0254-6124/2026/46(5)-1118-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Hao, TIAN Hui, ZHANG Weihang, QIN Jianqi, YUE Xin'an, HE Maosheng, YU Xizheng. Prospects for Scientific Research Based on Transit Observations of Earth by the Solar Polar-orbit Observatory (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1118–1131. CSTR:32142.14.cjss.2025–0237. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0237

基于夸父二号卫星地球凌日观测的科学研究展望*

李 昊[1] 田 晖[2,1] 张苇杭[2] 覃建旗[2]
乐新安[3,4] 何茂盛[1] 于锡峥[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室 北京 100029)

4(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

摘 要 夸父二号科学卫星在利用木星引力改变轨道倾角飞出黄道面之前, 将在黄道面环日飞行, 有望在可见光和极紫外多个波段完整观测地球凌日过程. 本文主要围绕夸父二号未来将开展的地球凌日观测, 预先分析其可开展的相关科学研究内容. 一方面, 利用极紫外波段地球大气遮掩太阳的观测, 可反演地球热层氧原子数密度及其垂直分布. 基于地球经验大气模型, 对极紫外波段地球大气吸收进行了正演模拟, 反演测试表明, 可有效反演地球热层 250～600 km 范围内的氧原子数密度分布;另一方面, 基于地球凌日过程中在极紫外与可见光波段表现出的光变曲线特征, 可预估未来极紫外波段开展系外行星凌星探测的典型光变信号. 模拟分析了行星凌星过程中极紫外波段的光变曲线特征. 由于行星大气对极紫外辐射具有显著吸收作用, 光变曲线将呈现出不同于可见光波段的变化特征. 上述结果不仅对理解地球大气热层的性质具有重要意义, 而且能为探测系外行星高层大气的特性提供重要启示.

关键词 行星大气, 凌星, 掩星, 极紫外

中图分类号 P351, P353, P356

Prospects for Scientific Research Based on Transit Observations of Earth by the Solar Polar-orbit Observatory

LI Hao[1] TIAN Hui[2,1] ZHANG Weihang[2] QIN Jianqi[2]
YUE Xin'an[3,4] HE Maosheng[1] YU Xizheng[1]

1(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center*,

* 国家自然科学基金项目 (12425301, 12473051) 和太空探源专项项目共同资助

2025-12-27 收到原稿, 2026-03-23 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Chinese Academy of Sciences, *Beijing* 100190)

2(*School of Earth and Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871)

3(*Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029)

4(*College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract　The Solar Polar-orbit Observatory (SPO) mission will employ a gravity assist of Jupiter to change its orbital inclination, enabling the spacecraft to leave the ecliptic plane and conduct direct imaging observations of the Sun's poles. Before performing the gravity assist maneuver at Jupiter, SPO will orbit the Sun near the ecliptic plane, during which it will have the opportunity to observe the transit of the Earth across the solar disk in visible and Extreme-ultraviolet (EUV) bands. This paper focuses on the prospective Earth's transit observations by SPO in the future and presents a preliminary assessment of the potential scientific investigations that could be carried out. First, the absorption of EUV radiation by the Earth's atmosphere during transit can be used to retrieve the atomic oxygen number density in the thermosphere and its variation with altitude, thereby obtaining the vertical distribution of oxygen atoms. Using an empirical atmospheric model of Earth, we perform forward modeling of the absorption of EUV radiation by the Earth's atmosphere. Inversion tests demonstrate that the absorption in these EUV wavelengths can be used to infer the distribution of atomic oxygen number density in the thermosphere within an altitude range of 250–600 km. Second, based on the characteristics of light curves in both the EUV and visible bands, obtained during the Earth's transit, we can investigate the typical transit photometric signatures that may arise in future exoplanet transit detections in EUV bands. We simulate the light-curve characteristics during planetary transits in the EUV band. Due to the significant absorption of EUV radiation by planetary atmospheres, the resulting light curves exhibit characteristics that differ from those observed in the visible band. These results will provide important guidance and theoretical support for future EUV-based exoplanet detection missions.

Key words　Planetary atmosphere, Transit, Occultation, Extreme ultraviolet

0　引言

凌星法是当前探测系外行星最重要的技术之一[1]. 当系外行星在视线方向上横穿宿主恒星前方时, 会遮挡部分恒星辐射, 导致观测亮度出现轻微下降, 在光变曲线上表现为特征性凹槽. 截至 2025 年, 据美国宇航局系外行星档案[2], 已经发现的 6000 余颗系外行星中, 超过 4000 颗是利用凌星法探测到的. 光变曲线上凹槽的周期性反映了行星的轨道周期, 而凹槽的深度则由行星和恒星的相对尺度决定[3]. 因此, 通过对光变曲线上亮度下降特征的分析, 不仅能够识别围绕恒星运动的系外行星, 结合光谱观测, 还可以反演其半径、质量、轨道半径与周期等物理参数. 例如, Lissauer 等[3] 利用开普勒空间望远镜高测光精度的凌星观测[4,5], 在天鹅座的一颗类日恒星 (Kepler-11) 周围成功探测到 6 颗质量为地球数倍的系外行星. 其中一颗行星 (Kepler-11f) 的质量仅为地球的约 2.3 倍. 行星的质量与半径直接决定了其表面的重力加速度, 而行星轨道半径则关系到其接收到的宿主恒星辐射强度, 这些参数是判断行星是否位于宜居带的关键.

除了这些基本物理参数外, 行星大气性质同样是评估其宜居性的重要指标[6–8]. 行星大气的化学成分以及元素丰度是支撑生命的核心要素之一. 此外, 行星大气中的某些成分能够有效吸收来自宿主恒星的紫外、极紫外以及高能粒子辐射, 从而在行星表面形成必要的屏蔽作用, 保护潜在的生命免受辐射损伤. 以地球为例, 大气层中的氧分子 (O_2)、氧原子 (O)、氮分子 (N_2) 以及臭氧 (O_3) 等中性成分可以在不同波段通过吸收、电离等过程削弱太阳高能辐射的入射能量, 构建起对地表生命环境至关重要的防护体系.

这些中性组分不仅对太阳辐射的吸收截面不同, 而且对辐射波长的依赖性也各不相同. 这种成分分布

与吸收特性的差异是地球电离层垂直分层的主要驱动要素[9]. 例如, 氧原子对极紫外辐射 (100～1000 Å) 的吸收主导了地球大气 150 km 高度以上的电离过程, 构成了电离层的 F 层; 氧分子在舒曼–龙格连续谱和舒曼–龙格吸收带对远紫外辐射 (1000～2000 Å) 的强吸收主要发生在 60～150 km 区域, 是电离层 E 层和 D 层形成的重要驱动力; 而臭氧在哈特利 (Hartley) 连续谱对近紫外 (3000～4000 Å) 和中紫外辐射 (2000～3000 Å) 的吸收则集中于更低的高度 [10].

上述不同波段辐射被吸收的高度差异导致行星穿过恒星表面前方时, 对恒星辐射的遮挡效应在这些波段的表现显著不同. 在可见光波段, 行星光变曲线上凹槽深度主要反映行星固体半径. 而在远紫外、极紫外以及 X 射线波段, 大气吸收使行星在凌星过程中表现出更大的“等效遮挡半径”, 导致这些波段的光变曲线凹槽深度明显大于可见光波段, 并呈现不同的入食与出食特征[11–13]. 因此, 通过比较不同波段的光变曲线特征, 可以进一步刻画行星高层大气的特征, 为评估系外行星宜居性提供重要依据[14,15].

太阳极轨天文台 (Solar Polar-orbit Observatory, SPO), 又称夸父二号, 是中国《国家空间科学中长期发展规划 (2024－2050 年)》第一阶段优先开展的大型深空探测任务之一. 其核心目标面向中国太阳与空间物理领域的重点发展方向之一——太阳极区探测[16,17]. 夸父二号科学卫星计划于 2029 年发射[18], 将借助木星引力改变轨道倾角, 从而飞出黄道面, 拟实现对太阳极区的正面成像观测, 为揭示太阳磁活动周起源、揭示高速太阳风起源、认知太阳系空间天气过程提供关键约束[18].

