密度

中图分类号: P185

文献标识码: A

Spatial and temporal distribution of extinction and microphysical properties in the upper haze of Venus

LI Yi-Qi^{1,2,3}, SUN Xiao-Bing^{2,3*}, HUANG Hong-Lian^{2,3}, LIU Xiao^{2,3}, TI Ru-Fang^{2,3},
ZHENG Xiao-Bing^{1,2,3}, FAN Yi-Zhe⁴, YU Hai-Xiao^{2,3}, WEI Yi-Chen^{1,2,3},
WANG Yu-Xuan^{2,3}, WANG Yu-Yao^{2,3}

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

4. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The variations in extinction and microphysical properties in the upper haze of Venus have a significant impact on the chemistry and radiative balance of its atmosphere. In order to study their spatial and temporal distribution, we analyzed solar occultation data from the Venus Express SPICAV SOIR instruments between 2006 and 2013. To remove the absorption effects of the middle and upper atmosphere of Venus, we used MODTRAN modeling. Then, we retrieved the extinction profiles of the upper haze between 67-92 km using the onion-peeling method. Our findings are as follows: 1) The extinction coefficient of the upper haze generally decreases with increasing altitude, but there are significant variations between different regions. In low latitudes, the extinction increased sharply early in the mission, and the

收稿日期: 2023-10-30, 修回日期: 2024-01-09

Received date: 2023-10-30, Revised date: 2024-01-09

基金项目: 航天科技创新应用研究项目 (E23Y0H555S1); 航空科技创新应用研究项目 (62502510201)

Foundation items: Supported by Aerospace Science and Technology Innovation Application Research Project (E23Y0H555S1); Aviation Science and Technology Innovation Application Research Project (62502510201)

作者简介 (Biography): 李宜奇 (1997-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究领域为金星云和霾的光学特性和行星大气的偏振辐射传输。
E-mail: lyq9710@mail.ustc.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

average extinction coefficient of the haze showed minimal changes between day and night. The vertical optical depth of the haze layer was approximately 10^{-2} . 2) The number density of the upper haze decreases with increasing altitude. From the south to the north pole, the number density first increases and then decreases. 3) The cloud top altitude is higher in low-latitude regions at 82.7 ± 5.8 km, while in polar regions, it is lower with the northern polar region at 73.3 ± 2.4 km and the southern polar region at 79.5 ± 3.5 km. The average scale height of the upper haze layer in the northern polar region is 4.0 ± 0.9 km.

Key words: Venus atmosphere, upper haze, MODTRAN modeling, onion-peeling method, extinction coefficient, number density

引言

金星有着太阳系四颗类地行星中最浓厚的大气层,其中超过96%都是 CO_2 。其表面被厚云所覆盖。金星主云层分布在距地表47~70 km高度处,在其上方和下方有较薄的霾。早期的地面旋光观测表明,云顶的颗粒呈球形,半径约为1 μm 。Venera 9号和Venera 10号着陆器以及四个先锋金星(Pioneer Venus)轨道器上的仪器可同时对金星云的垂直结构和霾粒的尺寸分布进行原位测量。Esposito等人^[1]发现主云层由三个不同的层组成。即上层云(57~70 km)、中层云(49~57 km)和下层云(47~49 km),云层上下有弥散的霾层。硫酸气溶胶是各云层的主要成分,但各层中气溶胶的粒径分布不同。先锋金星轨道器上的光度偏振计(OCPP)测量表明,上层霾主要由非常小的“模式1”颗粒组成,其平均半径在0.25~0.4 μm 之间。先锋金星轨道器上用于测量颗粒尺寸和形状的云颗粒尺寸光谱仪(LCPS)显示,低层的霾也主要由这些粒子组成。上层云主要由第二种粒子类型组成,称为“模式2”,其平均半径约为1 μm ,但也包含大量模式1粒子。第三种粒子类型“模式3”是中层云和下层云的主要组成部分。它由相对较大的颗粒组成,平均半径约为3.85 μm ,而一些颗粒的半径高达35 μm 。模式3可能具有成分不确定的结晶颗粒。

了解上层霾的变化对于金星中间层的化学和辐射平衡具有重要意义^[2]。金星的上层霾位于上层云之上,范围从云顶(70 km)到90 km^[1]。1974年Hansen和Hovenier^[3]发现云层内存在有效半径约为1.05 μm 的颗粒。就折射率而言,这些颗粒很可能由浓硫酸组成^[1]。这种浓硫酸形成于紫外线引发的光化学反应,反应物包括 SO_2 、 CO_2 和 H_2O 。紫外线分解 CO_2 产生CO和氧原子,与大气中的 SO_2 反应形成 SO_3 ,再与水蒸气结合生成硫酸。霾产生机制尚不清楚,Takagi^[4]等人提出SO和 SO_2 向上输送,经光解反应形成高海拔区域的霾。霾颗粒源以大于云层沉

降速度的速度向上输送,与其他化合物反应产生SO和 SO_2 ,后通过一系列化学反应形成新的霾。先锋金星的测量表明,云层内部和云层上方存在第二种较小颗粒,其有效半径约为0.25 μm 。Kawabata等人^[5]发现霾颗粒在550 nm处的折射率为 1.45 ± 0.04 ,其有效半径 r_{eff} 为 0.23 ± 0.04 μm ,有效方差 v_{eff} 为 0.18 ± 0.10 。通过先锋金星的测量发现,在金星极地区域,波长365 nm处主云层上方霾的光学厚度约为0.83。相比之下,低纬度主云层上方霾的光学厚度为0.06。Sato等人^[6]对先锋金星2820天的数据进行了更详细的分析,发现亚微米霾呈现出较大的时间和空间变化。在北极地区,霾颗粒的有效半径为 0.25 ± 0.05 μm ,波长550 nm处的折射率为 1.435 ± 0.02 。在南极地区,霾颗粒的有效半径为 0.29 ± 0.02 μm ,波长550 nm处的折射率为 1.45 ± 0.02 。即南极地区的霾粒径比北极稍大。

2005年欧空局发射的金星快车(VEX)航天器上的几台仪器已经在广泛的波长范围内积累了金星大气层的新数据,其上的金星大气特征调查光谱仪(SPICAV/SOIR)能够研究主云层上方的霾。它具有三个工作模式:紫外(UV)、红外(IR)、太阳掩星红外(SOIR),可提供三个光谱范围(200~300 nm, 0.65~1.7 μm 和2.2~4.3 μm)的掩星测量。Wilquet^[7]等人基于2006~2010年SOIR仪器的数据,分析了金星上层霾在时间和空间上的变化,结果表明上层霾的消光系数存在短期(几个地球日)和长期(80个地球日)变化,并具有纬度依赖性。Luginin等人^[8]基于SPICAV IR数据,分析得出上层霾的气溶胶标高约为 3.3 ± 0.7 km,单峰模式下霾粒子的有效半径 $r_{\text{eff}} = 0.54 \pm 0.25$ μm ,并且极区的粒子半径比非极区的粒子半径小1.5~2倍。Takagi等人^[4]则利用SOIR太阳掩星观测数据研究了90 km以上金星霾层的消光特性,发现无论是低纬度还是高纬度地区,归一化消光系数都随着高度超过90 km而增加,这可能与SO和 SO_2 气体的垂直廓线有关。

目前,国内对金星中上层大气的理论模拟较少,且缺乏完整的数据支持。本研究的重点是对2006年5月~2013年9月期间226次SPICAV SOIR太阳掩星数据进行分析,利用MODTRAN模型建立金星中上层大气透过率查找表,并对金星上层霾消光和微物理特性的时空分布进行全纬度长时间的定量分析,为后续金星中上层大气的辐射传输模拟提供数据支持。

1 SOIR 仪器和数据

SOIR 仪器是金星快车航天器上 SPICAV/SOIR 仪器套件的一个通道,其本质上是一款紧凑型星载高分辨率红外阶梯光栅光谱仪。它仅重 6.5 千克,体积为 414 mm×254 mm×210 mm。SOIR 旨在利用掩星方法探测金星大气层。Nevejans 等人^[9]、Bertaux 等人^[10]和 Mahieux 等人^[11]详细描述了该仪器的功能和特性。这里仅进行简要描述。该仪器在红外波段(2.2~4.3 μm)下运行,对应波数范围 4400 cm⁻¹~2200 cm⁻¹,其光谱分辨率在 0.1~0.19 cm⁻¹之间变化。AOTF 的 FWHM(半高全宽)约为 24 cm⁻¹。SOIR 使用的衍射级从 101 到 194 不等。为了选择所需的阶梯光栅衍射级,声光可调谐滤波器 AOTF 位于仪器的入口狭缝之外。通过调谐 AOTF 并选择适当的射频激励以获得所需的衍射级波长,即可完成衍射级选择。

