0254-6124/2023/43(1)-0087-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Hongbo, ZHANG Mingjiang, XIONG Jianning. Effects of Solar Extreme Ultraviolet Radiation on Thermospheric Neutral Density (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 87–100. DOI:10.11728/cjss2023.01.211217130

太阳极紫外辐射对热层大气密度的影响*

汪宏波[1] 张明江[1,2] 熊建宁[1,2]

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210023)

摘 要 对2001－2021年SOHO卫星的极紫外辐射测量数据，以及CHAMP，GRACE-A和SWARM-C卫星资料推导出的高分辨率大气密度数据进行统计分析，发现大气密度与极紫外测量值的相关系数大于密度与$F_{10.7}$指数的相关系数，证实极紫外辐射在不同地方时的影响程度存在显著差异，从而驱动大气密度的周日变化。利用三颗卫星的高度差异揭示极紫外辐射对大气密度的加热效应在350～500 km范围随着高度增加而减弱。统计得到极紫外辐射影响在地方时和纬度上的空间差异：对夏季半球的影响大于冬季半球；在白天，对中纬度地区的影响高于赤道和高纬度地区；在夜间，密度对辐射的斜率在夏季半球高纬度地区存在峰值，在冬季半球中纬度存在谷值，模型DTM2000和NRLMSISE00未能准确刻画。为了改进经验模型，提出基于球谐函数的拟合方法，优于主流模型周日效应采用的表达式，对周日效应建模和修正提供有益借鉴。利用昼夜间能量传输和热层大气经向环流机制探讨了统计结果的物理机制。

关键词 热层大气密度，太阳极紫外辐射，相关性分析，周日效应

中图分类号 P353

Effects of Solar Extreme Ultraviolet Radiation on Thermospheric Neutral Density

WANG Hongbo[1] ZHANG Mingjiang[1,2] XIONG Jianning[1,2]

1(*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210023)

2(*Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210023)

Abstract The Solar Extreme Ultraviolet (EUV) radiation is well known as the major source of energy of driving the Earth atmospheric motion and transformation. The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$) instead of EUV measurement is often used in the thermospheric neutral density models, to calculate the thermosphere density and temperature. In this paper, the continuous measurements of EUV from SEM instruments onboard the SOHO satellite during 2001－2021 are directly compared with the densities de-

* 国家自然科学基金项目资助（U1931136）

2021-12-16收到原稿，2022-06-30收到修定稿

E-mail：whb@pmo.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/)

rived from accelerometers onboard the CHAMP, GRACE-A and SWARM-C satellites, to reveal the essential relation between the solar EUV radiation and the thermosphere density. It is found that the correlation coefficients between the EUV data and the densities are obviously greater than those between the $F_{10.7}$ indexes and the densities, which proves that the solar EUV radiation is the dominant energy source of heating the thermosphere rather than the radio radiation. From the liner regression slopes at different local time, it is shown that the maximum value occurs at 15:00 LT (corresponding to 14:00－16:00 LT), while the minimum value at 01:00 LT (00:00－02:00 LT), which confirms that the EUV radiation derives the diurnal variation of the thermosphere. According to the statistical results from three satellites with different orbital altitudes, it is indicated that in the 350～500 km altitude region, the heating effect of the EUV radiation at lower altitude is more intense than that at higher altitude (considering absolute variation). Because of the high spatial resolution of the observation of three satellites, the difference in the effect of the EUV radiation at various local time and geographic latitudes can be concluded: the slope in summer hemisphere is greater than that in winter hemisphere; in the dayside, the slope at the mid-latitudes is greater than that at the equator and high latitudes; in the nightside, the maximum of the slope appears at the high latitude of summer hemisphere, which is not described by the thermosphere models such as DTM2000 and NRLMSISE00 yet. In order to improve the modeling of the effect of the EUV radiation, the fitting method of six-order spherical harmonics is proposed. Compared with the formulas of the present models, the spherical harmonics are more valuable in improving the model construction or correction of the EUV effect and the thermosphere diurnal variation.Atlast,thephysicalmechanismofstatisticalresultsisdiscussedbyconsideringtheenergytransmissionandmeridional circulation in the thermosphere.