在借助木星引力实现变轨之前, 夸父二号将首先在黄道面内环日绕行一周. 根据目前的轨道设计与初步计算结果, 在此阶段夸父二号预计将有一次机会在可见光和极紫外等多个波段捕获完整的地球凌日过程. 在凌日过程中, 通过测量地球大气对太阳极紫外辐射的吸收, 可以为研究地球高层大气中性成分提供重要机会. 此外, 鉴于目前系外行星凌星光变曲线观测主要集中在可见光波段, 而地球的极紫外凌日观测数据也将为未来在该波段开展系外行星探测提供重要的参考. 本文主要围绕夸父二号可能获取的地球凌日观测数据及其相关科学课题展开预先研究.

1 金星凌日的观测

2012 年 6 月 5 日 22:25 UTC 至 2012 年 6 月 6 日 04:16 UTC, 太阳动力学天文台卫星 (SDO)[19] 搭载的多台仪器成功观测到金星凌日的完整过程[20]. 图 1(a) 给出了 SDO 搭载的成像观测设备 AIA[21] 在极紫外 171 Å波段获得的金星凌日图像. 图 1(b) 给出了沿金星直径方向的光强变化曲线, 黑色竖线标记了金星圆盘边缘的位置. 在两条黑色竖线之间对应金星本体完全遮挡的区域, 其辐射信号主要来源于望远镜系统的杂散光; 两条黑色竖线外的临近部分则对应金星大气的区域. 可以观察到, 在金星大气中, 171 Å波段的光强随大气高度增加而逐渐增强. 这主要是由于大气密度随高度升高而降低, 使得对辐射的吸收逐渐减弱, 从而导致辐射透过率随高度逐渐增大. 原则上, 若能够明确大气中对该波段辐射起主要吸收作用的成分, 则可通过观测到的透过率反演获得该成分在大气中的密度分布. Reale 等[20] 测量了凌日过程中极紫外 171, 193, 211, 304 和 335 Å以及紫外 1600 Å和 1700 Å波段金星大气的遮挡厚度 (对应辐射透过率为 50% 的高度), 其数值分别为 164, 165, 162, 167, 176, 127 和 117 km. 该高度范围与射电方法得到的金星大气电子密度峰值高度 (约 140 km) 相当接近[22], 也与模型模拟得到的金星电离层位置相符[23,24]. 模拟结果显示, 在该高度范围内, 金星大气对紫外辐射的吸收主要是由二氧化碳和一氧化碳电离所贡献, 该过程也进一步导致金星电离层的形成.

在行星凌日的出食和入食阶段, 行星大气的中间层会对太阳辐射产生折射作用, 从而在行星边缘形成明亮的光晕. Tanga 等[25] 和 Pere 等[26] 分别在 2004 年和 2012 年利用地面和空间观测设备成功探测到金星凌日过程中在可见光波段产生的光晕现象. 通过分析光晕的强度结构, 分别得到了金星大气中间层的温度信息.

此外, 在凌星过程中, 行星大气的某些成分会在特定波长吸收宿主恒星的辐射, 从而形成吸收线, 因此凌星光谱观测是探测行星大气组成的一种重要手段. Branco 等[27] 利用美国国家太阳天文台 76 cm 口径的 Dunn Solar Telescope (DST) 后端的近红外光谱仪, 对凌日过程中金星大气在近红外波段的透射光谱进行了观测研究, 清晰探测到由不同碳同位素构成

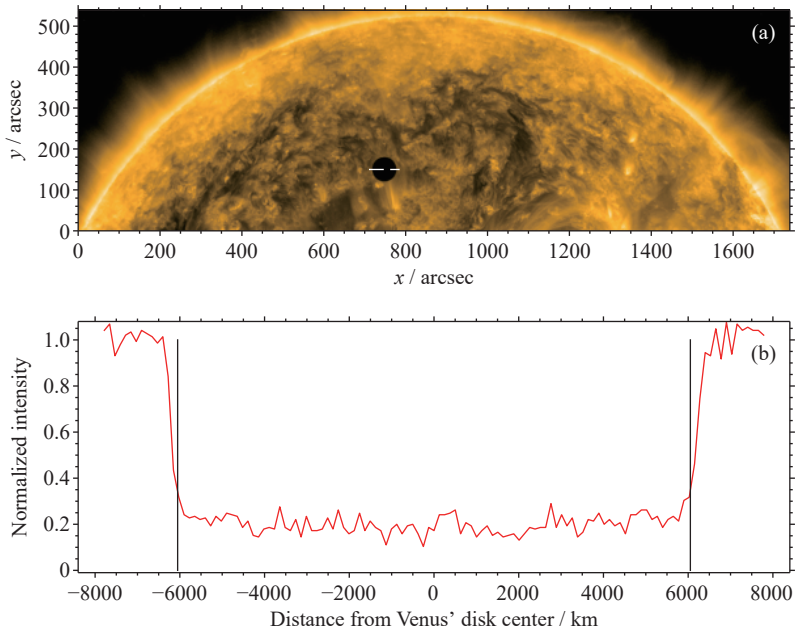


图 1　SDO/AIA 在 171 Å波段观测的金星凌日. (a) 金星凌日原始图像, (b) 沿 (a) 中白色虚线的归一化光强变化曲线

Fig. 1　Transit of Venus observed by SDO/AIA in the 171 Å band. (a) Image of the Venus transit. (b) Normalized intensity curve along the white dashed line in panel (a)

的一氧化碳和二氧化碳分子 (包括$^{12}C^{16}O$, $^{12}C^{16}O_2$, $^{13}C^{16}O_2$ 等分子种类) 的吸收特征. 此类方法已被广泛应用于系外行星大气探测[8,28]. 金星凌日研究在多波段凌星、大气反射以及透射光谱等方面取得的成果, 为利用夸父二号观测地球凌日并开展类似研究提供了重要的方法论基础.

2　基于地球凌日观测反演地球热层氧原子密度

热层中性氧原子因吸收太阳极紫外辐射而电离, 是形成电离层 F 层的主要物理过程, 同时也将太阳辐射能量转化为热能, 使热层保持较高的温度. 此外, 氧原子作为热层的主要成分, 是低轨卫星运行阻力的主要来源. 因此, 对热层氧原子密度的精确探测具有重要科学价值和工程意义.

目前常用的热层氧原子密度探测方法主要包括: 阻力法, 通过检测卫星在轨道运行过程中受大气阻力引起的加速度和轨道变化探测大气密度[29]; 气辉探测法, 利用氧原子在远紫外[30,31]、可见光、近红外[32] 以及极紫外[33,34] 波段产生的气辉辐射, 反演其密度和温度. 当然上述方法也存在各自局限性, 如阻力法仅能提供卫星经过位置的密度信息, 若要获得随高度变化的密度分布, 需要使用椭圆轨道或多颗卫星组合观测, 且无法区分由风速产生的额外阻力; 气辉探测法的反演涉及多源光子激发、共振散射和吸收等复杂的辐射传输计算, 计算过程复杂, 且对物理模型参数依赖较大.

除上述方法外, 当太阳辐射穿过地球大气时, 会因大气成分的吸收而减弱. 通过分析遮掩导致的辐射强度变化, 可以反演出辐射传播路径上具有吸收作用的大气成分信息. 相对于其他方法, 掩星探测仅需要产生吸收粒子的电离截面即可开展密度垂直分布的测量, 原理相对简单, 当然, 该方法也存在局限性, 例如仅能探测晨昏线附近的密度分布, 且观测机会受轨道限制. 夸父二号卫星在黄道面环日飞行阶段, 将有机会观测到地球大气对太阳辐射的遮掩过程, 为研究地球高层大气提供宝贵机会. 夸父二号搭载的多波段极紫外成像仪[18], 能够在极紫外 171, 193 和 304 Å波段对太阳进行成像观测. 这些波段的辐射在穿过地球热层时将受到氧原子因电离而产生的吸收[10]. 因此, 在地球凌日阶段, 通过对这三个极紫外波段辐射强度变化进行分析, 可有效反演热层中性氧原子的垂直分布.