太阳掩星技术原理是将透过行星大气层观察太阳时测量的光谱除以行星大气层外参考光谱,以获得大气层的透过率。SOIR 使用的太阳掩星技术可以推导出有关金星大气和云的垂直结构、成分等独特信息。SOIR 在太阳掩星模式下运行,即仪器的视线(line of sight, LOS)始终指向太阳。当金星快车沿着其轨道移动时,LOS 以连续的切线穿过金星大气层。由于航天器沿轨道运动,仪器对不同切点高度的行星大气层进行探测。可以观察到两种不同的情况:入口情况(切点高度随时间减小)和出口情况(切点高度随时间增加)。为简单起见,这里仅描述入口情况。出口情况可被视为过程相反的入口情况。图 1 显示了太阳掩星观测的几何结构。

在一次掩星测量过程开始前,SOIR 仪器开启,经过预冷却阶段以确保探测器温度达到约 70 K 的工作值,在视线穿过大气层之前开始记录太阳光谱。根据 Hedin 等人^[12]的研究结果,金星大气层的高度可达 220 km。该程序开始得足够早,对应于远高于 220 km 的切点高度,以获得至少 40 个在大气

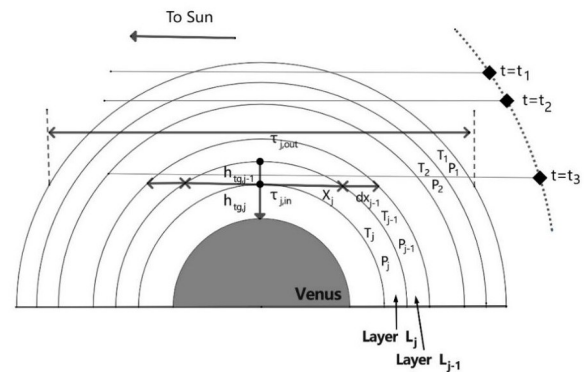


图1 太阳掩星观测示意图

Fig 1 Schematic diagram of solar occultation observation

层外拍摄的光谱。对低于 220 km 的切点高度,大气透过率的计算方法是将当前记录的光谱除以参考太阳光谱。

在一次掩星测量过程开始时,光路不会穿过金星大气层,切点高度 H_{ig} 约为 220 km。此时不存在大气对阳光的吸收,透过率 T_{obs} 等于 1。随着金星快车仪器下行,光路越来越深入大气层,并发生两种吸收过程:金星上层霾引起的吸收和 CO₂ 等气体的吸收。随着仪器继续下行,阳光将完全被云层所遮挡,透过率约为 0,此时一次掩星活动结束。

如图 2 所示,太阳光谱已从观测光谱中去除。研究发现,无论高空观测如何,观测到的透过率的标准偏差都足够小,足以分离不同高度观测到的透过率。图 3 显示了本研究中使用的 226 次掩星测量随纬度和轨道号的分布情况。

2 分析方法

2.1 金星中上层大气气体透过率计算——MODTRAN 建模

为了计算上层霾的消光廓线,需要从观测的透过率中去除金星大气分子(CO₂、H₂O、SO₂等)造成的气体吸收效应。如式(1)所示,霾透过率 T_{haze} 为观测透过率 T_{obs} 除以气体透过率 T_{gas} 。其中气体透过率 T_{gas} 利用 MODTRAN 辐射传输模型进行计算。本研究中分子吸收计算未考虑散射效应。与可见波长相比,红外波长的光散射性较差。对于瑞利散射,在 90 km 高度处,CO₂ 数密度约为 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ^[13],在 3 μm 处 CO₂ 的分子散射截面为 $5.0 \times 10^{-30} \text{ cm}^2$ ^[14]。已知金星半径为 6051.8 km,上层霾分布在 70~95 km 范围内^[8],上层霾以上的大气吸收微乎其微。金星大气层顶高度(TOA)可设置为 100 km。由几何关

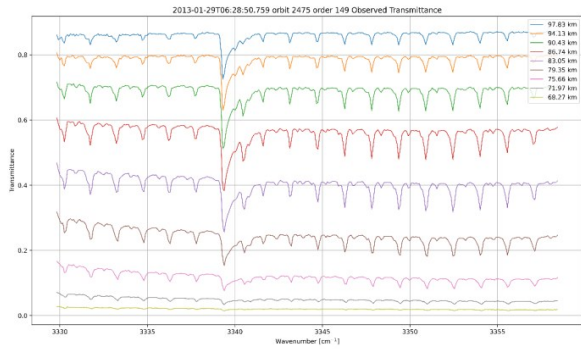


图2 在一次掩星期间获得的光谱示例(2013年1月29日,所选衍射级 order 为 149,轨道号为 2475)。通过计算透过金星大气层看到的太阳光谱与在大气层上方测量的未衰减太阳光谱的比率来获得每个透过率。

Fig 2 Example of a spectrum obtained during an occultation (January 29, 2013, selected diffraction order order 149, orbit number 2475). Each transmittance is obtained by calculating the ratio of the solar spectrum seen through Venus' atmosphere to the unattenuated solar spectrum measured above the atmosphere.

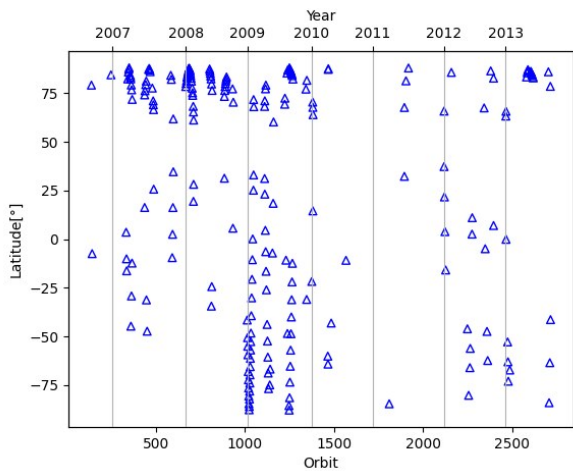


图3 三角形(Δ)表示一次太阳掩星。观测到的掩星总数为 226 个。这些数据大部分是 2006 年至 2013 年在高纬度地区获得的。

Fig 3 The triangle (Δ) represents a solar occultation. The total number of observed occultations is 226. Most of these data were obtained from 2006 to 2013 at high latitudes.

系得,大气中的光路长度约为 7.01×10^7 cm。因此,在 90 km 处的瑞利光学厚度估计为 3.5×10^{-7} ,可忽略不计。

$$T_{haze} = \frac{T_{obs}}{T_{gas}}, \quad (1)$$

MODTRAN^[15]是一种广泛使用的辐射传输(RT)代码,用于计算地球大气层的辐射传输。然而,

MODTRAN 中使用的辐射传输算法通常适用于任何层状大气,并且原则上可以应用于任何行星大气。Bernstein 等人^[16]利用 MODTRAN 辐射传输模型建立了海王星上层大气模型,其中主要吸收气体是 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 C_2H_2 ,以解释在海王星极冷的高层大气中形成的主成分为 CH_4 和 C_2H_6 的云和霾。本研究通过修改 MODTRAN 模型参数,自定义大气廓线,建立适用于金星的中上层大气透过率查找表。其中金星大气的主要吸收气体是 CO_2 ,占金星大气总含量的 96.5%,其吸收带位于 SOIR 的测量波段范围内,是建模首要考虑的吸收气体。除此之外,金星大气中含有许多微量气体,如 H_2O 、 CO 、 SO_2 、 OCS 、 HCl 等,也会对气体总透过率产生影响,建模考虑的吸收气体成分和气体混合比见表 1,其中气体混合比数据来自 Marcq 等人^[17]的研究。

金星的大气廓线参考 VIRA^[18](金星国际参考大气),从中获取金星中上层大气的温度和压强信息。建模从 60 km 开始,因为此时气体和气溶胶的对阳光的吸收过强,太阳光几乎不能透过金星大气。根据 VIRA 分层设置金星中上层大气的温度 T 和压强 P ,气体混合比在各层保持不变。采用相关 k 分布方法计算气体分子吸收截面,光谱分辨率 0.1 cm^{-1} ,小于 SOIR 仪器的光谱分辨率。气体参数取自 MODTRAN 内置的 HITRAN 2008 数据库^[19]。层间隔 2 km,直至 100 km,共 21 层。仪器狭缝函数设置为三角形函数^[4],通过 Voigt 卷积计算得金星的中上层气体透过率。

观测几何选择如图 4 所示,选择“Slant Path to Space”模式,该模式适用于掩星观测,通过设置观测高度 H_1 和切点高度 H_{min} 来定义一条斜向光学路径。本研究中,设置 $H_1 = 100$ km,为大气建模的 TOA 高度。 H_{min} 为 SOIR 仪器逐渐下行所测量的切点高度 h_{ig} 。完成这些设置后,即可建立金星的中上层大气透过率 T_{gas} 查找表。图 5 显示了 90 km 处 MODTRAN 计算的金星中上层气体透过率,波数范围对应于衍射级为 149 时 SOIR 仪器的波数范围。从图 6 可以看出,气体透过率折线应位于观测透过率折线上方,计算霾透过率时应尽量避开气体强吸收带,以减小误差。

