

基于 X 射线掩星探测反演行星大气密度*

余道淳^{1,2} 李海涛^{1,2} 李保权^{1,2} 刘亚宁¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 X 射线掩星是一种常见的天文现象, 基于 X 射线掩星探测的大气密度反演是一种涉及学科交叉的新方法, 其通过处理高能 X 射线天体辐射源的掩星观测数据实现大气密度的反演, 基本原理为 X 射线在大气中传播时, X 射线光子被大气中的原子(包括分子中的原子)吸收和散射, 从而导致 X 射线强度发生衰减, 根据衰减后 X 射线信号的强度反演对应的密度廓线。本文根据 X 射线掩星探测的应用需求, 论证了基于 X 射线掩星实现大气密度反演的新方法, 重点介绍了光变曲线拟合和能谱拟合两种地球中高层大气密度反演算法, 分析了 X 射线掩星探测反演大气密度的研究进展和研究方法, 对基于 X 射线掩星反演大气密度的优点进行分析和讨论, 进而对 X 射线掩星探测的应用场景进行展望。结果表明, 作为一种新型中高层大气密度测量手段, X 射线掩星探测可对中高层大气密度实现有效探测, 弥补了目前中高层大气密度实测数据的不足。

关键词 X 射线掩星, 大气探测, 大气密度反演, X 射线衰减信号表征

中图分类号 P412.2

Methods of Planetary Atmospheric Density Retrieval Based on X-ray Occultation

YU Daochun^{1,2} LI Haitao^{1,2} LI Baoquan^{1,2} LIU Yaning¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract X-ray occultation is a common astronomical phenomenon. The retrieval of atmospheric density based on X-ray occultation sounding is a new method involving interdisciplinary research. This method realizes the inversion of atmospheric density by processing the measured occultation data of high-energy X-ray celestial radiation sources. The basic principle is that when X-rays propagate in the atmosphere, X-ray photons are absorbed and scattered by atoms in the atmosphere (including atoms in molecules), resulting in attenuation of X-ray intensity, and the corresponding density profile is retrieved

* 国家自然科学基金项目(41604152, U1938111)和中国科学院青年创新促进会项目(2018178)共同资助

2022-06-09 收到原稿, 2022-12-28 收到修定稿

E-mail: yudaochun18@mails.ucas.ac.cn. 通信作者 李海涛, E-mail: lihaitao@nssc.ac.cn; 李保权, E-mail: lbq@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

according to the intensity of the attenuated X-ray signal. This paper briefly introduces the application requirements of X-ray occultation sounding, and focuses on the analysis and demonstration of a new method for retrieving atmospheric density based on X-ray occultation. Firstly, the research progress and methods of atmospheric density retrieval by X-ray occultation sounding are introduced, and two kinds of density retrieval algorithms, light curve fitting and energy spectrum fitting, including the construction of forward model and the selection of likelihood function in parameter estimation, are introduced emphatically. Then, the advantages of atmospheric density retrieval based on X-ray occultation are analyzed and discussed. Finally, the application scenarios of X-ray occultation sounding are prospected. The results show that X-ray occultation sounding, as a new means of measuring the density of the middle and upper atmosphere, can effectively detect the density of the middle and upper atmosphere, and make up the shortage of the current measured data of the middle and upper atmosphere density.

Key words X-ray occultation, Atmosphere sounding, Atmospheric density retrieval, X-ray attenuation signal characterization

0 引言

X 射线掩星在 X 射线天文学中是一种普遍存在的现象,表示一个天体在观测者和天体 X 射线源之间通过时所发生的遮挡现象,如果被掩天体 X 射线源的视面积大于遮蔽天体的视面积,其也被称为 X 射线凌星。X 射线掩星/凌星是一种影响科学产出的现象,但利用掩星/凌星数据也可得到一些科学成果,早期基于 X 射线掩星/凌星探测主要开展了以下研究。

基于 X 射线掩星探测实现天体 X 射线源的定位^[1-3]、天体 X 射线源空间结构的测量^[4-7]以及天体 X 射线源的流量监测等^[8-11]。Bowyer 等^[1]通过分析蟹状星云(Crab Nebula)月球掩星期间 X 射线通量的变化,估计出该天体 X 射线源光源的直径超过 1 光年;Hoffman 等^[3]通过分析 OAO-3 卫星观测的天体 X 射线源 GX5-1 的月球掩星数据,得到了 GX5-1 天体 X 射线源的赤经赤纬坐标。康普顿伽马射线天文台(CGRO)上的暴发瞬态源实验(BATSE)和费米伽马射线太空望远镜(Fermi)上的伽马射线爆监视系统(GBM)利用地球掩星实现了天体物理源的定位与流量监测,其基本原理是在地球掩星过程中,天体 X 射线源的光变曲线呈缓慢变化的阶梯形状,如果利用光子计数的阶梯状特征将天体 X 射线源的信号和探测器背景分离出来就可以估计源的强度,并实现天体 X 射线源的定位与流量监测^[8-11]。