2.1　掩星探测原理

早在 20 世纪 60 年代, Hays 等[35,36] 提出了利用

掩星技术探测地球大气中氧分子密度的技术. 相比通常仅能部分遮挡辐射星体的凌星现象, 掩星通常指被探测星体能够完全遮住辐射源. 但无论是凌星还是掩星, 辐射源均会被遮挡星体的大气吸收或者折射, 可根据吸收的强度或折射的变化, 探测遮挡星体的大气. 图 2 给出了通过探测辐射衰减来反演地球大气的示意. r_e为地球半径, h为辐射传播路径距离地球表面的切向高度, r_0为辐射传播方向距离地心的垂直距离, s和r分别为p_0点在辐射传播路径上的距离以及离地心的距离. 初始恒星辐射强度$I_0(\lambda)$在穿过地球大气后衰减为$I(\lambda, r_0)$. 其比值$I(\lambda, r_0)/I_0(\lambda)$定义为透过率. 其中, r_0为辐射传播路径距地心的最小距离, λ为辐射的波长. 由于不同的原子和分子对辐射的吸收波段并不相同, 通过对不同波段辐射强度变化的分析, 可获得辐射传播路径上对该波段辐射具有吸收作用的原子和分子的部分信息. 基于这一原理, Hays 等[37,38] 和 Roble 等[39,40] 利用轨道天文台-2 (Orbiting Astronomical Observatory-2) 的紫外测光观测设备, 通过在 1500 Å氧分子舒曼–龙格连续谱和 2390 Å臭氧分子哈特利连续谱处观测地球大气对恒星的遮掩, 分别获得了夜间地球大气 100～200 km 高度氧分子的密度以及 60～100 km 高度臭氧分子的密度.

辐射传播经过地球大气产生的衰减可用辐射传输理论描述[41], 表达式为

$$\frac{\mathrm{d}I(\lambda, r_0, s)}{\mathrm{d}s} = -I(\lambda, r_0, s)\,\eta(\lambda, r_0, s) + \varepsilon(\lambda, r_0, s). \tag{1}$$

其中, s为沿着传播路径的距离, $I(\lambda, r_0, s)$、$\eta(\lambda, r_0, s)$和$\varepsilon(\lambda, r_0, s)$分别为位置$(r_0, s)$处的辐射强度、吸收系数及发射系数. 在极紫外波段, 由于地球大气温度相对较低, 其热辐射以及离子和电子产生的复合辐射可以忽略, 因此该波段可以仅考虑吸收过程. 此外, 由于

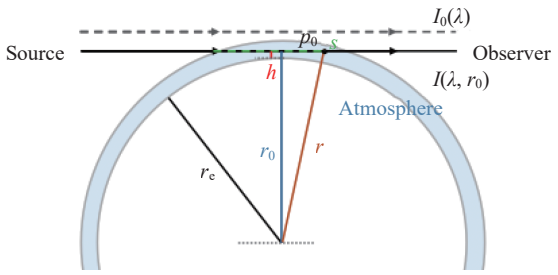


图 2 掩星观测

Fig. 2 Schematic diagram of stellar occultation

瑞利散射截面在极紫外波段远小于电离截面, 可以忽略其贡献, 同时, 由于地球大气中的电子密度远低于中性粒子密度, 电子的汤姆孙散射过程也可以忽略. 在无须考虑散射的情况下, 式 (1) 可以简化为

$$I(\lambda, r_0) = I_0(\lambda)\,\mathrm{e}^{-\int \eta(\lambda, r_0, s)\mathrm{d}s}. \tag{2}$$

其中, $I_0(\lambda)$为未经过大气吸收的初始辐射强度, 吸收系数$\eta(\lambda, r_0, s)$可以表示成原子或分子吸收截面$\sigma(\lambda)$与数密度的乘积. 当考虑多种成分对辐射的吸收时, 式 (2) 可改写为

$$I(\lambda, r_0) = I_0(\lambda)\,\mathrm{e}^{-\sum_{i=0}^{n}\sigma_i(\lambda)N_i(r_0)}. \tag{3}$$

其中, $\sigma_i(\lambda)$为第i个成分在波长λ处产生的吸收截面; $N_i(r_0)$为沿视线方向对该成分的积分密度, 即柱密度. 该方程也被叫作 Beer-Lambert 定律[36,42]. 若假设粒子密度在大气中呈球对称分布, 则柱密度与局地密度存在以下关系:

$$N_i(r_0) = 2\int_{r_0}^{\infty} \frac{n_i(r)\,r\mathrm{d}r}{\sqrt{r^2 - r_0^2}}. \tag{4}$$

其中, $n_i(r)$为位置r处第i个成分的局地数密度. 式 (4) 是阿贝尔积分, 可以通过逆变换由柱密度得到局地数密度的分布[43], 其表达式为

$$n_i(r) = -\frac{1}{\pi}\int_r^{\infty} \frac{[\mathrm{d}N_i(r_0)/\mathrm{d}r_0]}{\sqrt{r_0^2 - r^2}}\mathrm{d}r_0. \tag{5}$$

因此, 通过测量不同切向高度r_0处的透过率, 即可获得柱密度$N_i(r_0)$, 进而利用式 (5) 反演得到大气成分的数密度垂直分布$n_i(r)$[37,38]. 需要指出, 原子或分子在某一波长处的总吸收截面$\sigma(\lambda, T)$往往由多个电子跃迁或电离过程共同贡献, 其大小不仅依赖于波长, 也可能对温度敏感[44]. 此外, 对于单一波段可能同时存在多种吸收成分[45], 这使得反演过程呈现一定的耦合性. 为此, 逐渐发展出多波段联合观测策略以及更具有针对性的光谱反演技术[30,34,45–52].

自从掩星技术被提出以来, 美国宇航局、欧空局等机构先后发射了多颗卫星, 通过地球大气对太阳或其他恒星辐射的遮掩来探测地球大气成分的垂直分布. 典型任务包括 SAGE II[45], POAM II[46], POAM III[47], GOMOS[48], SUSIM[49] 以及 GOLD[50] 等. 探测的成分也包括氧原子、氮分子、氧分子、臭氧、氮的氧化物和气溶胶等[53,54]. 在观测波段上, 也从最早期的中紫外、远紫外波段, 逐渐扩展到近红外、可见光及极紫外等多个波段, 使不同高度区间的大气成分能够

得到更加精细的反演. 例如氧分子在远紫外舒曼–龙格连续谱的吸收截面远大于在红外波段 760 nm 附近的氧分子谱线 (该区域被称为 A 吸收带) 的吸收截面, 因此远紫外波段适合探测位置更高的氧分子密度, 红外波段则可以测量低层大气成分.

2.2　基于地球掩日的极紫外观测反演热层氧原子密度的可行性

利用经验大气模型开展了极紫外掩日观测模拟, 分析该方法探测热层氧原子的可行性. 图 3(a) 和 (c) 分别给出了在 $F_{10.7}$ = 80 sfu 和 200 sfu 的情况下, NRLMSIS2.1 经验大气模型[55] 给出的氧原子、氮分子、氧分子、氢原子、氦原子和一氧化氮数密度随高度的变化. 两种情况分别代表太阳活动较弱和较强时的大气环境. 从图中可以看出, 在 200 km 高度以上, 这几种原子和分子的数密度随高度增加呈现指数衰减, 其衰减速率受到太阳活动水平的显著影响. 与太阳活动较强的情况相比, 在太阳活动较弱时, 热层温度更低, 各成分的数密度整体偏低, 且随高度的衰减更为迅速. 在约 250～500 km 的热层高度范围内, 大气各成分中氧原子占据绝对主导地位, 对应图 3(b)(d) 中较大的数混合比. 氢原子和氦原子数密度虽较低, 但随着高度升高, 其相对占比呈逐渐增大趋势.