2.2 金星上层霾消光特性的反演

每次太阳掩星测量对应特定的切点高度。如图 1 所示,在入口情况下,掩星活动期间切点高度 h_{ig} 随着时间的推移而减小。第 j 次测量对应切点高度

表 1 金星大气吸收气体成分和混合比

Table 1 Venus atmosphere absorption gas composition and mixing ratio

金星大气层吸收气体成分	Mixing Ratio
CO ₂	96.5%
H ₂ O	31.18 ppmv
CO	21.53 ppmv
SO ₂	127.053 ppmv
HCl	0.4 ppmv
OCS	7.1 ppmv

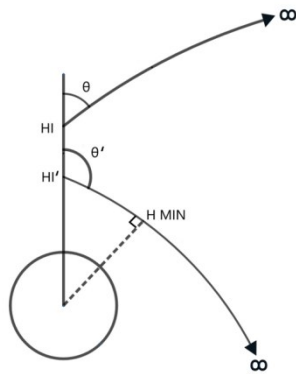


图 4 “Slant Path to Space”观测几何示意图

Fig 4 “Slant Path to Space” observation geometry diagram

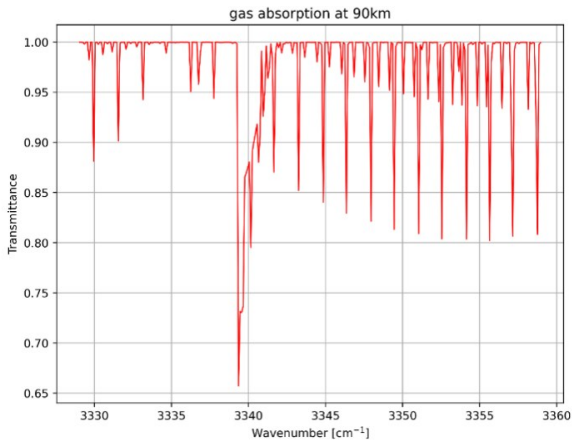


图 5 90 km 处 MODTRAN 计算的金星中上层气体透过率 (order 149)

Fig 5 Gas transmittance in the middle and upper layers of Venus calculated by MODTRAN at 90 km (order 149)

$h_{lg,j}$ 。两次连续测量的切点高度 $h_{lg,j-1}$ 和 h_{lg} 之间的区域定义了大气层第 j 层 (L_j)。 τ_j 对应于第 j 次观测路径上的水平光学厚度,光学路径包括层 L_j 和所有位于第 j 层上的大气层,定义为:

$$\tau_j = -\ln(T_{haze,j}) \quad , \quad (2)$$

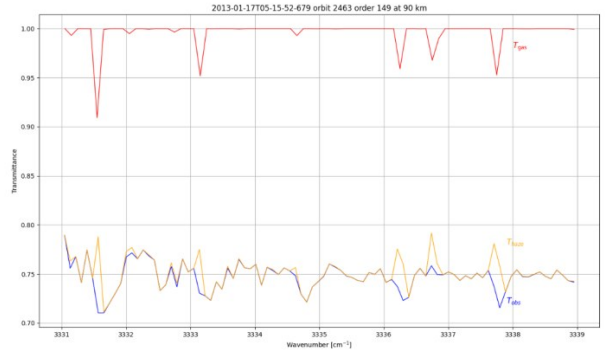


图 6 气体透过率 (T_{gas} , 红色折线)、观测透过率 (T_{obs} , 蓝色折线) 和霾透过率 (T_{haze} , 黄色折线) 的示例, 对应 2013 年 1 月 17 日获得的观测结果。(order 149, orbit 2463)

Fig 6 Examples of gas transmittance T_{gas} (red broken line), observed transmittance (T_{obs} blue broken line) and haze transmittance (T_{haze} yellow broken line), corresponding to the observation results obtained on Jan 17, 2013. (order 149, orbit 2463)

式(2)中, $T_{haze,j}$ 为(1)式中的 T_{haze} , 对应第 j 条观测路径。 $\tau_{j,in}$ 是第 j 层 (L_j) 的水平光学厚度, 可以由剥洋葱法计算得出:

$$\tau_{j,in} = \tau_j - \sum_{i=1}^{j-1} 2dx_i \times k_i \quad , \quad (3)$$

式(3)中, k_i 是第 i 层的气溶胶消光系数, dx_i 是第 i 层的水平路径长度, L_i 层位于 L_j 层外部。由于切点两侧的对称性, 第 j 层的局部消光系数 k_j 可以通过 $\tau_{j,in}$ 除以 2 倍的第 j 层局部光学路径长度 x_j 得到:

$$k_j = \frac{\tau_{j,in}}{2 \cdot dx_j} \quad , \quad (4)$$

重复上述过程, 可以计算得出各层的气溶胶消光系数, 即获取上层霾的消光廓线。图 6 展示了单轨消光廓线的计算结果。消光系数误差由式(5~7)确定:

$$\Delta\tau_j = \frac{\Delta T_{haze,j}}{T_{haze,j}} \quad , \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{j,in} = \sqrt{(\Delta\tau_j)^2 + (\sum_{i=1}^{j-1} (2dx_i \times \Delta k_i))^2} \quad , \quad (6)$$

$$\Delta k_j = \frac{\Delta\tau_{j,in}}{2 \cdot dx_j} \quad , \quad (7)$$

式(5)中, $\Delta T_{haze,j}$ 为测量误差, 该项可以从 SOIR 观测数据中获得, 其范围在 0.02%~0.12%, 而由于误差通过式(6)进行逐层累积, Δk_j 的值会比 $\Delta T_{haze,j}$ 大很多, 约为 35%。霾层的垂直光学厚度利用公式(8)计算:

$$\tau_{vert} = \int k_j dz \quad , \quad (8)$$

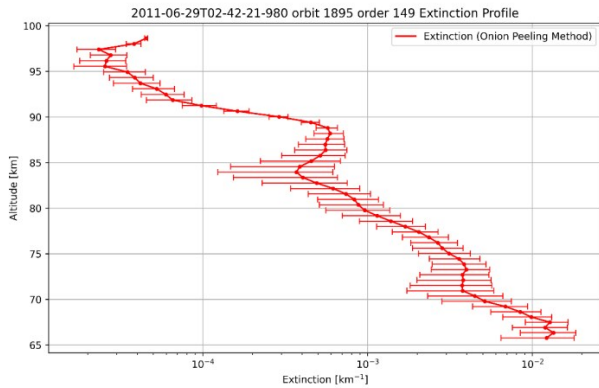


图7 2011年6月29日(order 149 orbit 1895)剥洋葱法反演的消光廓线示例,消光系数平均误差为35.24%

Fig 7 Example of the extinction profile inverted by the onion peeling method on June 29, 2011 (order 149 orbit 1895), the average error of the extinction coefficient is 35.24%

2.3 金星上层霾微物理特性的反演

反映金星上层霾微物理特性的参数,如霾粒子的数密度等,可由2.2节获得的消光系数 k_i 推导得出。在切点高度 h_{ig} 处,波长为 λ 的消光系数 $k_i(\lambda, z)$ 由式(9)给出:

$$k_i(\lambda, h_{ig}) = N(h_{ig}) \int \sigma_{ext}(\lambda, r) n(r, h_{ig}) dr, \quad (9)$$

其中, $\sigma_{ext}(\lambda, r)$ 是消光截面, $N(h_{ig})$ 是粒子数密度, $n(r, h_{ig})$ 是粒子谱分布。将霾粒子实际考虑为球形的气溶胶颗粒,其消光截面根据经典的Mie理论进行建模计算。本研究从Hansen和Hovenier^[3]的研究结果中选择75% H_2SO_4 的浓度值,对应的折射率的实部和虚部源值自Hummel^[20]等人的研究结果,涵盖了SOIR仪器的光谱范围,如图8所示。

有几种分布可用于描述云和霾颗粒的尺寸分布。Hansen和Travis^[21]研究了使用不同尺寸分布的非偏振入射光单次散射对偏振的影响。他们发现测试的几种尺寸分布之间只有很小的差异。Hansen和Hovenier^[3]利用伽马分布来描述金星云和霾颗粒,而Marcq等人^[22]则采用对数正态分布来描述。本研究中霾粒子谱分布采用对数正态单峰分布,其表达式如式(10)所示。根据Luginin等人^[8]的研究结果,上层霾中“模式2”粒子数密度很小,在90 km高度处仅 0.1 cm^{-3} ,可忽略不计,故假设上层霾中只存在“模式1”粒子,根据Kawabata等人^[5]的研究结果设置有效半径 $r_{eff} = 0.23 \mu\text{m}$,有效方差 $v_{eff} = 0.18$,有效半径 r_{eff} 与平均半径 v_{eff} 的转换关系及有效方差 v_{eff} 和标准差 σ_g 的转换关系如式(11)所示。

$$n(r) = \frac{const}{r} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_{g_0})^2}{2 \ln^2 \sigma_{g_0}}\right), \quad (10)$$

$$r_{eff} = r_g \exp\left(\frac{5}{2} \ln^2 \sigma_g\right), v_{eff} = \exp(\ln^2 \sigma_g) - 1, \quad (11)$$