基于 X 射线掩星为航天器提供位置信息。其基

本原理是利用航天器上的 X 射线探测器接收来自某个天体 X 射线源发射的 X 射线信号,当航天器在围绕地球旋转时,该 X 射线源会从地球边缘落下,然后从另一边升起,航天器在地球背面停留的时间代表地球圆盘的弦长,只要再结合天体 X 射线源的位置和地球的尺寸参数,就可以确定航天器相对于地球的位置^[12]。但当 X 射线经过地球边缘时,会被地球大气层吸收,因此还需要了解地球大气层的结构和组分等信息,相关参数一般通过大气模型得到。该方法也可用于其他行星,但前提是已知该天体的尺寸、位置星历以及大气参数等^[12]。NRL-801 试验是 ARGOS 卫星搭载的八项试验之一,主要是基于 X 射线掩星测定航天器的轨道和姿态,但其精度受制于高层大气模型,只能达到几千米水平,因此该方法无法满足航天器高精度导航的需求^[13]。

X 射线掩星探测也被用于活动星系核性质的研究^[14,15]。活动星系核被认为是位于一些星系中心活动性很强的超大质量黑洞,可以发射很强的电磁辐射。Risaliti 等^[14]利用钱德拉望远镜观测到的康普顿厚云(Compton-thick cloud)经过 NGC 1365 活动星系核的 X 射线掩星过程,估计出该活动星系核 X 射线发射区域的半径 $R \leq 10^{14}$ cm 以及云到源之间的距离 $D \leq 10^{16}$ cm; Torricelli-Ciamponi 等^[15]利用 XMM-Newton 和 Suzaku 卫星观测到的一些活动星系核的光谱数据,分析发现宽线区云(BLR)掩星是造成观测光谱变化的主要原因。

基于 X 射线恒星掩星探测其他手段难以探测到的亚千米大小的小天体, 例如外柯伊伯带小天体 (KBO)^[16-18] 和海王星小天体 (TNO)^[19,20] 等。对于亚千米大小的小天体来说, 掩星过程中光学阴影会因为衍射而消失, 因此需要较短波长的观测。Chang 等^[20] 基于 RXTE/PCA 在 2007 年 6 月至 2011 年 10 月期间观测到的 TNO 掩星天蝎座 X-1 (Sco X-1) 事件, 研究了 TNO 尺寸与探测效率的对应关系, 并推导出 TNO 尺寸分布的上限介于 30~300 m 之间。

基于 X 射线凌星开展行星 (包括系外行星) 及其卫星的大气层厚度的测量。Mori 等^[21] 基于 2003 年 1 月 5 日钱德拉望远镜观测到的土星最大的卫星泰坦凌星蟹状星云事件, 成功捕获了一个 X 射线“凌星阴影”, 且该“凌星阴影”的直径比泰坦固体表面直径更大, 利用这个差异推导出了泰坦大气层的厚度约为 880 km; Poppenhaeger 等^[22] 基于钱德拉望远镜在软 X 射线能段观测到的系外行星 HD 189733 b 的凌星现象, 发现了 X 射线凌星深度比光学观测的要深得多, 并解释了行星外部大气层的吸收是导致 X 射线凌星深度更深的原因, 这种大气在光学波段是透明的, 但是对 X 射线是不透明的, 从而可以估计该行星大气层的厚度。

因此基于 X 射线掩星可开展天体 X 射线源的定位、结构测量和流量监测, 提供航天器的位置信息, 研究活动星系核的结构与性质, 探测并研究亚千米大小的小天体以及测量行星及其卫星的大气层厚度等工作。除了开展以上研究, 结合行星大气密度的先验知识和大气模型, X 射线掩星探测也可反演得到行星大气密度, 该方法利用高能 X 射线天体辐射源的掩星数据实现大气密度反演, 是一种涉及学科交叉的新方法^[23,24]。目前已有研究基于 X 射线掩星探测反演得到了地球临近空间的大气密度^[23,24], 地球临近空间大气密度可用于剖析日地关系和圈层耦合的物理机制, 同时对空天飞行器的设计与运行具有重要的应用价值。随着对地球临近空间大气密度需求的不断增加, 目前基于探空火箭以及卫星等的原位探测方法已无法满足研究需要, X 射线掩星探测为地球临近空间大气密度反演提供了一种有效手段。

本文分析了地球中高层大气密度 X 射线掩星探测方法的基本原理, 光变曲线/能谱前向模型的构建过程, 参数估计中似然函数的选择以及该方法反演大

气密度的优势, 并展望该方法未来的应用场景。

1 基本原理

天体 X 射线源发射的 X 射线经过行星大气时, X 射线光子会与行星大气中的原子 (包括分子中的原子) 发生相互作用, 即 X 射线会被行星大气中的原子吸收或散射, X 射线卫星上的 X 射线探测器临边接收经过大气衰减后的 X 射线光子信号, 从而获得经过大气衰减后的光变曲线和能谱观测数据, 这是大气密度反演的基础。

X 射线卫星在其运行的单次轨道上存在两次掩星过程: 天体 X 射线源从地球边缘升起以及天体 X 射线源从地球边缘落下^[23,25]。

如图 1 所示^[24], 其中, z' 为切点高度, 其是 X 射线卫星和天体 X 射线源之间的连线 (视线方向) 到地表的最短距离, 视线方向上到地表最短距离的点为切点, R 为行星半径, l_0 为 X 射线卫星的位置, l_∞ 为天体 X 射线源的位置, 卫星轨道和大气层的范围也标记在图 1 中。