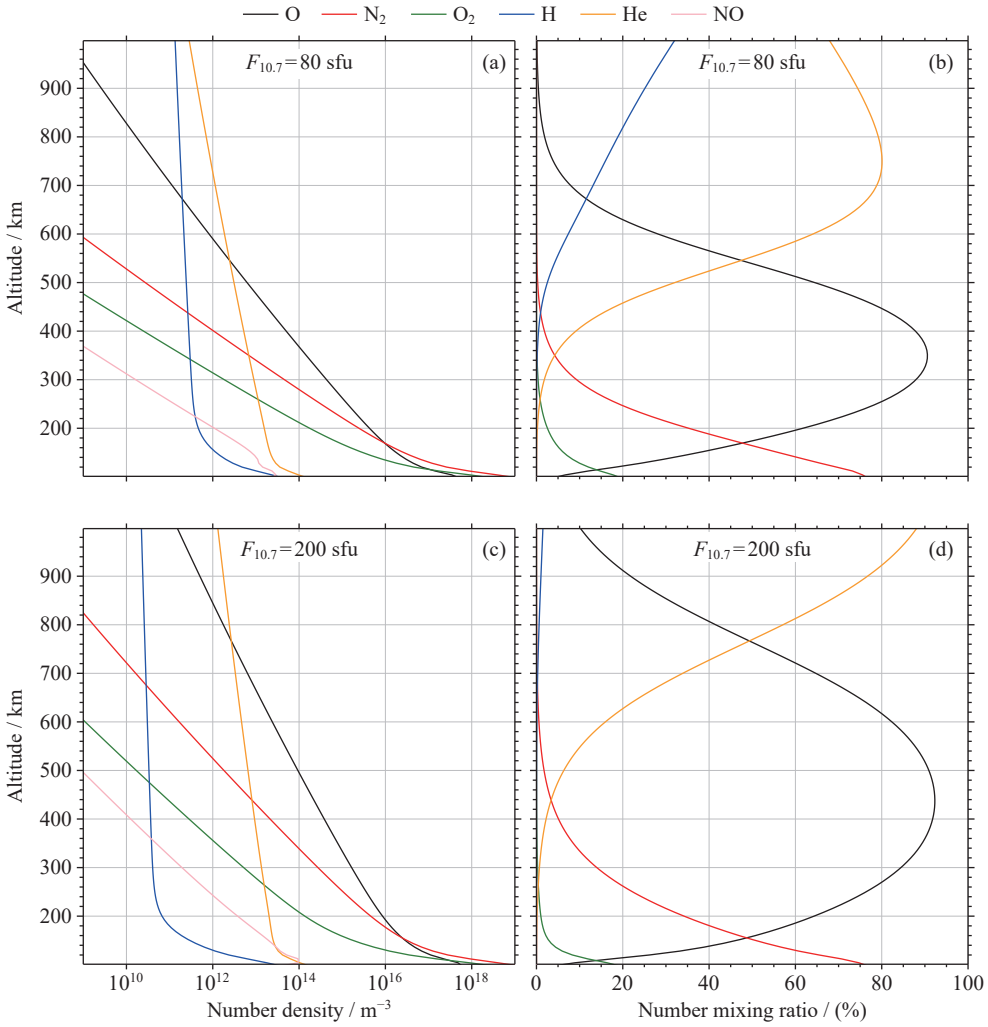


图 3　NRLMSIS2.1 经验大气模型在赤道附近冬季 06:00 LT 条件下的垂直廓线. (a)(c) 为氧分子、氮分子、氧原子、氢原子、氦原子以及一氧化氮分子的数密度随高度的变化廓线, (b)(d) 给出了这些原子和分子的数混合比随高度的分布

Fig. 3　Vertical profiles from the NRLMSIS2.1 empirical atmosphere model for equatorial regions at 06:00 LT in winter. (a)(c) show the number-density profiles of atomic oxygen, molecular nitrogen, molecular oxygen, atomic hydrogen, atomic helium, and nitric oxide. (b)(d) present the corresponding number mixing ratios

基于上述地球大气模型的原子和分子数密度分布, 并假设各成分的数密度在大气中呈均匀分布, 则可以利用式 (3) 正演计算地球大气遮掩太阳时, 在极紫外 171, 193 和 304 Å三个波段的辐射透过率. 相应计算结果展示如图 4(a)(b) 所示. 计算中, 氧原子和氦原子的电离截面采用 Verner 等[56] 的数据, 氮分子的截面则采用 Conway[57] 在 1988 年整理的实验室测量结果.

图 4(a)(b) 的实线表示同时考虑氧原子、氮分子以及氦原子吸收得到的透过率, 虚线则表示仅考虑氧原子的结果, 竖直实线标识了透过率为 50% 时对应的高度. 从图 3 可以看到, 在约 250 km 高度以上, 两者差异相对较小, 表明在此高度范围内, 极紫外吸收主要由氧原子主导, 这与图 2 所示该区域氧原子具有较高数混合比相一致. 同时, 吸收特征显著依赖于太阳活动和波长. 首先, 太阳活动增强时 (对应图 4b, d), 热层大气密度升高, 各波段的吸收发生在更高的位置. 其次, 由于氧原子、氮分子以及氦原子的吸收截面在极紫外 171, 193, 304 Å三个波段随波长增加而增大[56,57], 在同一太阳活动水平下, 半透高度也随波长增加而升高.

图 4(a)(b) 中竖直实线标识了透过率为 50% 时对应的高度. 对于 $F_{10.7}$ = 80 sfu 的情况, 171, 193, 304 Å三个波段的半透高度分别约为 253, 262, 290 km; 而在 $F_{10.7}$ = 200 sfu 时, 这三个高度分别上升至约 327, 342, 387 km. 模拟得到的地球大气半透

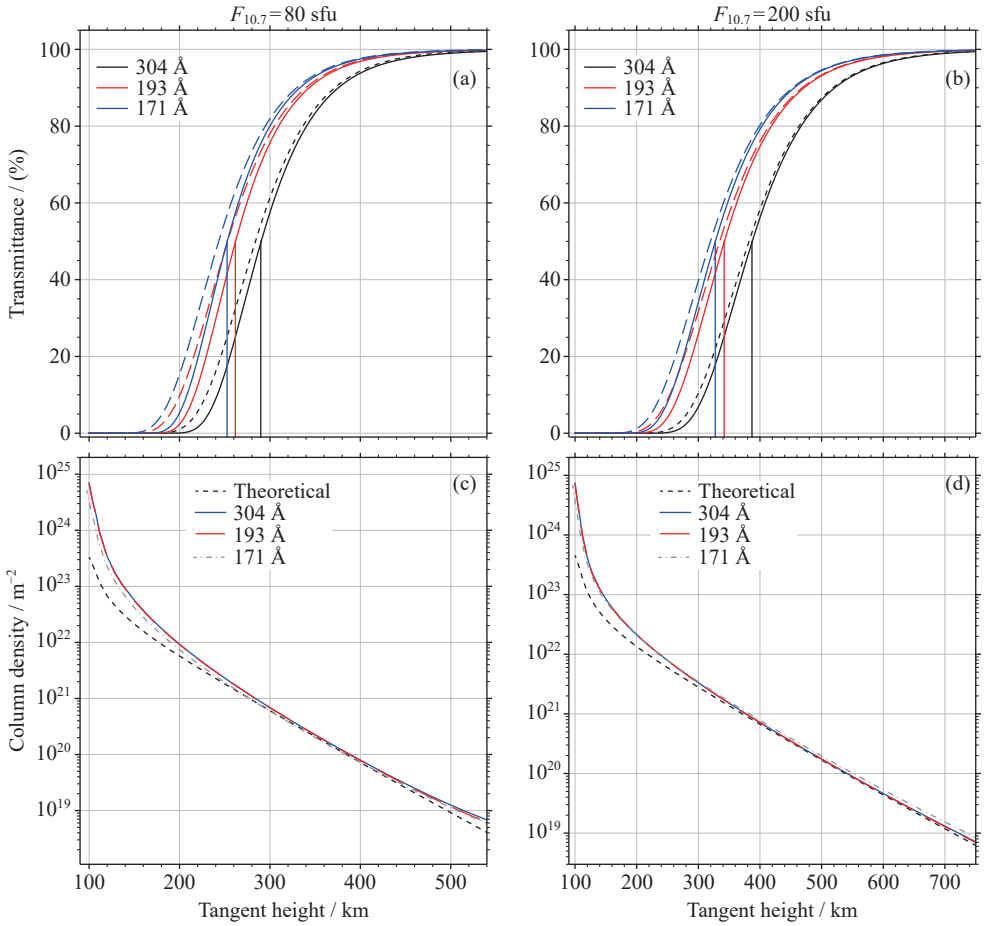


图 4 地球大气对极紫外辐射的正演透过率与反演柱密度. (a)(b) 在 $F_{10.7}$ = 80 sfu 和 200 sfu 的条件下, 正演计算得到的极紫外 171, 193, 304 Å三个波段的辐射透过率, (c)(d) 基于上述透过率反演得到的氧原子柱密度随高度的分布