在确定粒子谱分布之后,即可计算霾粒子的数密度,如式(12)所示:

$$N(h_{ig}) = \frac{k_i(\lambda, h_{ig})}{\int_0^\infty \sigma_{ext}(\lambda, h_{ig}) n(r, h_{ig}) (dr)}, \quad (12)$$

金星云顶高度定义为单位光学厚度处的大气高度^[2],即水平光学厚度 $\tau_j = 1$ 处的切点高度。霾层的标高可通过拟合指数函数来计算,如式(13)所示:

$$k_i(\lambda, h_{ig}) = C \cdot e^{-h_{ig}/H}, \quad (13)$$

式(13)中, C 为常数, h_{ig} 为切点高度, H 为霾层标高。

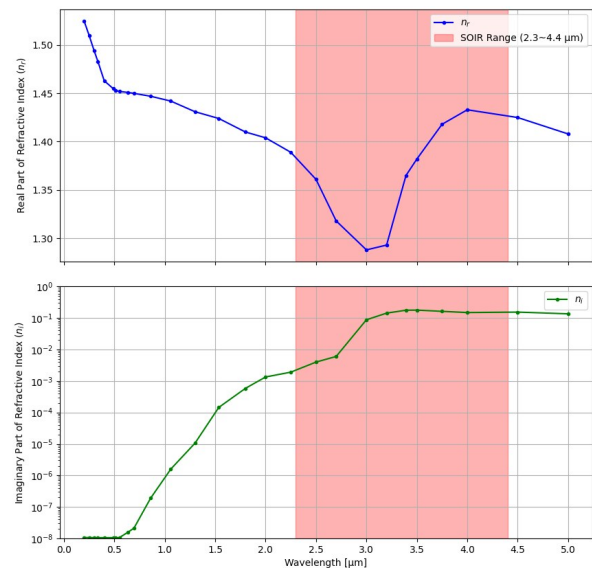


图8 75% H_2SO_4 的折射率在温度 $T = 220 \text{ K}$ 时的复折射率。SPICAV SOIR 光谱范围用阴影表示

Fig 8 Complex refractive index of the refractive index of 75% H_2SO_4 at temperature $T = 220 \text{ K}$. SPICAV SOIR spectral range shaded

3 结果与讨论

八年的金星快车任务揭示了上层霾的短期和长期变化。SOIR仪器光谱范围为 $2.3 \sim 4.4 \mu\text{m}$,对应衍射级101~190。Wilquet等人^[7]发现消光系数几乎没有表现出光谱依赖性,即相邻衍射级之间消光系数非常相近。本文选取了2006~2013年8年间衍射级为149的SOIR数据,对应波长约为 $3 \mu\text{m}$ 。在该衍射级附近观测数据较充分,利于数据分析处理。

计算的消光系数结果如图9所示。为了总结规律,将研究区域划分为北极地区($60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$)、南极地区($60^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$)、中纬度地区($30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 和 $30^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{S}$)、低纬度地区($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$)。研究的金星大气层高度从67 km到92 km,涵盖了上层霾分布的范围。研究内容包括金星上层霾的消光系数、光学厚度、数密度、标高以及云顶高度随纬度和时间的变化。

3.1 金星上层霾消光特性的时空分布

图9展示了8年间上层霾的消光廓线。从图9可看出,SOIR仪器在北极地区的观测比较密集,2006年由于金星快车刚进入轨道,故观测数较少。2007~2009年观测数较多,其余年份观测数大致相当。金星上层霾的消光系数总体趋势是随着高度增加,霾的消光系数减少。部分轨道消光系数并非随着高度增加而递减,消光廓线会在83 km等高度附近折叠。在北极地区高度70 km高度处,霾的消光系数约为 10^{-2} km^{-1} ,而高度升至90 km时,消光系数约为 10^{-4} km^{-1} ,相对降低了两个数量级。而在中低纬地区高度70 km处,消光系数约为 10^{-2} km^{-1} ,当高度升高为90 km时,消光系数接近 10^{-3} km^{-1} ,相对降低了一个数量级。不同区域间的消光系数变化也较大,中低纬地区消光系数总体大于极地地区消光系数,而低纬地区又略大于中纬地区,南极地区又略大于北极地区。在金星快车的前1000次绕行过程中(对应2006~2009年),低纬度地区霾的消光系数增加了约一个数量级。此外,还观察到高度90公里以上的地区也存在霾,其消光系数范围在 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{ km}^{-1}$ 之间。

图10展示了8年间上层霾的消光系数随纬度、轨道号、高度的变化趋势。从图中可看出,8年间观测集中在北极地区,即 $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 的范围内,主要包括前1000轨的测量。观察上层霾的消光系数随纬度的变化可发现,在相同高度下,中低纬地区的消光系数比北极地区大,上层霾的消光系数从赤道到北极地区总体呈现递减趋势,但在 25°N 附近具有极大值。北极地区的消光系数从 $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 也呈现递减趋势。南极地区观测数据较少,区域内不具有明显的趋势变化,但消光系数总体也小于中低纬地区。观察上层霾的消光系数随高度的变化可发现,消光系数随高度的增加而减少,相同高度下中低纬地区的消光系数大于极地地区,北极地区的消光系数在高度75 km处才到达 10^{-3} km^{-1} 的量级,而

中低纬地区到达该量级则在80 km以上。

为研究上层霾的消光系数在长时间尺度上的变化,且由于北极地区观测数据较充分,选择 $70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 和 $80^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 的区域,分别在75 km和85 km高度处进行研究。消光系数的区域计算结果如图11所示。从图中可以看出,上层霾的消光系数随时间变化的规律不明显。在 $70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 区域内,霾的消光系数开始呈现上升趋势,在2007年中期达到最大值,之后消光系数开始减少,直至2008年底。2009~2010年消光系数呈现先上升后下降的趋势。在75 km处,平均消光系数为 $2.4\times 10^{-3}\text{ km}^{-1}$,而在85 km处,平均消光系数为 $2.7\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$,降低了约9倍。在 $80^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 区域内,霾的消光系数开始也呈现上升趋势,但在2007年中有所下降,随后又有所增加。2008~2010年缓慢下降,此后霾的消光系数变化较平稳,在75 km处维持在 10^{-3} km^{-1} 附近,在85 km处维持在 10^{-4} km^{-1} 附近。此区域内,75 km处平均消光系数为 $1.5\times 10^{-3}\text{ km}^{-1}$,而85 km处平均消光系数为 $2.0\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$,降低了约8倍。

这说明了随着高度增加,消光系数会随之减小,每上升10 km高度,平均消光系数降低约一个数量级。比较北极地区同一高度处数据可发现,纬度越高,平均消光系数越小。

此外,在金星快车任务刚开始时,低纬度的霾的数量呈现上升趋势。具体表现在前1000轨的观测中,上层霾的消光系数显而易见地增加。如图12所示,在低纬度区域($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$)75 km高度处霾的消光系数从第141轨的 $9.8\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$ 到第932轨的 $6.7\times 10^{-3}\text{ km}^{-1}$,增大了约7倍。85 km高度处霾的消光系数从第141轨的 $1.5\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$ 到第710轨的 $3.2\times 10^{-3}\text{ km}^{-1}$,增大了约21倍。即2006年至2013年期间,除了低纬度霾在任务开始时大幅增加外,上层霾没有表现出明显的系统性或周期性变化。

为研究上层霾消光系数和霾层光学厚度的短期变化(如昼夜变化),将SOIR数据集划分为晨间掩星和夜间掩星两种类型,以金星本地时作为参考,观测时间在本地球时6点附近的归为晨间掩星,在本地球时18点附近的归为夜间掩星。图13展示了2006~2013年间226轨数据的纬度和昼夜分布。从图中可看出,晨间掩星和夜间掩星观测总数大致相当,分别为126轨和100轨,中低纬观测集中在6点和18点,即太阳升起和落下时,而高纬度观测时间则分布较广。