Key words Thermosphere neutral density, Solar extreme ultraviolet radiation, Correlation analysis, Diurnal variation

0 引言

太阳极紫外辐射(波长范围 10～200 nm)是中高层大气分布及其变化的能量来源,对大气有直接的加热效应。极紫外辐射在穿越大气层过程中被吸收,较难到达地面,使得对其测量往往需要到外层空间进行。目前,可测量太阳极紫外辐射的仪器包括 SOHO 卫星搭载的 SEM(Solar EUV Monitor)[1,2]、TIMED 卫星搭载的 SEE(Solar EUV Experiment)[3] 及 SDO 卫星上的 EVE(EUV Variability Experiment)[4]。其中,SOHO 卫星 SEM 载荷的观测数据历史最长,从 1996 年开始对极紫外辐射进行了长期不间断观测,获得了高精度的连续数据。

另外,航天工程应用中需要可常规获取的太阳辐射指数,但地面上不能直接测量极紫外辐射,所以目前主流的大气密度模型一般采用太阳 10.7 cm 射电辐射流量($F_{10.7}$)作为极紫外辐射的替代表征,定量刻画太阳辐射对大气密度和温度的影响。有研究在热层大气物理模型 NCAR-TIEGCM 中输入 $F_{10.7}$ 指数,模拟计算第 23 太阳活动周 400 km 高度的大气密度,并统计分析密度与 $F_{10.7}$ 的关系,证实了两者变化趋势基本一致[5]。因此,$F_{10.7}$ 用于大气密度模型,可以在 11 年长周期和 27 天短周期尺度上描述太阳活动对密度的影响。然而,从测量对象的物理本质看,10.7 cm 射电辐射不能等同于极紫外辐射,在时间序列和能量强度等方面存在明显的细节差异。随着空间任务对大气模型精度需求的日益提升,$F_{10.7}$ 已成为制约模型精度的瓶颈之一[6,7]。

自 2001 年以来,以高精度测量地球引力场、磁场为科学目标的 CHAMP, GRACE 和 SWARM 计划相继实施,携带了星载加速度计和新型 GPS 接收机,对卫星受到的非引力加速度和位置速度进行高精度

和高时空分辨率测量。很多机构和作者处理这些资料获得了卫星飞行路径上的大气密度就位探测资料，这种连续、海量的高分辨率数据对研究大气密度分布与变化规律具有重要价值[8,9]。

本文利用 SOHO 卫星的极紫外辐射测量数据，与 CHAMP, GRACE 和 SWARM 卫星获得的大气密度数据进行统计研究，分析极紫外辐射对大气密度的影响，特别是在高度、地方时和纬度上的特征差异，为今后大气密度周日效应建模和修正提供实测依据。

1 数据及预处理

1.1 太阳极紫外辐射测量数据

SOHO 卫星 SEM 仪器提供了两个波段范围的极紫外辐射测量数据，分别是 26～34 nm 波段和 0.1～50 nm 波段。经分析，两种数据有极高的相关性（相关系数高达 0.99），本文选择 26～34 nm 数据作为研究对象。此外，数据有 15 s和 1 d 两种分辨率，考虑到大气密度变化主要源自极紫外辐射的能量累积和加热效应，作为统计研究，1 d 分辨率数据已经足够。SOHO 卫星的轨道信息、极紫外辐射测量数据的时间范围如表 1 所示。

1.2 大气密度数据

CHAMP 卫星由德国地球科学研究中心（GFZ）管理[10]，GRACE 卫星由美国国家航空航天局（NASA）和 GFZ 等联合实施[11]。本文使用美国科罗拉多大学发布的 CHAMP 和 GRACE 飞行轨迹上的热层大气密度数据（2008 年以前），以及文献 [12] 处理的 GRACE 密度数据。SWARM 卫星是 2013 年由欧洲空间局（ESA）实施的由三颗卫星组成的星座计划，主要测量地球磁场及其不同时间尺度的变化规律[13]。其官方数据中心发布了由 SWARM-C 卫星加速仪资料生产的大气密度数据。CHAMP，SWARM-C 和 GRACE-A 三颗卫星的轨道高度、密度数据分辨率和时间范围如表 1 所示。从时间跨度上看，CHAMP 和 SWARM-C 卫星分别是 7 年，GRACE-A 卫星长达 12 年。这些数据的联合使用能够较好地覆盖太阳活动第 23 周和 24 周。

1.3 数据预处理与资料选择

1.3.1 大气密度的高度归一化处理

CHAMP, SWARM-C 和 GRACE-A 三颗卫星运行在近地轨道，受大气耗散影响，轨道高度分别有 130 km, 65 km 和 100 km 的衰减（见表 1），采样高度的变化导致了大气密度的长期变化。因此，需要消除不同采样高度对密度的影响，才能凸显极紫外辐射的影响特征。首先，分析每颗卫星的高度分布，取各自的高度中值为统计样本所在的高度 Z_0（CHAMP 为 380 km, SWARM-C 为 460 km, GRACE-A 为 480 km）。然后，利用密度随高度的指数分布规律，将每个样本的密度值按线性比例方法归算到对应的 Z_0。归算步骤可以借用大气模型。