Fig. 4 Forward modeling of EUV transmittance of the Earth's atmosphere and the retrieved column densities of atomic oxygen. (a)(b) show the synthesized transmittance at 171 Å, 193 Å, and 304 Å for the cases of $F_{10.7}$ = 80 sfu and 200 sfu, respectively. (c)(d) present the inverted column densities of atomic oxygen derived from the synthesized transmittance

高度与金星凌日观测得到的结果[20]对比展示如图 5. 可以看到, 地球大气的遮挡高度比金星高出约 100～200 km, 表明地球大气对极紫外辐射的吸收发生在更高的高度范围. 该高度差异主要由二者大气成分及其物理状态的不同所决定. 因此, 通过分析极紫外辐射在大气中被吸收的高度分布, 可有效反映行星大气的组成和结构特征. 图 5 中蓝色和橙色圆点分别对应地球大气在 $F_{10.7}$ = 80 sfu 和 200 sfu 情况下的遮挡高度, 蓝色和橙色圆点分别表示图 4(a)(b) 中正演计算的结果, 十字符号表示金星凌日观测得到的结果[20], 从图中可以看出, 极紫外辐射的吸收高度随太阳活动水平显著变化, 但总体仍集中在 250～350 km 范围内. 该高度区间与地球电离层 F_2 层的典型高度范围接近.

基于图 4(a)(b) 中正演计算得到的透过率 (实线), 并假设吸收主要是由氧原子产生的, 则可对氧原子的柱密度进行反演, 结果展示在图 4(c)(d) 中. 图中的黑色虚线表示模型输入的氧原子柱密度. 灰色、红色和蓝色曲线分别是根据 171, 193 和 304 Å三个波段透过率反演得到的柱密度. 从图 4 可以看到, 基于三个波段的数据得到的柱密度非常接近. 当 $F_{10.7}$ = 80 sfu 时, 在 250～450 km 内反演的柱密度与输入值相当; 低于 250 km 时, 由于氮分子占比的增加, 反演值逐渐偏离输入值; 高于 450 km 时, 由于氦原子占比上升, 反演偏差也逐渐增大. 此外, 在 450 km 以上,

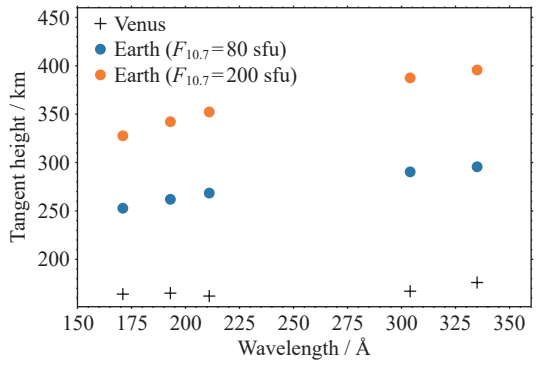


图 5　金星和地球掩日观测时在 171, 193, 211, 304 和 335 Å波段的大气遮挡高度 (透过率为 50% 时的切向高度)

Fig. 5　Occultation heights of Venus and Earth's atmosphere at the wavelengths of 171, 193, 211, 304, and 335 Å (The tangent height where the transmittance is 50%)

上述波段透过率已接近 1, 考虑到观测误差, 该高度区间难以对氧原子柱密度进行有效反演. 在 $F_{10.7}$ = 80 sfu 的情况下, 在 300～650 km 范围内反演的柱密度与输入值相当, 而在低于该高度时, 反演偏差逐渐增大. 在利用真实观测数据进行反演时, 误差的主要来源包括: 实验室测量或基于原子理论计算得到的电离截面与真实电离截面之间的偏差, 从而引入反演密度的不确定性. 此外, 正演计算中采用的球对称大气分布假设与真实大气结构存在差异, 也会对反演结果产生影响. 被忽略的少量大气成分可能带来次要误差. 同时, 大气透过率是通过遮掩前后的观测数据推导得到的, 太阳活动在此期间的变化亦可能对反演结果产生影响.

3　地球凌日的极紫外光变特征及对系外行星探测的启示

基于可见光波段的凌星观测, 结合光谱测量, 可以获得行星质量、半径及轨道半径和周期等基本物理参数[3]. 这些参数是评估行星宜居性的基础条件. 然而, 仅这些参数并不足以判断行星是否适宜生命生存, 行星的大气性质同样扮演至关重要的角色.

行星大气中某些化学成分被视为潜在的生命迹象. 例如, 非生物过程难以形成同时富含二氧化碳和甲烷并缺少一氧化碳的大气特征, 因此这种特征被视为可能的生命活动标志[58,59]. 同时, 大气中二氧化碳等温室气体对调节行星表面温度具有重要作用, 这也是维持类地行星宜居性的关键因素. 此外, 行星大气中的中性原子和分子能够吸收来自恒星的紫外和 X 射线等高能辐射, 阻止这些辐射到达行星表面, 从而使潜在的地表生命免受高能辐射损伤.

目前, 对系外行星大气成分的认识绝大部分来源于凌星光谱探测[60]. 当行星从其宿主恒星表面前方穿过时, 其大气中的成分会在特定波长吸收宿主恒星的辐射, 形成吸收线. 通过分析这些吸收线, 可以推断行星大气的化学成分. 例如, 詹姆斯·韦布空间望远镜 (JWST) 的近红外光谱设备 NIRCam[61] 在热木星 WASP-39 b 的凌星光谱中明确探测到大气中二氧化碳的吸收特征[28].

除了凌星光谱观测外, 在紫外和 X 射线波段的辐射强度观测同样可以在凌星期间探测系外行星的大

气. 如 2.2 节所述, 行星高层大气的成分 (例如氢原子、氢离子、氧原子等) 在远紫外、极紫外和 X 射线等波段存在吸收, 导致行星在这些波段对恒星的遮挡面积大于其在可见光波段的遮挡面积. 因此, 这些波段的凌星光变曲线会展现出与可见光波段不同的特征. Lecavelier 等[11,12] 利用哈勃望远镜观测到热木星系统 HD 189733 b 在凌星期间在远紫外莱曼α谱线 (1215.6 Å) 的光变曲线. 光变曲线上由凌星导致的凹槽的深度深于可见光波段的结果. 这种在 1215.6 Å 波长处更深的光变曲线凹槽特征被认为是由行星大气中性氢的吸收所导致的. Poppenhaeger 等[13] 利用 Chandra 卫星对该热木星系统在 X 射线波段进一步开展凌星观测, 发现凌星导致的光变曲线凹槽深度在 X 射线波段显著大于可见光和紫外波段的凹槽深度, 表明这颗热木星凌星时在 X 射线波段拥有更大的遮挡面积. 该观测现象也被解释为来自中性氢上层的电离氢的吸收. Turner 等[62] 也在近紫外波段探测到多个热木星凌星光变曲线的凹槽比可见光更深的特征.

由于其他恒星系统距离地球极为遥远, 其观测信号通常无法在空间上解析, 难以直接推断其具体物理过程. 因此, 近年来发展了将太阳作为一颗恒星点源的研究方法, 将高空间分辨的太阳观测数据合成为空间不可分辨的积分信号, 用来模拟恒星观测的点源信号, 研究该类系统恒星可能的观测到的现象[63–67]. 在此背景下, Llama 等[68–70] 以及 Qu 等[71] 利用 SDO 卫星的多波段观测数据, 模拟研究了木星尺寸的行星在远紫外和极紫外波段的凌星光变曲线特征. 他们的研究表明, 由于太阳在极紫外波段存在明显的临边增亮现象, 极紫外凌日光变曲线的入食将早于可见光开始, 而其出食也会更晚结束, 从而导致极紫外波段的凌日持续时间显著长于可见光波段. 此外, 当行星遮挡恒星上的活动区时, 其在极紫外与可见光波段的观测结果也会表现出显著差异.

在黄道面环日飞行阶段, 夸父二号卫星将有机会观测到完整地球凌日过程. 利用其搭载的磁场与速度场成像仪及多波段极紫外成像仪, 能够获得凌日过程在可见光和极紫外多个波段的凌日光变曲线, 该观测可为未来开展系外行星的极紫外探测提供重要的先期验证与参考.