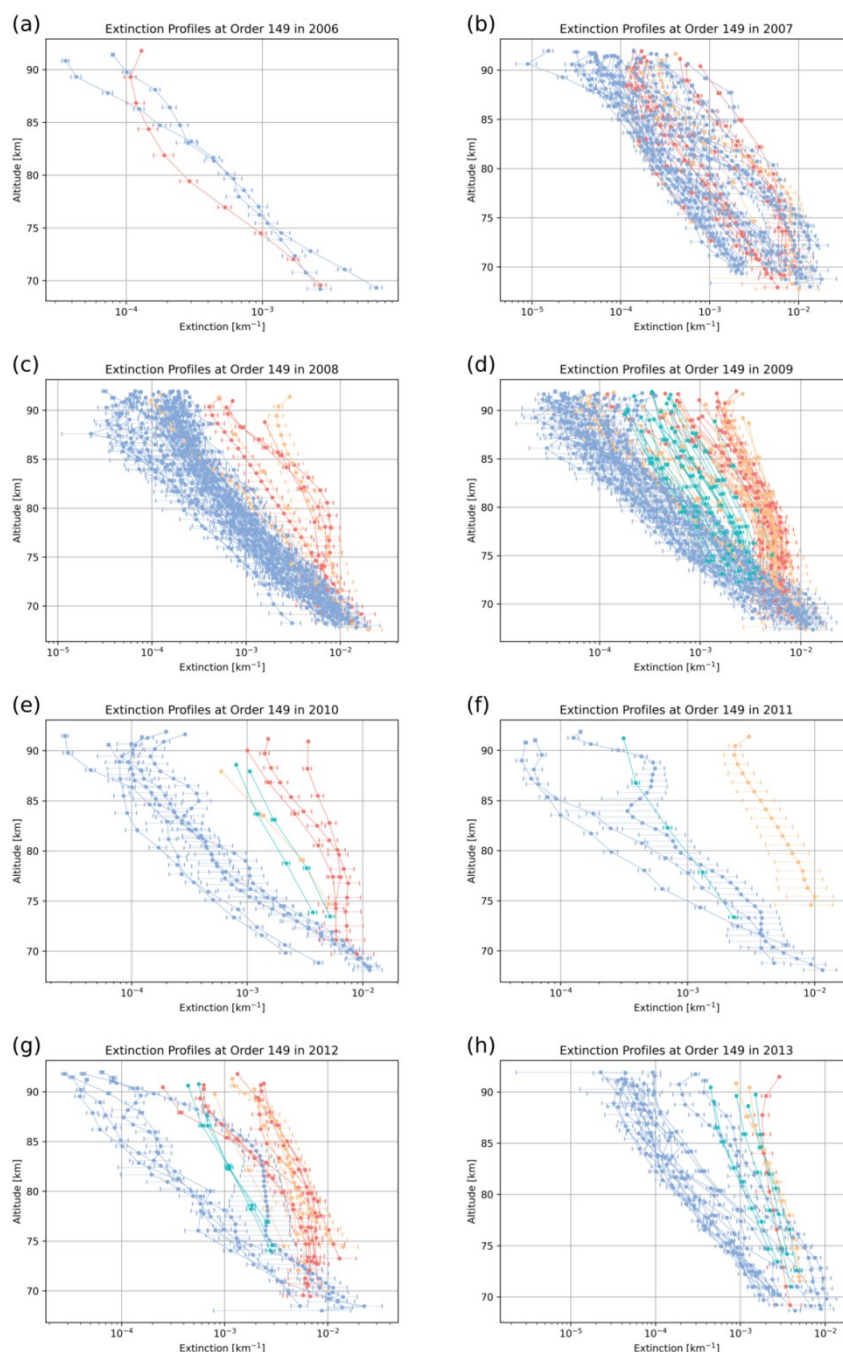


图9 2006~2013年金星上层霾的消光廓线(蓝色折线代表北极地区,绿色折线代表南极地区,橙色折线代表中纬度地区,红色折线代表低纬度地区,衍射级为149);图(a)~(h)分别表示2006~2013年金星上层霾的消光廓线

Fig 9 Extinction profile of the upper haze on Venus from 2006 to 2013 (the blue polyline represents the Arctic region, the green polyline represents the Antarctic region, the orange polyline represents the mid-latitude region, and the red polyline represents the low-latitude region, the diffraction order is 149); Figs (a) ~ (h) represent the extinction profiles of Venus' upper haze from 2006 to 2013 respectively.

图14展示了80 km高度处金星上层霾的消光系数随昼夜和纬度的变化。可看出霾的消光系数在赤道附近较高,极区附近较低,从南极到北极消光系数总体呈现先增加后减小的趋势。晨间和夜间霾的平均消光系数分别为 $1.6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 、 $2.0 \times$

10^{-3} km^{-1} ,夜间霾的消光系数比晨间大25%。在低纬度地区,晨间和夜间霾的平均消光系数分别为 $3.95 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 、 $3.93 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$;在北极地区,晨间和夜间霾的平均消光系数分别为 $7.0 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$ 、 $6.5 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$;在 $30^\circ \text{S} \sim 60^\circ \text{S}$ 区域内,晨间和夜间霾的平

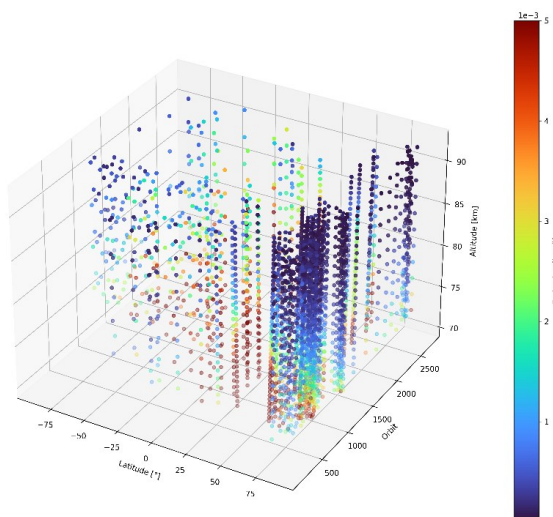


图 10 2006~2013 年金星上层霾的消光系数随纬度、轨道号、高度的变化

Fig 10 Changes in the extinction coefficient of Venus' upper haze with latitude, orbit number, and altitude from 2006 to 2013

均消光系数分别为 $2.1 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 、 $3.8 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ ；在 $30^\circ \text{N} \sim 60^\circ \text{N}$ 区域内，晨间和夜间霾的平均消光系数分别为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 、 $5.4 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ ；在南极地区，晨间和夜间霾的平均消光系数分别为 $1.3 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ 。即低纬度地区昼夜间霾的平均消光系数几乎没有变化，极区夜间霾的平均消光系数略

大于晨间霾的平均消光系数，而中纬度夜间霾的平均消光系数约是晨间的 2 倍。

在 70~90 km 区域内，霾层的垂直光学厚度随纬度和昼夜的变化如图 15 所示。可以发现霾层光学厚度的分布与消光系数的分布具有较高相似性，即霾层的垂直光学厚度在赤道附近较高，极区附近较低，从南极到北极光学厚度总体呈现先增加后减小的趋势。晨间和夜间霾层的平均垂直光学厚度分别为 0.0279、0.0344，夜间霾层的平均垂直光学厚度比晨间大 23%。

若以云顶高度(平均高度大于 80 km)定义上霾层的起始高度，则计算的上霾层的垂直光学厚度如图 16 所示。可以看到，上霾层的垂直光学厚度随纬度和昼夜变化不大，数量级在 10^{-2} 附近。其中晨间光学厚度为 0.0105，夜间光学厚度为 0.0102。

3.2 金星上层霾数密度的空间分布及敏感性分析

图 17 展示了 2006~2013 年间金星上层霾数密度的空间分布情况。可以看出，上层霾的数密度随高度增加而减小，在 70 km 处，上层霾的平均数密度约为 330 cm^{-3} ；在 80 km 处，平均数密度减小至 150 cm^{-3} ，在 90 km 处继续减小至 40 cm^{-3} 。从南极到北极，上层霾的数密度呈现先增加后减小的趋势。在 80 km 高度处，南极地区上层霾的平均数密度约为

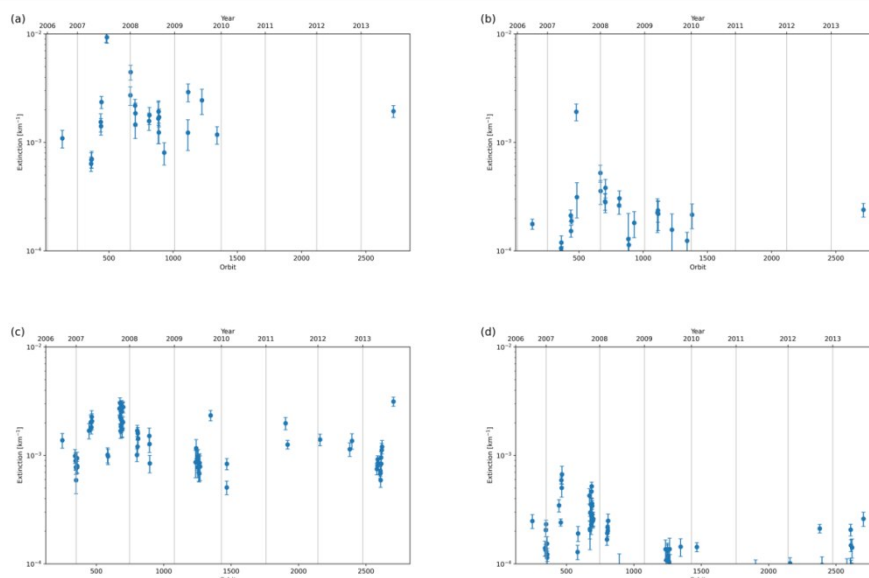


图 11 2006~2013 年金星北极地区上层霾的消光系数随时间的变化：(a) 研究区域在 $70^\circ \text{N} \sim 80^\circ \text{N}$ ，高度 75 km 处；(b) 研究区域在 $80^\circ \text{N} \sim 90^\circ \text{N}$ ，高度 75 km 处；(c) 研究区域在 $70^\circ \text{N} \sim 80^\circ \text{N}$ ，高度 85 km 处；(d) 研究区域在 $80^\circ \text{N} \sim 90^\circ \text{N}$ ，高度 85 km 处