1.1 X 射线经大气衰减后的信号表征

X 射线掩星是指由于卫星的轨道运动, 在卫星探测器视场内观测到天体 X 射线源进入或离开大气层的现象, 由于大气密度随着海拔高度降低而增大, 天体 X 射线源在视场中越靠近地球边缘的地方 X 射线光子衰减程度越大, X 射线探测器接收到的 X 射线辐射越暗弱^[23]。从掩星过程中天体 X 射线源的光变曲线上看, X 射线光子计数会出现阶梯状特征, 如图 2 所示。图 2 给出了蟹状星云掩星期间 Insight-HXMT 卫星上的 LE, ME, HE 望远镜观测到的光变曲线, 所

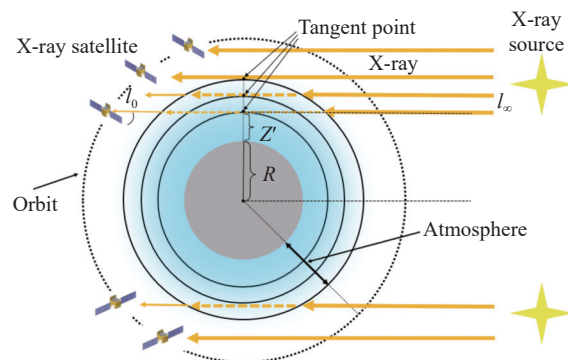


图 1 X 射线掩星观测几何

Fig. 1 Observation geometry of X-ray occultation

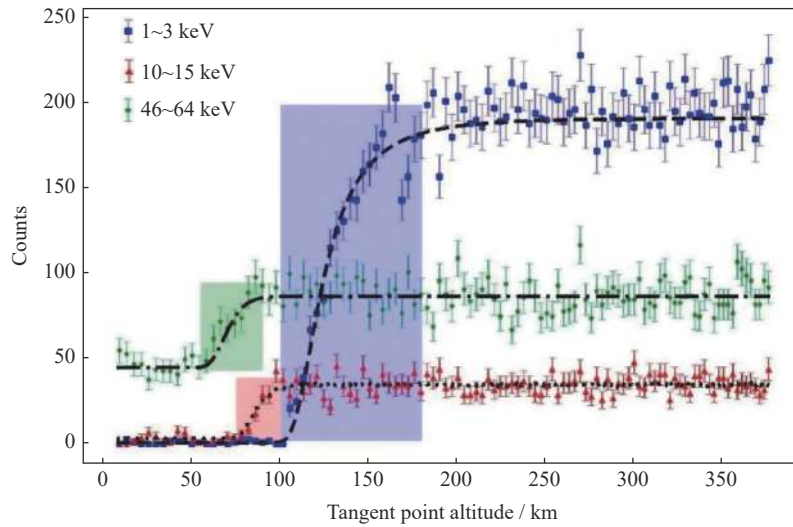


图2 基于 Insight-HXMT 观测数据得到的光线曲线

Fig. 2 Light curves obtained by Insight-HXMT observations

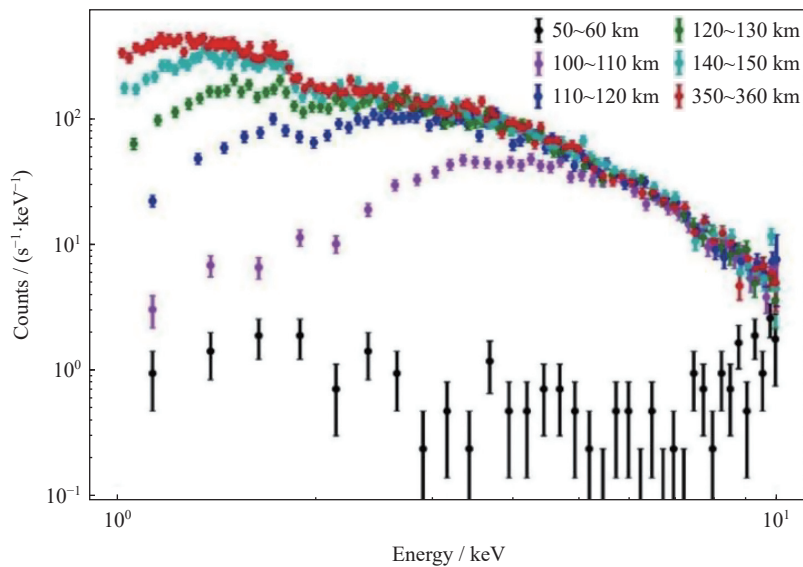


图3 掩星期间不同高度范围能谱对比

Fig. 3 Comparison of energy spectra at different altitude ranges during occultation

选取的能量范围分别是 1~3 keV, 10~15 keV, 46~64 keV, 可以看出不同能量范围的消光曲线对应的掩星高度不同, 三个能段对应的掩星高度在图 2 中分别用不同颜色的阴影标出, 其中 1~3 keV 能量范围的光子对 100~180 km 高度范围敏感, 10~15 keV 能量范围的光子对 70~100 km 高度范围敏感, 46~64 keV 能量范围的光子对 55~85 km 高度范围敏感, 因此可以通过拟合不同能量范围的光变曲线反演得到相应掩星高度范围的大气密度^[24,26]。