为模拟夸父二号在地球凌日期间的观测, 本研究根据其轨道参数计算了地球在日面上的投影, 如图 6(a) 所示. 为了模拟该卫星可能观测到的极紫外凌日光变曲线, 本研究使用 SDO 卫星在极紫外 171, 193 和 304 Å以及可见光波段的成像观测数据, 并假设太阳亮度在凌日过程中保持不变, 采用如图 6(a) 所示的太阳极小年的静态太阳图像, 以 5 min 的采样时间分辨率合成了各个波段的光变曲线, 如图 6(b) 所示.

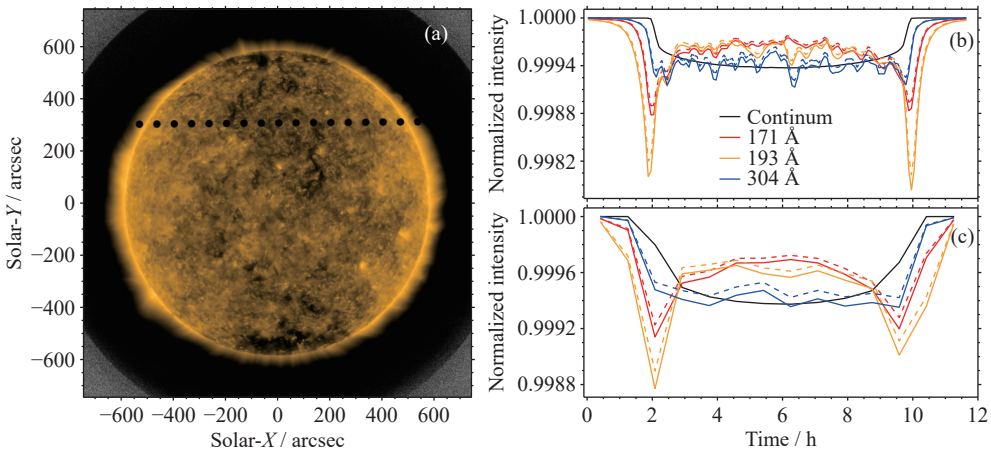


图 6 夸父二号观测地球凌日过程的模拟结果. (a) 根据卫星轨道计算得到的地球凌日过程中投影到太阳表面的位置及投影半径, (b) 凌日过程中极紫外 171, 193 和 304 Å及可见光波段的光变曲线, (c) 曝光时间提高至 50 min 时得到的光变曲线

Fig. 6 Simulation of the Earth's transit observed by SPO. (a) Projected position and radius of Earth on the solar disk during the transit, calculated based on the orbit of SPO. (b) Light curves in the EUV 171, 193 and 304 Å and visible bands. (c) Light curves obtained by increasing the exposure time to 50 minutes

从图 6(b) 可以看出, 在 171 Å和 193 Å波段的光变曲线上, 入食和出食阶段均出现由太阳临边增亮造成的凹槽特征. 实线为考虑图 4(b) 中大气吸收后的光变曲线, 虚线为忽略大气吸收的情况. 该特征在 304 Å波段较弱. 对比实线与虚线可知, 地球大气吸收对光变曲线整体形态的影响较小. 此外, 由于日冕辐射结构复杂, 极紫外波段的太阳图像远不如可见光图像平滑, 因此在光变曲线上会出现显著的短时标抖动. 如果将曝光时间提高至 50 min, 如图 6(c) 所示, 光变曲线上的短时标抖动显著减弱. 尽管长时间积分使入食和出食阶段由临边增亮导致的凹槽特征有所减弱, 但仍然可以在 171, 193, 304 Å波段清晰地识别到凌星时间的增长. 此外, 在 304 Å波段, 实线和虚线存在万分之一量级的光变信号变化, 该差异是由地球大气吸收造成, 而在 171 Å和 193 Å波段, 大气吸收导致的信号变化并不明显. 此外, 由于极紫外波段的辐射主要产生于日冕, 其辐射源区相比可见光波段更大. 因此, 在 304 Å波段光变曲线上, 凹槽的深度并未超可见光波段. 从图 6 可以看到, 在考虑地球大气的吸收后, 304 Å波段光变曲线上的凹槽积分面积仍然显著大于可见光结果. 考虑到在极紫外波段, 地球大气导致的遮挡半径仅约为 300 km, 对于大气层厚于地球大气的行星, 则更容易在极紫外波段探测到大气特征.

此外, 万分之一量级的光变信号对于系外行星探测而言极具挑战. 并且太阳本身的活动也会在极紫外波段上引起辐射强度变化, 从而进一步增加大气吸收的探测难度. 然而, 对于更大尺度的行星 (如木星或超级地球), 或是围绕体积更小的恒星 (例如红矮星) 运行的行星, 其行星与恒星之间的面积比更大, 因而凌星过程中产生的光变凹槽更深. 此时, 大气吸收导致的额外信号也更容易被探测到. 例如, LecaveLier 等[11,12]、Poppenhaeger 等[13] 以及 Turner 等[62] 已经在多个热木星系统的远紫外和 X 射线波段探测到比可见光更深的凌星凹槽.

图 7 给出了以图 6 结果为基础将地球及其大气整体放大 10 倍以后的模拟结果. 从图 7(b) 可以看到, 行星尺寸增大后, 极紫外波段光变曲线上因日冕结构造成的短时标抖动显著减弱, 与长曝光时间的结果 (图 7c) 较接近. 在 304 Å波段, 考虑和忽略大气影响产生的强度差异也由原本的 10^{-4} 增强至约 10^{-2} 量级. 类似地, 基于 SPO 实测得到的大气对极紫外辐射吸收特性, 可以将观测结果进行尺度放大, 来模拟和分析不同尺度行星凌日信号. 此类研究为未来利用极紫外观测系外行星凌星及探测行星高层大气提供了重要的参考.

4　结论与展望

夸父二号科学卫星将首次实现对太阳极区的正面成像观测, 有望在太阳磁活动周起源、高速太阳风起源以及太阳系空间天气过程等方面取得突破性进展. 在黄道面环日阶段, 夸父二号将具备对地球凌日完整过程进行多波段观测的机会, 这为分析地球高层大气成分与分布特征以及探索系外类地行星在极紫外波段的凌星信号提供了重要窗口. 本文围绕夸父二

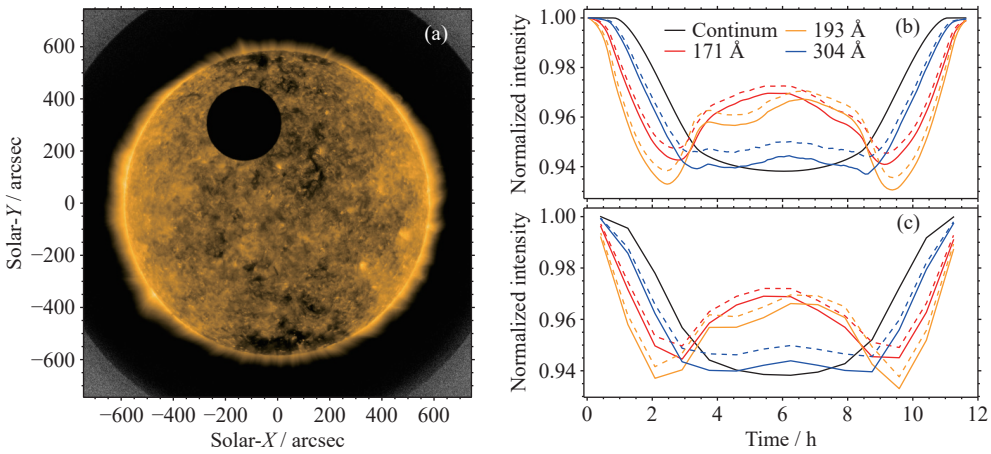


图 7　与图 6 类似但将图 6 中地球及其大气放大 10 倍以后的结果

Fig. 7　Same as Figure 6, but with the Earth and its atmosphere enlarged by a factor of 10

号未来可开展的地球凌日观测, 对其可能实现的科学研究内容进行了前瞻性分析.