Fig 11 Changes of the extinction coefficient with time in the upper haze in the Arctic region of Venus from 2006 to 2013: (a) The study area is between $70^\circ \text{N} \sim 80^\circ \text{N}$ and an altitude of 75 km; (b) The study area is between $80^\circ \text{N} \sim 90^\circ \text{N}$ and an altitude is 75 km; (c) The study area is between $70^\circ \text{N} \sim 80^\circ \text{N}$, at an altitude of 85 km; (d) The study area is between $80^\circ \text{N} \sim 90^\circ \text{N}$, at an altitude of 85 km

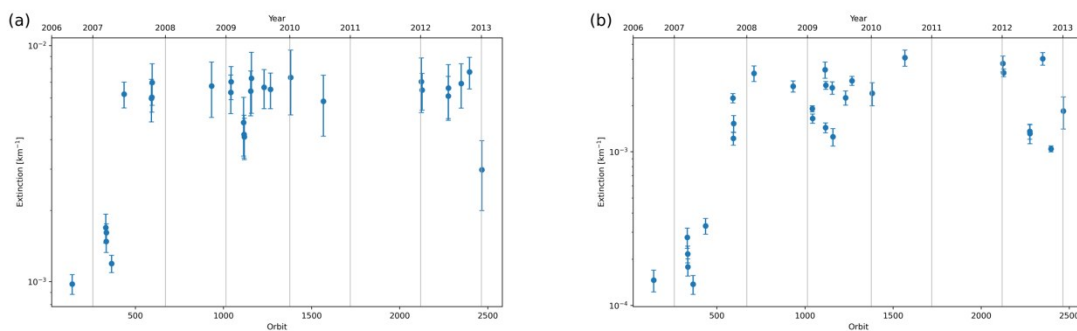


图 12 2006~2013 年金星低纬度地区上层霾的消光系数随时间的变化:(a) 研究区域在 20 °S~20 °N,高度 75 km 处;(b) 研究区域在 20 °S~20 °N,高度 85 km 处

Fig 12 Changes in the extinction coefficient with time of the upper haze in the low latitudes of Venus from 2006 to 2013: (a) The research area is at 20 °S~20 °N, at an altitude of 75 km; (b) The research area is at 20 °S~20 °N, at an altitude of 85 km

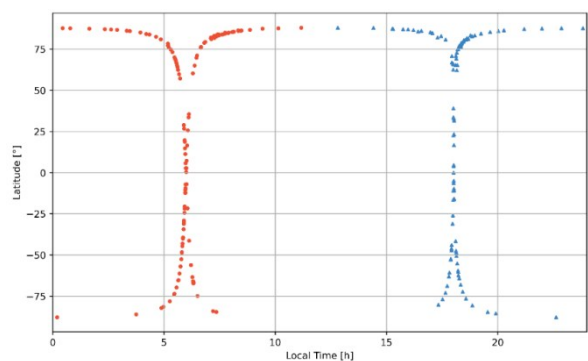


图 13 2006~2013 年间 226 轨数据的纬度和昼夜分布(红色圆代表晨间掩星,蓝色三角形代表夜间掩星)

Fig 13 Latitude and diurnal distribution of 226 orbit data from 2006 to 2013 (red circles represent morning occultations, blue triangles represent night occultations)

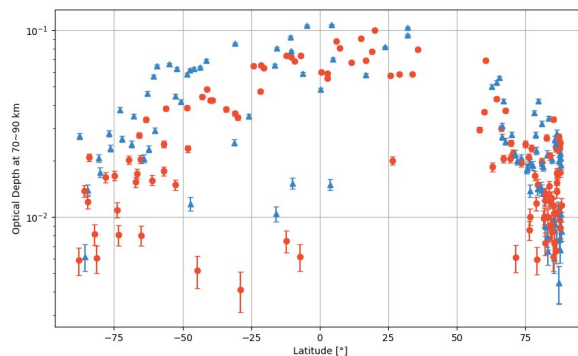


图 15 2006~2013 年间金星上层大气 70~90 km 处霾层垂直光学厚度随纬度和昼夜的变化(红色圆代表晨间掩星,蓝色三角形代表夜间掩星)

Fig 15 Changes in the vertical optical thickness of the haze layer at 70~90 km in the upper atmosphere of Venus with latitude and day and night from 2006 to 2013 (red circles represent morning occultations, blue triangles represent night occultations)

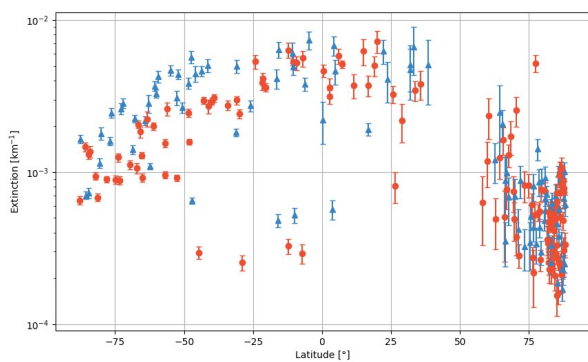


图 14 2006~2013 年间金星上层霾的消光系数随纬度和昼夜的变化(红色圆代表晨间掩星,蓝色三角形代表夜间掩星)

Fig 14 The extinction coefficient of Venus' upper haze changes with latitude and day and night from 2006 to 2013 (red circles represent morning occultations, blue triangles represent night occultations)

150 cm⁻³, 30 °S~60 °S 地区平均数密度增大至 160 cm⁻³,在低纬地区增大至 180 cm⁻³;30 °N~60 °N 地区平均数密度减小至 160 cm⁻³,在北极地区则减小至 120 cm⁻³。

选取第 141 轨数据分析霾的数密度随有效半径 r_{eff} 和有效方差 v_{eff} 的变化趋势。从图 18 可以看出,霾的数密度随有效半径 r_{eff} 的增大而减小,随有效方差 v_{eff} 的增大而增大。原因是 r_{eff} 增加会导致粒子的消光截面增大,在相同消光系数下粒子数密度会减小;有效方差增大则会影响粒子谱分布,使得粒子谱中包含更多的小粒子,会导致总体数密度增加。

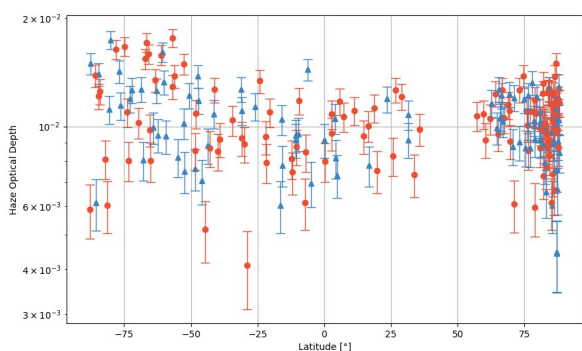


图 16 2006~2013 年间金星上霾层的垂直光学厚度随纬度和昼夜的变化(红色圆代表晨间掩星,蓝色三角形代表夜间掩星)

Fig 16 Vertical optical thickness of the haze layer on Venus changes with latitude and day and night from 2006 to 2013 (red circles represent morning occultations, blue triangles represent night occultations)

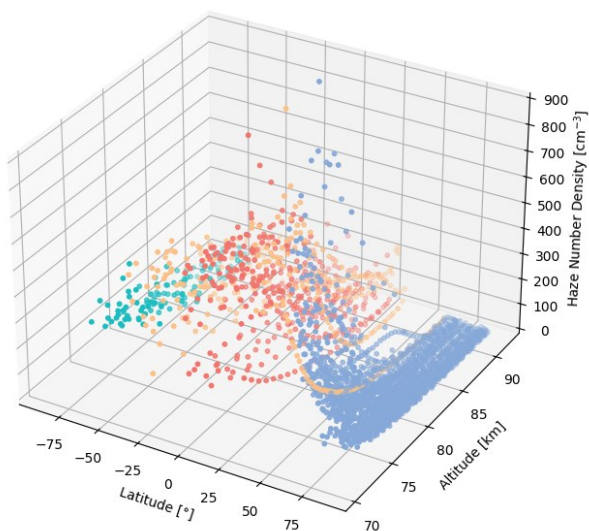


图 17 2006~2013 年间金星上层霾数密度的空间分布(蓝色点代表北极地区,绿色点代表南极地区,橙色点代表中纬度地区,红色点代表低纬度地区)