以地球为例, 图 3^[23] 给出了蟹状星云掩星过程中 Insight-HXMT 卫星每隔 10 km 海拔高度范围提取到的能谱数据, 该能谱能量范围介于 1~10 keV 之间, 其中 50~60 km 海拔范围内的能谱数据表示被地球大气层完全衰减, 350~360 km 海拔范围内的能谱数据表示未被地球大气衰减, 也称为参考谱, 100~110 km, 110~120 km, 120~130 km, 140~150 km 海拔范围内的数据点表示掩星期间的能谱, 但为了便于识别, 只列举出了掩星期间 4 个不同海拔范围内的

能谱。按照不同空间尺度提取掩星过程中 X 射线能谱, 发现随着海拔高度降低, X 射线能谱计数逐渐减少, 尤其较低的能段(< 5 keV)的能谱计数减少的更加显著^[23]。

通过以上分析发现, 掩星期间 X 射线经大气衰减后的信号通过光变曲线数据和能谱数据表征, 不同能量范围的光变曲线对应的掩星高度不同, 这 and 不同高度对应的大气密度大小有关, 通过拟合不同能量范围内的光变曲线模型和光变曲线数据就可以获得一系列掩星高度范围内的大气密度; 随着海拔降低, 大气密度增加, 被吸收的 X 射线光子数增加, 导致掩星期间不同海拔高度范围内能谱的计数存在差异, 通过拟合不同海拔高度范围内的能谱模型和能谱数据也可以获得一系列高度范围内的大气密度。

1.2 光变曲线/能谱前向模型构建

X 射线光子在大气中的衰减通过比尔朗伯定律(Beer-Lambert Law)描述^[23,24,26], 即

$$I(E, Z') = I_0(E)e^{-\tau(E, Z')}. \quad (1)$$

式中, $I_0(E)$ 为天体 X 射线源的参考能谱, $I(E, Z')$ 为经过大气衰减后的 X 射线能谱, $e^{-\tau(E, Z')}$ 为介质的透过率, $\tau(E, Z')$ 为光学厚度, 其计算公式为

$$\tau(E, Z') = \sum_g \int_{l_0}^{l_\infty} n_g(Z') \cdot \sigma_g(E) dl. \quad (2)$$

式中, g 为大气组分, $\sigma_g(E)$ 为各大气组分的 X 射线截面, $n_g(Z')$ 为各大气组分在切点高度处的数密度, 可由大气模型给出, 为了基于 X 射线掩星数据反演得到大气密度, 有时需要引入一个修正因子 γ , 则公式(2)可变为以下形式^[23], 即

$$\tau(E, Z') = \sum_g \int_{l_0}^{l_\infty} \gamma \cdot n_g(Z') \cdot \sigma_g(E) dl. \quad (3)$$

则大气密度的最终反演结果为

$$n(Z') = \sum_g \gamma \cdot n_g(Z'). \quad (4)$$

为了模拟生成 X 射线望远镜的光子计数, 需要引入 X 射线望远镜的探测器响应矩阵参数, X 射线望远镜的探测器响应矩阵将能量空间的光子计数转换到探测器的脉冲高度空间, 包含了 X 射线探测器的探测面积和量子效率信息以及能量空间到脉冲高度空间的映射关系^[27-31], 其表达式为

$$I_{\text{obs}}(P_i, Z') = \mathbf{R} \cdot I(E, Z') + B. \quad (5)$$

式中, $I_{\text{obs}}(P_i, Z')$ 为一个二维矩阵, 包含了探测器模拟计数和能量以及切点高度的对应关系, P_i 表示脉冲高度, $\mathbf{R}$ 为 X 射线探测器响应矩阵, B 为背景噪声。

$I_{\text{obs}}(P_i, Z')$ 包含了探测器模拟光子计数与能量以及切点高度的对应关系, 基于 $I_{\text{obs}}(P_i, Z')$ 可实现光变曲线以及能谱前向模型的构建, 即

$$I_{\text{lc}}(Z') = \sum_{i=E_0}^{E_N} I_{\text{obs}}(P_i, Z'). \quad (6)$$

式中, $I_{\text{lc}}(Z')$ 为光变曲线前向模型, 表示 $E_0 \sim E_N$ 能量范围内模拟光子计数随切点高度的变化关系。

$$I_{\text{spec}}(P_i) = \sum_{i=Z'_0}^{Z'_N} I_{\text{obs}}(P_i, Z'). \quad (7)$$

式中, $I_{\text{spec}}(P_i)$ 为能谱前向模型, 表示 $Z'_0 \sim Z'_N$ 海拔高度范围内模拟光子计数随能量的变化关系。

1.3 参数估计中似然函数的选择

利用非线性最小二乘拟合(Levenberg-Marquardt 算法)方法^[26,32,33]、最大似然估计方法^[34,35]以及贝叶斯估计^[36-39]方法均可以实现前向模型与观测数据之间的拟合, 从而反演得到大气密度。似然函数是一个关于模型中参数的函数, 表示该参数对应的模型与数据的似然性, 无论应用哪一种参数估计方法反演得到大气密度, 似然函数均扮演着重要角色。