地球凌日过程能够在极紫外 171, 193 和 304 Å 波段实现地球大气对太阳辐射的掩星观测, 为利用极紫外掩星技术探测地球大气的成分和分布特征提供关键机会. 正演模拟结果显示, 在这三个波段, 地球大气的半透高度主要分布在 250～350 km 范围内, 与电离层 F2 层的典型高度相当, 并对太阳活动水平表现出高度敏感性. 该高度范围内的吸收主要源于氧原子的电离, 而氮分子在约 250 km 高度附近也有一定贡献. 基于 NRLMSIS2.1 大气模型的反演测试证实了, 利用这些极紫外波段的透过率数据可有效反演地球热层 250～600 km (范围受太阳活动水平影响) 高度区间内氧原子的柱密度. 因此, 夸父二号的极紫外凌日观测有望为探测热层中性氧原子的垂直分布结构提供新结果. 对于在凌日过程中探测地球大气氧原子成分的研究, 仪器的空间分辨率至关重要. 根据当前的初步轨道估计, 凌日发生时, 地球与卫星距离较远, 地球大气在太阳盘面上的投影尺度较小, 需要较高的空间分辨率以获取充分的大气结构信息. 此外, 仪器杂散光引起的背景辐射以及仪器点扩散函数均会对观测数据产生系统性影响, 需要在任务设计和数据处理中进行充分评估与校正. 未来在获得观测数据后, 首先需要根据仪器的杂散光和点扩散函数对原始数据进行校正. 基于校正后的观测结果可直接反演得到柱密度, 在假设大气成分呈球对称分布的条件下, 可利用式 (5) 进一步推导数密度的垂直分布. 此外, 还可探索基于扩散平衡假设的数密度反演方法. 在误差估计方面, 将采用蒙特卡洛等统计方法对反演结果的不确定性进行评估.

凌星光变曲线分析是探测系外行星的核心方法之一. 可见光波段的光变曲线结合光谱观测可获取行星的质量、半径及轨道参数, 而在近紫外、极紫外及 X 射线等波段, 行星大气的吸收会显著增大其有效遮挡面积, 导致光变曲线上的凌星凹槽深度增加. 该现象已在多个热木星系统的紫外与 X 射线观测中得到证实[11–13,62], 但尚未在类地行星系统中被探测到.

模拟结果显示, 在极紫外 304 Å波段, 可能存在由地球大气吸收产生的微弱光度下降特征. 除了凹槽深度不同, 极紫外波段光变曲线观测到的凌星通常比可见光波段更早开始、更晚结束. 此外, 由于日冕临边增亮效应, 极紫外波段的光变曲线在入食和出食阶段还会产生更复杂的光变信号. 未来夸父二号卫星将在地球凌日期间开展多波段观测, 为验证上述理论方法提供宝贵的实测数据. 对于系外行星探测, 收集到的总光子数直接决定观测强度的信噪比, 是光变曲线数据分析的基础. 地球尺度凌日所产生的光变信号约为 10^{-4} 量级, 理想情况下需要达到相当精度的强度探测能力, 但在实际观测中要达到该精度难度较大. 因此, 本文提出通过对观测到的地球及其大气整体进行等比例放大, 用以模拟不同尺度系外行星系统在极紫外波段的凌星光变特征, 为未来在极紫外波段开展系外行星探测提供重要的定量参考与思路.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] WINN J N, FABRYCKY D C. The occurrence and architecture of exoplanetary systems[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2015, **53**(1): 409-447

[2] NASA. NASA Exoplanet Archive [EB/OL]. (2025-12-31)[2025-12-31]. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

[3] LISSAUER J J, FABRYCKY D C, FORD E B, *et al*. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11[J]. *Nature*, 2011, **470**(7332): 53-58

[4] BORUCKI W J, KOCH D, BASRI G, *et al*. Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 977-980

[5] KOCH D G, BORUCKI W J, BASRI G, *et al*. Kepler mission design, realized photometric performance, and early science[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, **713**(2): L79-L86

[6] SEAGER S, DEMING D. Exoplanet atmospheres[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2010, **48**(1): 631-672

[7] MADHUSUDHAN N, AGÚNDEZ M, MOSES J I, *et al*. Exoplanetary atmospheres—chemistry, formation conditions, and habitability[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **205**(1/2/3/4): 285-348

[8] MADHUSUDHAN N. Exoplanetary atmospheres: key insights, challenges, and prospects[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2019, **57**: 617-663

[9] BYCHKOV V, GOLUBKOV G, NIKITIN A, *et al*. The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Discharges and Plasmoids[M]. Dordrecht: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-2914-8

[10] THOMAS G E, STAMNES K. Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean[M]. Cambridge: Cambridge Uni-

versity Press, 2002

[11] LECAVELIER DES ETANGS A, EHRENREICH D, VIDAL-MADJAR A, *et al*. Evaporation of the planet HD 189733b observed in H I Lyman-α[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, **514**(10): A72

[12] LECAVELIER DES ETANGS A, BOURRIER V, WHEATLEY P J, *et al*. Temporal variations in the evaporating atmosphere of the exoplanet HD 189733b[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, **543**(4): L4

[13] POPPENHAEGER K, SCHMITT J H M M, WOLK S J. Transit observations of the hot Jupiter hd 189733b at X-ray wavelengths[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **773**(1): 62

[14] TIAN Hui, BAI Xianyong, DENG Yuanyong, *et al*. Scientific objectives and preliminary plans for EUV and X-ray observations of late-type stars[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, **52**(11): 119511 (田晖, 白先勇, 邓元勇, 等. 晚型恒星极紫外和 X 射线探测的科学目标与初步方案 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, **52**(11): 119511)

[15] TIAN Hui, BAI Xianyong, FENG Li, *et al*. Coronal explorer for the sun and nearby stars[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 881-898 (田晖, 白先勇, 封莉, 等. 空间天气探源计划 (探冕计划)[J]. 空间科学学报, 2025, **45**(4): 881-898)

[16] WANG Chi, WANG Yuming, TIAN Hui, *et al*. Strategic study for the development of space physics[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 9-42 (王赤, 汪毓明, 田晖, 等. 空间物理学科发展战略研究 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(1): 9-42)

[17] YAN Yihua, DENG Yuanyong, GAN Weiqun, *et al*. Strategic study for the development of solar physics in space[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 199-211 (颜毅华, 邓元勇, 甘为群, 等. 空间太阳物理学科发展战略研究 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(2): 199-211)

[18] DENG Yuanyong, TIAN Hui, JIANG Jie, *et al*. Probing solar polar regions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 913-942

[19] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The Solar Dynamics Observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 3-15

[20] REALE F, GAMBINO A F, MICELA G, *et al*. Using the transit of Venus to probe the upper planetary atmosphere[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 7563

[21] LEMEN J R, TITLE A M, AKIN D J, *et al*. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 17-40

[22] PÄTZOLD M, HÄUSLER B, BIRD M K, *et al*. The structure of Venus' middle atmosphere and ionosphere[J]. *Nature*, 2007, **450**(7170): 657-660

[23] FOX J L. The post-terminator ionosphere of Venus[J]. *Icarus*, 2011, **216**(2): 625-639

[24] FOX J L, SUNG K Y. Solar activity variations of the Venus thermosphere/ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A10): 21305-21335

[25] TANGA P, WIDEMANN T, SICARDY B, *et al*. Sunlight refraction in the mesosphere of Venus during the transit on June 8th, 2004[J]. *Icarus*, 2012, **218**(1): 207-219

[26] PERE C, TANGA P, WIDEMANN T, *et al*. Multilayer modeling of the aureole photometry during the Venus transit: comparison between SDO/HMI and VEx/SOIR data[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **595**(9): A115

[27] BRANCO A, MACHADO P, DEMANGEON O, *et al*. Transmission spectroscopy along the transit of Venus: a proxy for exoplanets atmospheric characterization[J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(12): 1431

[28] AHRER E M, STEVENSON K B, MANSFIELD M, *et al*. Early release science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRCam[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 653-658

[29] EMMERT J T. Thermospheric mass density: a review[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(5): 773-824

[30] MEIER R R, PICONE J M, DROB D, *et al*. Remote sensing of earth's limb by TIMED/GUVI: retrieval of thermospheric composition and temperature[J]. *Earth and Space Science*, 2015, **2**(1): 1-37