Fig 17 Spatial distribution of haze number density in the upper reaches of Venus from 2006 to 2013 (blue dots represent the Arctic region, green dots represent the Antarctic region, orange dots represent mid-latitude regions, and red dots represent low-latitude regions)

霾粒子数密度对有效半径 r_{eff} 较敏感,即有效半径 r_{eff} 对霾的数密度影响较大,这一点可以从图 19 看出。当 r_{eff} 从 $0.15 \mu\text{m}$ 增加至 $0.3 \mu\text{m}$,霾的数密度从 350cm^{-3} 降低至 50cm^{-3} 以下。 $r_{eff} = 0.15 \mu\text{m}$ 时,霾粒

子数密度在 $v_{eff} = 0.1$ 处为 321cm^{-3} ,在 $v_{eff} = 0.3$ 处为 379cm^{-3} 。而当 $r_{eff} = 0.3 \mu\text{m}$ 时,霾粒子数密度在 $v_{eff} = 0.1$ 处为 12cm^{-3} ,在 $v_{eff} = 0.3$ 处为 13cm^{-3} ,几乎没有变化,可见霾粒子有效半径 r_{eff} 越大,上层霾的数密度越小,对有效方差 v_{eff} 的变化越不敏感。

3.3 金星云顶高度及霾层标高的时空分布

图 20 展示了 2006~2013 年间金星云顶高度随纬度的分布情况。云顶高度定义为单位光学厚度处的大气高度($\tau_j = 1$),因此与波长相关。本文研究结果为波长 $3 \mu\text{m}$ 处的云顶高度。可以看出,低纬度地区的云顶高度较高,为 $82.7 \pm 5.8 \text{km}$;极区的云顶高度较低,北极地区云顶高度为 $73.3 \pm 2.4 \text{km}$,南极地区为 $79.5 \pm 3.5 \text{km}$ 。云顶高度在赤道附近最大,在 30°N 附近开始减小,并在极点处达到最小值。这表明上层云在垂直方向上向极地收缩。云顶高度随年份变化特征不明显,2006~2007 年在低纬度地区测得的云顶高度较低,随后几年云顶高度有所增加,但在各自纬度区域内变化不大,推测与金星快车任务刚开始时低纬度霾的大量增加有关。

由于 SOIR 仪器的垂直分辨率随着远离北极而变得越来越粗糙,反演仅针对北纬高纬度轨道,因为此时仪器的空间分辨率不会大于标高^[8]。2006~2013 年间金星北极地区的霾层标高随纬度的分布情况如图 21 所示。可以看出,北极地区的霾层标高分布在 $2\sim 6 \text{km}$ 范围内,区域内标高变化不大,根据消光廓线计算的北极地区霾层平均标高为 $4.0 \pm 0.9 \text{km}$ 。这表明在北极地区,上层霾分布均匀且稀薄,霾层可延伸至较高的高度。

将各部分主要研究结果总结成表格,如表 2 所示。为了更好地进行对比,将相关研究成果及参考文献进行总结,如表 3 所示。

4 结论

金星上层霾的时空分布对于大气中间层的化学和辐射平衡具有重要意义。选取 2006~2013 年间 226 轨 SPICAV SOIR 太阳掩星数据进行分析,首先利用 MODTRAN 进行金星中上层大气建模以去除气体吸收效应,后利用剥洋葱法计算了 $67\sim 92 \text{km}$ 高度范围内金星上层霾的消光廓线。通过分析,得到如下结论:

(1) 研究上层霾消光特性的时空分布发现,金星上层霾的消光系数总体趋势是随着高度增加,霾

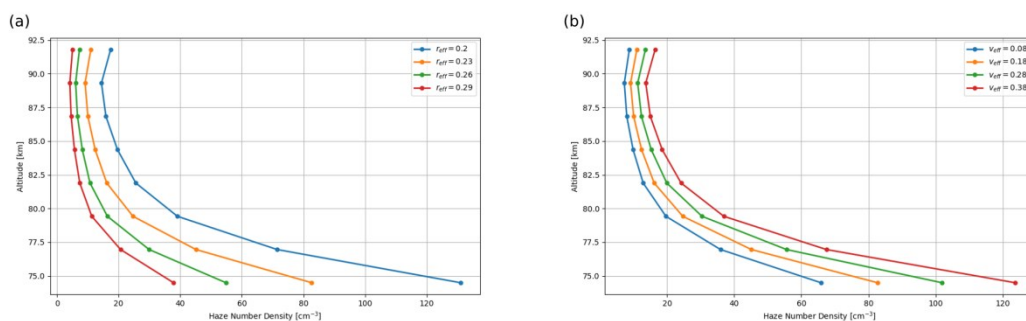


图 18 2006 年 9 月 9 日 (order 149 orbit 141) 金星上层霾数密度随有效半径 r_{eff} 和有效方差 v_{eff} 的变化: (a) 数密度随有效半径 r_{eff} 的变化; (b) 数密度随有效方差 v_{eff} 的变化

Fig 18 Changes in haze number density in the upper haze of Venus with effective radius r_{eff} and effective variance v_{eff} on September 9, 2006 (order 149 orbit 141): (a) The number density changes with the effective radius r_{eff} ; (b) The number density changes with the effective variance v_{eff}

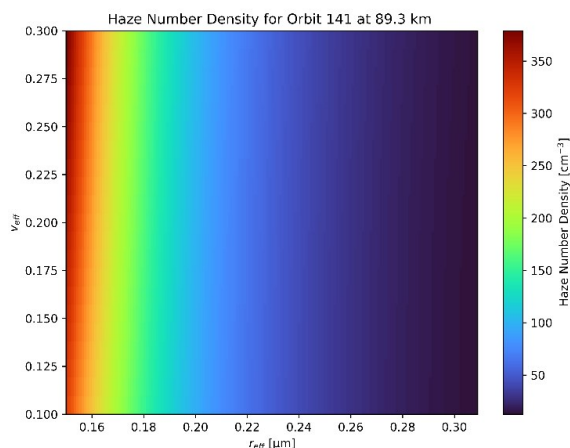


图 19 2006 年 9 月 9 日 (order 149 orbit 141) 89.3 km 处金星上层霾数密度的热图 (横轴为有效半径 r_{eff} , 范围 0.15~0.3 μm, 间隔 0.001 μm; 纵轴为有效方差 v_{eff} , 范围 0.1~0.3, 间隔 0.01)

Fig 19 Heat map of the upper haze number density of Venus at 89.3 km on September 9, 2006 (order 149 orbit 141) (the horizontal axis is the effective radius r_{eff} , the range is 0.15~0.3 μm, and the interval is 0.001 μm; the vertical axis is the effective variance v_{eff} , Range 0.1~0.3, interval 0.01)

的消光系数减少。每上升 10 km 高度, 平均消光系数降低约一个数量级。不同区域间的消光系数变化也较大, 中低纬地区消光系数总体大于极地地区消光系数, 而低纬地区又略大于中纬地区, 南极地区又略大于北极地区。在金星快车的前 1 000 次绕行过程中 (对应 2006~2009 年), 低纬度地区霾的消光系数增加了约一个数量级。此外, 还观察到高度 90 公里以上的地区也存在霾, 其消光系数范围在 10^{-4} ~ 10^{-5} km⁻¹ 之间。研究上层霾的昼夜变化发现, 低纬度地区昼夜间霾的平均消光系数几乎没有变

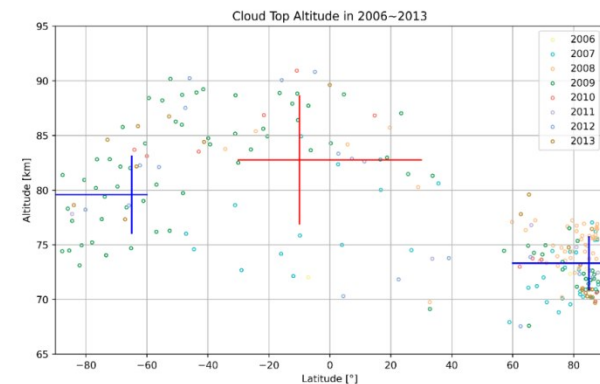


图 20 2006~2013 年间金星云顶高度随纬度的分布 (年份用不同颜色表示, 蓝色和红色分别表示低纬地区和极区的云顶高度, 横线表示均值, 竖线表示标准差)

Fig 20 Distribution of Venus cloud top height with latitude from 2006 to 2013 (years are represented by different colors, blue and red represent the cloud top height in low latitudes and polar regions respectively, the horizontal line represents the mean, and the vertical line represents the standard deviation)