由于 X 射线光子计数满足泊松分布, 因此评估模型拟合质量的最佳方法是每个通道内模型计数和数据点的泊松概率的乘积, 通过下式表示^[40-43]:

$$\ell = \prod_i \frac{M_i^{D_i}}{D_i!} e^{-M_i}. \quad (8)$$

式中, M_i 为第 i 个模型计数, D_i 为第 i 个数据点, 但为了计算上的便利, 常对式(8)进行一系列变换, 并取其自然对数形式, 从而得到泊松对数似然函数(C 统计)^[40], 即

$$C = 2 \sum_i \left(M_i - D_i + D_i \ln \frac{D_i}{M_i} \right). \quad (9)$$

相对于经常使用的 χ^2 统计量, C 统计作为参数估计中的对数似然函数有明显的优势, 其对于信噪比很低的光子计数(甚至光子计数为 0 或 1)也可拟合得到渐进无偏的参数估计^[41]。

2 研究现状

X 射线掩星探测为测量地球临近空间大气密度提供了一个独特的机会。Determan 等^[26]基于 RXTE/PCA 观测到的地球大气的蟹状星云 (Crab Nebula) 掩星事件以及 ARGOS/USA 观测到的地球大气的天鹅座 X-2 (Cygnus X-2) 掩星事件, 利用 Levenberg-Marquardt 算法分别拟合了 3.0~5.4 keV 和 17.9~42.6 keV 能量范围内的光变曲线模型和光变曲线数据, 得到了 100~120 km 以及 70~90 km 海拔高度范围内的大气密度, 拟合结果与 TIMED/SABER 的测量结果吻合较好, 但与 NRLMSISE-00 模型密度值存在显著差异, 这是基于 X 射线掩星探测反演大气密度的首次研究, 验证了基于 X 射线掩星反演地球临近空间大气密度的可行性。由于探测技术平台的限制, 地球临近空间大气密度实测资料较少, 目前该区域大气密度的获取主要基于理论外推, 但 X 射线波长非常适合探测这个区域, 体现出了潜在的应用价值, X 射线掩星为临近空间大气密度的获取提供了一种不可多得的技术手段。

Katsuda 等^[44]于 2021 年发展了一套基于能谱拟合 X 射线掩星大气密度的反演方法, 通过能谱拟合给出视线方向上大气总柱密度, 反推得到大气数密度, 对式 (2) 变形, 有

$$\tau = \sum_g N_g \cdot \sigma_g. \quad (10)$$

式中, N_g 为大气各组分柱密度, 大气各组分混合比由 NRLMSISE-00 模型给出。通过能谱前向模型拟合掩星期间的能谱数据, 反演得到大气总柱密度, 即

$$N = \sum_g N_g. \quad (11)$$

利用 Roble 等^[45]的方法将反演得到的大气总柱密度反推得到大气数密度。基于 X 射线天文卫星 Suzaku 和 Hitomi 对蟹状星云的 219 次地球掩星事件进行了分析, 并对掩星期间的能谱数据进行拟合, 给出了 70~200 km 海拔高度范围内地球低纬度地区的平均大气密度, 发现 X 射线掩星给出的大气密度与 NRLMSISE-00 模型密度值在 110~200 km 范围内基本一致, 在 70~110 km 范围内与 NRLMSISE-00 模型密度值有 50% 的偏差^[44]。Katsuda 等^[44]认为反演结果与 NRLMSISE-00 模型值之间的差异可能

和温室气体增加引起的高层大气冷却有关, 但短时太阳活动也可能对反演结果造成影响, 因此其通过处理 2005—2016 年一个太阳活动周期内的掩星数据, 得到了一条在时间和空间上高度平均的大气密度廓线, 来区分温室气体效应和短时太阳活动对反演结果的影响。此外, Katsuda 等^[44]通过 XRISM/Resolve 探测器参数, 模拟得到蟹状星云地球掩星期间 0.3~12 keV 能量范围内的能谱, 发现 N, O, Ar 等元素的 K 壳层吸收限清晰可见, 验证了利用 X 射线掩星反演大气各组分密度的可行性, 从而扩展了 X 射线掩星反演大气密度的应用范围。

中国科学院国家空间科学中心的科研人员基于 X 射线天文卫星“慧眼”(Insight-HXMT)的蟹状星云掩星数据, 开展了地球临近空间大气密度的光变曲线拟合反演方法研究和能谱拟合反演方法研究。Yu 等^[23,24]通过分析 Insight-HXMT 卫星低能 X 射线望远镜的蟹状星云掩星事件, 得到了掩星过程中光变曲线数据和能谱数据, 构建了掩星过程中光变曲线前向模型和能谱前向模型, 利用贝叶斯参数估计方法反演得到了地球临近空间的大气密度, 两种方法反演结果一致性较好, 且与 RXTE 反演结果定性一致, 但与 NRLMSISE-00 模型密度值之间存在差异。该研究证明了慧眼卫星拥有测量地球大气密度的能力, 将慧眼卫星掩星期间的废弃数据重新利用, 也提高了卫星数据的利用率, 同时验证了能谱拟合反演方法和光变曲线拟合反演方法获取地球临近空间大气密度的可行性。

Yu 等^[23]发展的能谱拟合方法不同于 Katsuda 等^[44]发展的能谱拟合方法, Katsuda 等^[44]的研究首先通过拟合 X 射线掩星过程中的能谱, 反演得到某个海拔范围内的大气柱密度, 然后反推出大气数密度, 而 Yu 等^[23]的研究直接通过拟合 X 射线掩星过程中的能谱给出 NRLMSISE-00 的修正值, 从而实现地球大气密度的反演。二者和光变曲线拟合方法均是反演大气密度的有效手段, 并且结合 X 射线天文卫星的掩星数据, 可实现全球范围内大气密度的长期监测, 为建立地球临近空间大气密度动态模型奠定基础。