[31] STEPHAN A W, MEIER R R, ENGLAND S L, *et al*. Daytime O/N_2 retrieval algorithm for the Ionospheric Connection explorer (ICON)[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 42

[32] SHEESE P E, MCDADE I C, GATTINGER R L, *et al*. Atomic oxygen densities retrieved from optical spectrograph and infrared imaging system observations of O_2 a-band airglow emission in the mesosphere and lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D1): D01303

[33] TUMINELLO R M, ENGLAND S L, SIRK M M, *et al*. Neutral composition information in ICON EUV dayglow observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(8): e2022JA030592

[34] TUMINELLO R M, STEPHAN A W, ENGLAND S L. Retrieval of thermospheric O and N_2 densities from ICON EUV[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(2): e2023JA032100

[35] HAYS P B, ROBLE R G. Stellar spectra and atmospheric composition[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**(6): 1141-1153

[36] HAYS P B, ROBLE R G. Atmospheric properties from the inversion of planetary occultation data[J]. *Planetary and Space Science*, 1968, **16**(9): 1197-1198

[37] HAYS P B, ROBLE R G, SHAH A N. Terrestrial atmospheric composition from stellar occultations[J]. *Science*, 1972, **176**(4036): 793-794

[38] HAYS P B, ROBLE R G. Stellar occultation measurements of molecular oxygen in the lower thermosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 1973, **21**(3): 339-348

[39] ROBLE R G, HAYS P B. The nighttime distribution of

ozone in the low-latitude mesosphere[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1973, **106**(1): 1281-1289

[40] ROBLE R G, HAYS P B. On determining the ozone number density distribution from OAO-2 stellar occultation measurements[J]. *Planetary and Space Science*, 1974, **22**(9): 1337-1340

[41] CHANDRASEKHAR S. Radiative Transfer[M]. New York: Dover Publications, 1960.

[42] LI Z, WU X C, TU C, *et al*. Oxygen and air density retrieval method for single-band stellar occultation measurement[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(11): 2006

[43] ROBLE R G, HAYS P B. A technique for recovering the vertical number density profile of atmospheric gases from planetary occultation data[J]. *Planetary and Space Science*, 1972, **20**(10): 1727-1744

[44] LEWIS B R, GIBSON S T, HAWES F T, *et al*. A new model for the Schumann-Runge bands of O_2[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2001, **26**(7): 519-526

[45] CHU W P, MCCORMICK M P, LENOBLE J, *et al*. SAGE II inversion algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989, **94**(D6): 8339-8351

[46] LUMPE J D, BEVILACQUA R M, HOPPEL K W, *et al*. POAM II retrieval algorithm and error analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D19): 23593-23614

[47] LUMPE J D, BEVILACQUA R M, HOPPEL K W, *et al*. POAM III retrieval algorithm and error analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): 4575

[48] KYRÖLÄ E, TAMMINEN J, LEPPELMEIER G W, *et al*. GOMOS on Envisat: an overview[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(7): 1020-1028

[49] LUMPE J D, FLOYD L E, HERRING L C, *et al*. Measurements of thermospheric molecular oxygen from the Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D16): D16308

[50] LUMPE J D, MCCLINTOCK W E, EVANS J S, *et al*. A new data set of thermospheric molecular oxygen from the Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2020JA027812

[51] ZHANG Simin, WU Xiaocheng, SUN Mingchen, *et al*. Using onion-peeling method to inverse ozone density based on the stellar occultation technology in the near space region[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, **42**(1): 203-209 (张斯敏, 吴小成, 孙明晨, 等. 星光掩星剥洋葱法反演臭氧密度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, **42**(1): 203-209)

[52] LI Zheng, WU Xiaocheng, HU Xiong, *et al*. Applications and advances of stellar occultation technique in atmospheric oxygen density measurement[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(5): 1358-1375 (李政, 吴小成, 胡雄, 等. 恒星掩星方法在大气氧气密度探测中的应用与进展 [J]. 空间科学学报, 2025, **45**(5): 1358-1375)

[53] GREER K R, LASKAR F, EASTES R W, *et al*. The molecular oxygen density structure of the lower thermosphere as seen by GOLD and models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(8): 1358-1375

[54] SEWELL R H A, THIEMANN E M B, LAFYATIS J, *et al*. Thermospheric density, composition, and temperature from GOES-R/SUVI solar occultations[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(9): e2024SW004234

[55] EMMERT J T, JONES JR M, SISKIND D E, *et al*. NRLMSIS 2.1: an empirical model of nitric oxide incorporated into MSIS[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(10): e2022JA030896

[56] VERNER D A, FERLAND G J, KORISTA K T, *et al*. Atomic data for astrophysics. II. New analytic FITS for photoionization cross sections of atoms and ions[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, **465**: 487

[57] CONWAY R R. Photoabsorption and Photoionization Cross Sections of O, O_2, and N_2 for Photoelectron Production Calculations: A Compilation of Recent Laboratory Measurements[R]. Washington D C: Naval Research Laboratory, 1988

[58] THOMPSON M A, KRISSANSEN-TOTTON J, WOGAN N, *et al*. The case and context for atmospheric methane as an exoplanet biosignature[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(14): e2117933119

[59] BÉZARD B, CHARNAY B, BLAIN D. Methane as a dominant absorber in the habitable-zone sub-Neptune K2-18 b[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(5): 537-540

[60] STEVENSON K B, BEAN J L, SEIFAHRT A, *et al*. Transmission spectroscopy of the hot Jupiter wasp-12b FROM 0.7 TO 5 μm[J]. *The Astronomical Journal*, 2014, **147**(6): 161

[61] RIEKE M J, KELLY D M, HORNER S D. Overview of James Webb space telescope and NIRCam's role[C]//Proceedings of SPIE 5904, Cryogenic Optical Systems and Instruments XI. San Diego: SPIE, 2005: 590401. DOI: 10.1117/12.615554

[62] TURNER J D, PEARSON K A, BIDDLE L I, *et al*. Ground-based near-UV observations of 15 transiting exoplanets: constraints on their atmospheres and no evidence for asymmetrical transits[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **459**(1): 789-819

[63] Toriumi S, Airapetian V S, Hudson H S, *et al*. Sun-as-a-star spectral irradiance observations of transiting active regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **902**(1): 36

[64] XU Y, TIAN H, HOU Z Y, *et al*. Sun-as-a-star spectroscopic observations of the line-of-sight velocity of a solar eruption on 2021 October 28[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **931**(2): 76

[65] XU Y, TIAN H, VERONIG A M, *et al*. Sun-as-a-star observations of obscuration dimmings caused by filament

eruptions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **970**(1): 60

[66] YANG Z H, TIAN H, ZHU Y J, *et al*. Is it possible to detect coronal mass ejections on solar-type stars through extreme-ultraviolet spectral observations?[J] *The Astrophysical Journal*, 2024, **966**(1): 24. DOI: 10.3847/1538-4357/ad2a44

[67] LIU X F, HOU Y J, LI Y, *et al*. Sun-as-a-star analysis of the solar eruption source region using Hα spectroscopic observations of CHASE[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **993**(1): 126

[68] LLAMA J, SHKOLNIK E L. Transiting the sun: the impact of stellar activity on X-ray and ultraviolet transits[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **802**(1): 41

[69] LLAMA J, SHKOLNIK E L. Transiting the Sun. II. The impact of stellar activity on Lyα transits[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **817**(1): 81

[70] LLAMA J, SHKOLNIK E L. High energy exoplanet transits[C]//Proceedings of the International Astronomical Union. Cambridge: Cambridge University Press, 2016: 356-362. DOI: 10.1017/S1743921317004379

[71] QU Y, HOU Y, Yang S, *et al*. Probing Solar/Stellar Atmosphere through Planet Transit Ultraviolet Photometry. In preparation, 2026.

作者简介



李　昊　男, 1986 年 10 月出生于吉林省长春市, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 主要从事原子谱线偏振、太阳大气磁场反演等方面的研究.
E-mail: lihao01@nssc.ac.cn



田　晖（通信作者）　男, 1982 年 8 月出生于湖北省蕲春县, 北京大学地球与空间科学学院教授, 博士生导师, 主要从事太阳物理、恒星磁活动、空间极紫外探测等方面的研究.
E-mail: huitian@pku.edu.cn