化, 极区夜间霾的平均消光系数略大于晨间霾的平均消光系数, 而中纬度夜间霾的平均消光系数约是晨间的 2 倍。在 70~90 km 区域内, 晨间和夜间霾层的平均垂直光学厚度分别为 0.027 9、0.034 4。若以云顶高度定义上霾层的起始高度, 上霾层的垂直光学厚度随纬度和昼夜变化不大, 数量级在 10^{-2} 附近。其中晨间霾层光学厚度为 0.010 5, 夜间霾层光学厚度为 0.010 2。

(2) 研究上层霾微物理特性的空间分布发现, 数密度随高度增加而减小, 在 70 km 处, 上层霾的平均数密度约为 340 cm⁻³; 在 80 km 处, 平均数密度减小至 150 cm⁻³, 在 90 km 处继续减小至 40 cm⁻³。从南

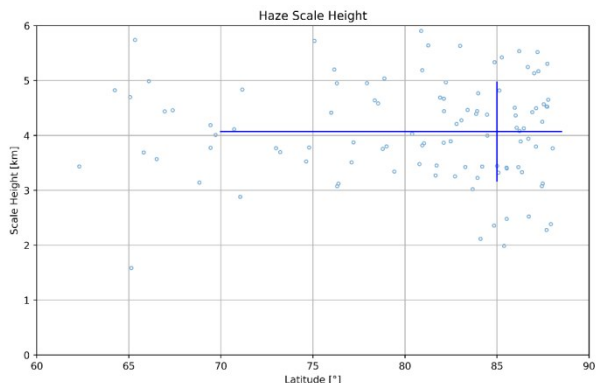


图 21 2006~2013 年间北极地区金星霾层标高随纬度的分布(横线表示均值,竖线表示标准差)

Fig 21 Distribution of Venus haze layer elevation with latitude in the Arctic region from 2006 to 2013 (the horizontal line represents the mean, and the vertical line represents the standard deviation)

表 2 本文主要研究结果总结

Table 2 Summary of the main research results of this article

研究内容	观测数据集	纬度范围	研究结果
上层霾的消光系数的时空分布特征	2006~2013 年 SPICAV SOIR 数据集	全纬度	每上升 10 km 高度, 平均消光系数降低约一个数量级。在金星快车的前 1000 次绕行过程中, 低纬度地区霾的消光系数增加了约一个数量级。
		20°S~20°N	
70~90km 上霾层平均垂直光学厚度	2006~2013 年 SPICAV SOIR 数据集	全纬度	0.0279(晨间) 0.0344(夜间)
上层霾数密度		全纬度	约 340/cm ³ (70km 处) 约 150/cm ³ (80km 处) 约 40/cm ³ (90km 处)
云顶高度		30°S~30°N	82.7 ± 5.8 km
		60°N~90°N	73.3 ± 2.4 km
		60°S~90°S	79.5 ± 3.5 km
霾层标高		60°N~90°N	4.0 ± 0.9 km

极到北极,上层霾的数密度呈现先增加后减小的趋势。在 80 km 高度处,南极地区上层霾的平均数密度为 150 cm⁻³,30°S~60°S 地区平均数密度增大至 160 cm⁻³,在低纬地区增大至 180 cm⁻³;30°N~60°N 地区平均数密度减小至 160 cm⁻³,在北极地区则减小至 120 cm⁻³。霾粒子有效半径 r_{eff} 越大,上层霾的

数密度越小,对有效方差 v_{eff} 的变化越不敏感。

(3)此外,还利用消光廓线反演了金星云顶高度和霾层标高。研究发现低纬度地区的云顶高度较高,为 82.7 ± 5.8 km;极区的云顶高度较低,北极地区云顶高度为 73.3 ± 2.4 km,南极地区为 79.5 ± 3.5 km。云顶高度在赤道附近最大,在 30°N 附近开始减小,并在极点处达到最小值,云顶高度随年份变化特征不明显。选取北极地区的观测数据进行分析,得出北极地区平均霾层标高为 4.0 ± 0.9 km。

References

- [1] Esposito L W, Knollenberg R G, Marov M Y A, *et al.* 16. the clouds and hazes of venus[J]. *Venus*, 1983, 484.
- [2] Titov D V, Ignatiev N I, McGouldrick K, *et al.* Clouds and hazes of Venus [J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**: 1-61.
- [3] Hansen J E, Hovenier J W. Interpretation of the polarization of Venus [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1974, **31**(4): 1137-1160.
- [4] Takagi S, Mahieux A, Wilquet V, *et al.* An uppermost haze layer above 100 km found over Venus by the SOIR instrument onboard Venus Express [J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, **71**(1): 1-12.
- [5] Kawabata K, Coffeen D L, Hansen J E, *et al.* Cloud and haze properties from Pioneer Venus polarimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A13): 8129-8140.
- [6] Sato M, Travis L D, Kawabata K. Photopolarimetry analysis of the Venus atmosphere in polar regions [J]. *Icarus*, 1996, **124**(2): 569-585.
- [7] Wilquet V, Drummond R, Mahieux A, *et al.* Optical extinction due to aerosols in the upper haze of Venus: Four years of SOIR/VEX observations from 2006 to 2010 [J]. *Icarus*, 2012, **217**(2): 875-881.
- [8] Luginin M, Fedorova A, Belyaev D, *et al.* Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data [J]. *Icarus*, 2016, **277**: 154-170.
- [9] Nevejans D, Neefs E, Van Ransbeeck E, *et al.* Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 μm [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(21): 5191-5206.
- [10] Bertaux J L, Vandaele A C, Korabev O, *et al.* A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurements of HF, HCl, H₂O and HDO [J]. *Nature*, 2007, **450**(7170): 646-649.
- [11] Mahieux A, Berkenbosch S, Clairquin R, *et al.* In-flight performance and calibration of SPICAV SOIR onboard Venus express [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(13): 2252-65. DOI:10.1364/AO.47.002252.
- [12] Hedin A E, Niemann H B, Kasprzak W T, *et al.* Global empirical model of the Venus thermosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, **88**(A1): 73-83.

表3 相关研究成果及参考文献

Table 3 Summary of related research results and references

研究内容	观测数据集	纬度范围	研究结果	参考文献
上层霾的消光系数的时空分布特征	2007年8月19日 SPICAV SOIR 观测数据	70°N	消光系数在 25 km 高度范围内下降两个数量级以上。	Titov 等人 ^[2]
70~90km 上霾层平均垂直光学厚度	2006~2010年 SPICAV SOIR 数据集	0°~40°N	在金星快车的前1000次绕行过程中,低纬度地区霾的消光系数增加了一个数量级。	Wilquet ^[7] 等人
上层霾数密度	2006~2013年 SPICAV SOIR 数据集	全纬度	0.0284(晨间) 0.0351(夜间)	Takagi ^[14]
云顶高度	2006~2013年 SPICAV IR 数据集	全纬度	约 500/cm ³ (70km 处) 约 50/cm ³ (90km 处)	Luginin 等人 ^[8]
霾层标高	2006~2010年 SPICAV SOIR 数据集	30°S~30°N 60°N~90°N	82 ± 1 km 73 ± 2 km	Wilquet ^[7] 等人
	2006~2013年 SPICAV IR 数据集	80°N~90°N	4.4 ± 1.0 km	Luginin 等人 ^[8]

- [13] Mahieux A, Robert S, Piccialli A, *et al.* The SOIR/Venus Express species concentration and temperature database: CO₂, CO, H₂O, HDO, H₃₅Cl, H₃₇Cl, HF individual and mean profiles[J]. *Icarus*, 2023, **405**: 115713.
- [14] Seiko Takagi. Study of the Venus' upper haze [D]. The University of Tokyo, 2013.
- [15] Berk A, Cooley T W, Anderson G P, *et al.* MODTRAN5: A reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options [C]//Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere IX. SPIE, 2004, **5571**: 78-85.
- [16] Bernstein L S, Berk A, Sundberg R L. Application of MODTRAN to extra-terrestrial planetary atmospheres [C]//2007 AMOS Technology Conference, Maui, HI. 2007.
- [17] Marcq E, Mills F P, Parkinson C D, *et al.* Composition and chemistry of the neutral atmosphere of Venus [J].

Space Science Reviews, 2018, **214**: 1-55.

- [18] Seiff A, Schofield J T, Kliore A J, *et al.* Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude [J]. *Advances in Space Research*, 1985, **5**(11): 3-58.
- [19] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, *et al.* M. imekov, MAH Smith, K. Sung, SA Tashkun, J. Tennyson, RA Toth, AC Vandaele, JV Auwera [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2009, **110**: 533-572.
- [20] Hummel J R, Shettle E P, Longtin D R. AD-A210 110 [J]. 1988.
- [21] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space science reviews*, 1974, **16** (4) : 527-610.
- [22] Marcq E, Jessup K L, Baggio L, *et al.* Climatology of SO₂ and UV absorber at Venus' cloud top from SPICAV-UV nadir dataset [J]. *Icarus*, 2020, **335**: 113368.