X 射线掩星探测不仅被用来反演地球的大气密度, 还被用来研究火星大气密度。Rahmati 等^[46]基于 2016 年 3 月 13 日 MAVEN/SEP 探测到的火星大气的天蝎座 X-1 (Sco X-1) 掩星事件, 利用光变曲线拟合方法反演得到了 50~100 km 海拔高度范围内火星

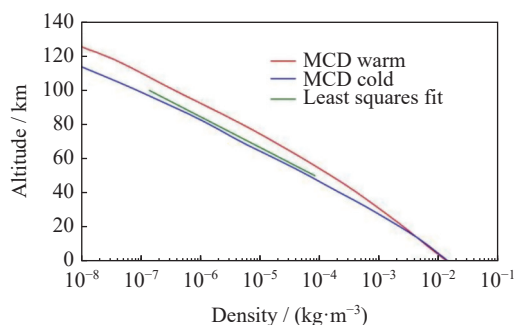


图 4 火星大气密度反演结果与 MCD 数据库中两条密度廓线的对比

Fig. 4 Comparison between Martian atmospheric density retrieved results and two density profiles in MCD database

大气密度,发现火星大气密度反演结果介于 MCD 数据库^[47]温暖条件下的大气密度值与寒冷条件下的密度值之间(见图 4)^[46],这是目前利用 X 射线掩星反演火星大气密度的首次研究。基于无线电掩星和紫外-红外波段的掩星对火星大气密度也开展过类似研究,但无线电掩星反演得到的火星大气密度的高度范围在 50 km 以下^[48-50],紫外-红外波段的掩星主要用以反演火星大气中单一组分的密度^[51-53],基于 X 射线掩星可反演火星总的大气密度,同时弥补了 50~100 km 这一火星大气层海拔范围内实测数据的不足,这为以后开展该区域范围内的火星大气研究提供了一种有效手段。

目前,结合行星大气密度先验知识和大气模型,基于 X 射线掩星探测已反演得到了地球和火星的大气密度,该方法与传统大气密度的原位探测方法和遥感探测方法相比具有如下优势。

(1)与紫外-红外波段的截面相比,X 射线截面独立于大气的热状态,而且 X 射线光子直接与原子内部的 K 壳层或 L 壳层的电子相互作用,使得 X 射线截面的计算相对于紫外-红外波段的截面更直接,不涉及激发和光电子输运过程,大大简化了模拟 X 射线吸收过程的复杂性^[23,24,26,44,47],通常 X 射线吸收截面精度优于 5%,这使得反演结果准确度更高^[26]。

(2)基于 X 射线掩星探测可以反演其他手段难以长时间探测的空间范围,以地球大气为例,目前基于 X 射线掩星探测反演的地球大气密度可以覆盖 70~200 km 的高度范围,这个高度范围是探空气球无法探测的高度,而且探空火箭也难以实现全球范围

内大气密度的长期监测,卫星原位测量高度在轨道附近(约 400 km),因此 70~200 km 的高度范围也被称为忽略层^[54],但 X 射线掩星探测根据地球大气对 X 射线的衰减特性,可对地球大气忽略层的大气密度进行反演,弥补了该高度范围内实测数据的不足^[23,24,26,44]。

(3)对于基于 X 射线掩星探测反演大气密度这种新方法来说,搭载在 X 射线卫星上的 X 射线探测器通常距离大气吸收发生的位置在千米以上,因此与原位探测方法相比,该方法的测量不会受探测器自身的干扰^[26]。

(4)基于 X 射线掩星反演方法不仅可以得到总的大气密度,还可以得到各组分的大气密度。以地球为例,当探测器的探测能量范围包含 N, O, Ar 等元素的吸收限时,在一定信噪比条件下就可以反演得到大气各组分的数密度^[40]。

3 结论与展望

综述了基于 X 射线掩星反演行星大气密度的原理、研究现状、技术优势。另外,随着航空航天、大气科学等领域的发展,基于 X 射线掩星反演大气密度越来越受到重视,未来将成为大气遥感领域研究的热点。

基于 X 射线掩星探测反演行星大气密度总体可以分为光变曲线拟合法和能谱拟合法,未来这两类方法可用来研究恒星辐射或空间天气对行星大气密度的影响,从而更好地理解行星大气结构。下一步应探索将新的密度反演数据,应用于相应的物理研究,及其时空变化特性,从而展现 X 射线掩星反演方法的意义和价值。

(1)太阳(恒星)直射区域的大气密度和背阴面的大气密度存在较大差异,通过 X 射线掩星可定量研究行星大气向阳面和背阴面密度的差异。

(2)以地球为例,有研究表明,密度增强事件和地磁活动存在紧密联系,利用 X 射线掩星可定量研究地磁活动强度对大气密度的影响。

(3)目前,X 射线地球天文卫星已发射多颗,积累了大量的 X 射线掩星数据,通过处理大量的 X 射线掩星数据,可分析地球临近空间约 50~200 km 范围内大气密度的时空变化规律,为建立地球临近空间大气密度动态模型奠定基础。

参考文献

- [1] BOWYER S, BYRAM E T, CHUBB T A, *et al.* Lunar occultation of X-ray emission from the Crab Nebula[J]. *Science*, 1964, **146**(3646): 912-917
- [2] FUKADA Y, HAYAKAWA S, KASAHARA I, *et al.* Lunar occultation of the hard X-ray source in the Crab Nebula[J]. *Nature*, 1975, **255**(5508): 465-466
- [3] HOFFMAN J A, DAVISON P J N, MORRISON L V. Accurate position of GX5-1 from Lunar occultations[J]. *Nature*, 1973, **244**(5415): 347-349
- [4] WOLFF R S, KESTENBAUM H L, KU W, *et al.* Measurement of the spiral structure of the X-ray source in the Crab nebula. I. Observation of the 1974 November 3 lunar occultation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1975, **202**(1): L15-L19
- [5] KESTENBAUM H L, KU W, NOVICK R, *et al.* Measurement of the spatial structure of the X-Ray source in the Crab Nebula. II. Observation of the 1974 December 28 Lunar occultation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1975, **202**(1): L21-L24
- [6] RIGGIO A, BURDERI L, DI SALVO T, *et al.* Subarc-second location of IGR J17480-2446 with *Rossi* XTE[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, **754**(1): L11
- [7] BORN E. On the analysis of lunar occultations of point-like X-ray sources[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1979, **63**(2): 439-455
- [8] ZHANG S N, FISHMAN G J, HARMON B A, *et al.* Imaging high-energy astrophysical sources using Earth occultation[J]. *Nature*, 1993, **366**(6452): 245-247
- [9] ZHANG S N, HARMON B A, PACIESAS W S, *et al.* Deep search for celestial hard X-ray emission by earth occultation with BATSE/CGRO[J]. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 1996, **120**(4): 137-140
- [10] HARMON B A, WILSON C A, FISHMAN G J, *et al.* The Burst and Transient Source Experiment (BATSE) Earth occultation catalog of low-Energy Gamma-Ray sources[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, **154**(2): 585-622
- [11] WILSON-HODGE C A, CASE G L, CHERRY M L, *et al.* Three years of *Fermi* GBM Earth occultation monitoring: observations of hard X-ray/soft gamma-ray sources[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2012, **201**(2): 33
- [12] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S, *et al.* Spacecraft navigation using X-Ray pulsars[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, **29**(1): 49-63
- [13] WOOD K S. Navigation studies utilizing the NRL-801 experiment and the ARGOS satellite[C]//Proceedings of SPIE 1940, Small Satellite Technology and Applications III. Orlando, FL, United States: SPIE, 1993: 105-116
- [14] RISALITI G, ELVIS M, FABBIANO G, *et al.* Occultation measurement of the size of the X-Ray-emitting region in the Active Galactic Nucleus of NGC 1365[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **659**(2): L111-L114
- [15] TORRICELLI-CIAMPONI G, PIETRINI P, RISALITI P, *et al.* Search for X-ray occultations in active galactic nuclei[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **442**(3): 2116-2130
- [16] ROQUES F, MONCUQUET M. A detection method for small Kuiper belt objects: the search for stellar occultations[J]. *Icarus*, 2000, **147**(2): 530-544
- [17] ROQUES F, MONCUQUET M, LAVILLONNIÈRE N, *et al.* A search for small Kuiper Belt Objects by stellar occultations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **594**(1): L63-L66
- [18] SCHLICHTING H E, OFEK E O, WENZ M, *et al.* A single sub-kilometre Kuiper belt object from a stellar occultation in archival data[J]. *Nature*, 2009, **462**(7275): 895-897
- [19] CHANG H K, LIU C Y, CHEN K T. Millisecond dips in the 2007-09 RXTE/PCA light curve of Sco X-1 and one possible occultation event[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, **411**(1): 427-434
- [20] CHANG H K, LIU C Y, CHEN K T. Search for serendipitous trans-Neptunian object occultation in X-rays[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, **429**(2): 1626-1632
- [21] MORI K, TSUNEMI H, KATAYAMA H, *et al.* An X-ray measurement of Titan's atmospheric extent from its transit of the Crab Nebula[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **607**(2): 1065-1069
- [22] POPPENHAEGER K, SCHMITT J H M M, WOLK S J. Transit observations of the Hot Jupiter HD 189733 b at X-ray wavelengths[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **773**(1): 62
- [23] YU D C, LI H T, LI B Q, *et al.* New method for Earth neutral atmospheric density retrieval based on energy spectrum fitting during occultation with LE/Insight-HXMT[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(9): 3426-3434
- [24] YU D C, LI H T, LI B Q, *et al.* Measurement of the vertical atmospheric density profile from the X-ray Earth occultation of the Crab Nebula with Insight-HXMT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, **15**(10): 3141-3159
- [25] HU Xiong, ZENG Zhen, ZHANG Xunxue, *et al.* Atmospheric inversion methods of GPS radio occultation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, **48**(4): 768-774 (胡雄, 曾桢, 张训械, 等. 大气GPS掩星观测反演方法[J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(4): 768-774)
- [26] DETERMAN J R, BUDZIEN S A, KOWALSKI M P, *et al.* Measuring atmospheric density with X-ray occultation sounding[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A6): A06323
- [27] TUO Y L, LI X B, GE M Y, *et al.* In-orbit timing calibration of the Insight-Hard X-Ray modulation telescope[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, **259**(1): 1

14

- [28] ZHU Y X, LU J B, LI X B, *et al.* Calibration of the energy response matrix for X-ray detector CCD236[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, **16**(5): P05016
- [29] NANG Y, LIAO J Y, SAI N, *et al.* In-orbit calibration to the point-spread function of Insight-HXMT[J]. *Journal of High Energy Astrophysics*, 2020, **25**: 39-47
- [30] LI X B, LI X F, TAN Y, *et al.* In-flight calibration of the Insight-Hard X-ray modulation telescope[J]. *Journal of High Energy Astrophysics*, 2020, **27**: 64-76
- [31] LU X F, LIU C Z, LI X B, *et al.* Design and calibration of the high energy particle monitor onboard the Insight-HXMT[J]. *Journal of High Energy Astrophysics*, 2020, **26**: 77-82
- [32] BUDIL D E, LEE S, SAXENA S, *et al.* Nonlinear-Least-Squares analysis of slow-motion EPR spectra in one and two dimensions using a modified Levenberg-Marquardt Algorithm[J]. *Journal of Magnetic Resonance, Series A*, 1996, **120**(2): 155-189
- [33] SHEN J J, BERK D E V, SCHNEIDER D P, *et al.* The black hole-bulge relationship in luminous broad-line active galactic nuclei and host galaxies[J]. *The Astronomical Journal*, 2008, **135**(3): 928-946
- [34] SAKRISON D. Efficient recursive estimation of the parameters of a radar or radio astronomy target[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1966, **12**(1): 35-41
- [35] BOCK R D, AITKIN M. Marginal maximum likelihood estimation of item parameters: application of an EM algorithm[J]. *Psychometrika*, 1981, **46**(4): 443-459
- [36] BUCHNER J, GEORGAKAKIS A, NANDRA K, *et al.* X-ray spectral modelling of the AGN obscuring region in the CDFS: bayesian model selection and catalogue[J]. *Astrophysics & Astrophysics*, 2014, **564**: A125
- [37] SANDERS N E, SODERBERG A M, GEZARI S, *et al.* Toward characterization of the type IIP supernova progenitor population: a statistical sample of light curves from Pan-STARRS1[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **799**(2): 208
- [38] CHIB S, GREENBERG E. Understanding the metropolis-hastings algorithm[J]. *The American Statistician*, 1995, **49**(4): 327-335
- [39] KITZMANN D, HENG K, ORESHENKO M, *et al.* Heliosr2: a new Bayesian, open-source retrieval model for brown dwarfs and exoplanet atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **890**(2): 174
- [40] CASH W. Parameter estimation in astronomy through application of the likelihood ratio[J]. *The Astrophysical Journal*, 1979, **228**: 939-947
- [41] NOUSEK J A, SHUE D R. χ^2 and C statistic minimization for low count per bin data[J]. *The Astrophysical Journal*, 1989, **342**: 1207
- [42] MIGHELL K J. Parameter estimation in astronomy with poisson-distributed data. I. The χ^2_γ statistic[J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, **19**(1): 380-393
- [43] LASS J, BOGGILD M E, HEDEGÅRD P, *et al.* Multinomial, Poisson and Gaussian statistics in count data analysis[J]. *Journal of Neutron Research*, 2021, **23**(1): 69-92
- [44] KATSUDA S, FUJIWARA H, ISHISAKI Y, *et al.* New measurement of the vertical atmospheric density profile from occultations of the Crab Nebula with X-ray astronomy satellites Suzaku and Hitomi[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): e2020JA028886
- [45] 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
- [46] RAHMATI A, LARSON D E, CRAVENS T E, *et al.* MAVEN SEP observations of Scorpius X-1 X-rays at Mars: a midatmosphere occultation analysis technique[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(21): e2020 GL088927
- [47] LEWIS S R, COLLINS M, READ P L, *et al.* A climate database for Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, **104**(E10): 24177-24194
- [48] HINSON D P, SIMPSON R A, TWICKEN J D, *et al.* Initial results from radio occultation measurements with Mars Global Surveyor[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, **104**(E11): 26997-27012
- [49] TELLMANN S, PÄTZOLD M, HÄUSLER B, *et al.* The structure of Mars lower atmosphere from Mars Express Radio Science (MaRS) occultation measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(2): 306-320
- [50] HINSON D P, ASMAR S W, KAHAN D S, *et al.* Initial results from radio occultation measurements with the Mars Reconnaissance Orbiter: a nocturnal mixed layer in the tropics and comparisons with polar profiles from the Mars Climate Sounder[J]. *Icarus*, 2014, **243**: 91-103
- [51] FORGET F, MONTMESSIN F, BERTAUX J L, *et al.* Density and temperatures of the upper Martian atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(E1): E01004
- [52] FEDOROVA A A, KORABLEV O I, BERTAUX J L, *et al.* Solar infrared occultation observations by SPICAM experiment on Mars-Express: simultaneous measurements of the vertical distributions of H₂O, CO₂ and aerosol[J]. *Icarus*, 2009, **200**(1): 96-117
- [53] SANDEL B R, GRÖLLER H, YELLE R V, *et al.* Altitude profiles of O₂ on Mars from SPICAM stellar occultations[J]. *Icarus*, 2015, **252**: 154-160
- [54] OBERHEIDE J, FORBES J M, ZHANG X, *et al.* Climatology of upward propagating diurnal and semidiurnal tides in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A11): A11306