1.3.2 大气密度的地方时归算

大气密度存在随地方时变化的周日效应，密度涨落最大有 2～4 倍，变化曲线近似为三角函数。所以在描述极紫外辐射对大气密度影响时，不能简单归算至一个统一时刻，而是需要将 00:00－24:00 LT 按照 2 h 宽度划分为 12 个区间，再将每个区间内样本的大气密度归算至区间中值时刻，例如 00:00－02:00 LT 区间内所有样本统一按线性比例方法归算至 01:00 LT, 02:00－04:00 LT 区间的样本归算至 03:00 LT，依此类推。归算步骤也是借助大气模型。

本文使用的三颗卫星都属于极轨卫星，星下点地方时轨迹分布如图 1 所示（以同一天的 CHAMP 和 GRACE-A 轨道为例），每天的资料可分为两个典型区域：日照区和阴影区，分别对应白天半球和夜间半球，且地方时相差 12 h。

表 1 用于研究的卫星数据资料

Table 1 Information of satellites' data used in this study

Data	Satellite	Altitude / km	Time resolution/s	Time range	Institution
EUV	SOHO	1500 000	86 400	2001-10-01至 2021-05-31	NASA, ESA
Density	CHAMP	330～460	45	2001-10-01至 2008-12-31	Colorado, USA
	SWARM-C	445～510	10	2014-02-01至 2021-05-31	ESA
	GRACE-A	420～520	10	2002-04-05至 2008-12-31 2009-01-01至 2014-12-05	Corolado,USA PMO

1.3.3 大气密度在地理纬度上平均化处理

由于极轨道在同一上升段或下降段南北纬 70°间地方时变化很小(跨度小于 0.5 h)且样本密集,所以本研究选取这一纬度范围的资料做分析,并按照日照区和阴影区分别计算。当描述大气整体变化时,用南北纬 70°之间的平均值作为表征。当描述纬度差异时,选择 10°为间隔,将南北纬 70°之间范围划分成 14 个区间,每个区间用其中值φ_j 标记,j 为 1～14,φ_j 取值依次为(–65°, –55°, –45°, –35°, –25°, –15°, –5°, 5°, …, 55°, 65°)。每个区间的上下限为(φ_j–5°, φ_j+5°),然后对每个区间内的样本取密度平均值。

1.3.4 按照地磁活动强度选择资料

为研究太阳极紫外辐射对大气的作用,需要避免地磁扰动的影响。本文选择地磁扰动水平较低时的资料,具体判据是每日最大 3 h 地磁指数 ap 小于 22,且前一日平均地磁指数 Ap 小于 27。这样能最大限度地剔除存在明显地磁扰动影响的资料,同时保证足够的样本量。经筛选,共选取的资料为 CHAMP 卫星 1751 天,SWARM-C 卫星 1888 天,GRACE-A 卫星 3229 天,约占总资料天数的 70%。

2 分析方法与结果

采用将大气密度实测值与太阳辐射指数及实测资料进行相关性分析的统计方法。因为热层密度对太阳辐射变化的响应存在约 1 天的时间延迟[14],根据主流大气模型建模经验,相关分析中采用前一天的太阳辐射日值与当天的大气密度平均值。线性拟合中暂不引入 81 天辐射均值,原因说明如下。Jacchia[15] 和 Hedin[16] 较早地发现引入太阳射电辐射流量的周期均值参与大气建模,可以取得较好的资料拟合效果,因此主流模型都将周期均值和日值作为输入参数。Hedin 等[17] 提出,使用 3 或 5 个月的 10.7 cm 辐射流量滑动平均值是为了描述太阳长期变化,然后用辐射日值与均值之差描述太阳短期或者 27 天变化。所以认为 81 天均值可以很好地描述大气密度长期变化与太阳 11 年周期的关系,对于建模过程中时间跨度达 2～3 个太阳基本周期的资料是很有必要的。本文在拟合太阳辐射与大气密度时,为确保相同系统差和高度范围,只针对单一卫星资料拟合,资料的时间跨度较短(尤其是 CHAMP 和 SWARM 的资料不足半个太阳基本周期),故使用辐射日值做拟合已经足够。另外,本文侧重于定量统计在 1 天时间分辨率条件下,平均密度随太阳辐射变化的斜率,不引入 81 天辐射均值会牺牲一些拟合相关性,但能得到物理意义更清晰的密度对辐射的导数(表征加热效应的程度),有利于围绕多星资料和多种时空条件进行量化比较。

2.1 个例研究

首先选择无明显地磁扰动情况下 3 个太阳自转周资料,观察日照区平均大气密度时间序列和极紫外辐射时间序列,分析他们之间的相关性。然后选择一次太阳爆发事件,观察大气密度涨落和极紫外辐射之间的关系。

2.1.1 无明显地磁扰动情况下的 3 个太阳自转周

2002 年 4 月 25 日至 7 月 11 日,共计 79 天,跨度约 3 个太阳自转周期。图 2 中,$F_{10.7}$ 指数在 130～

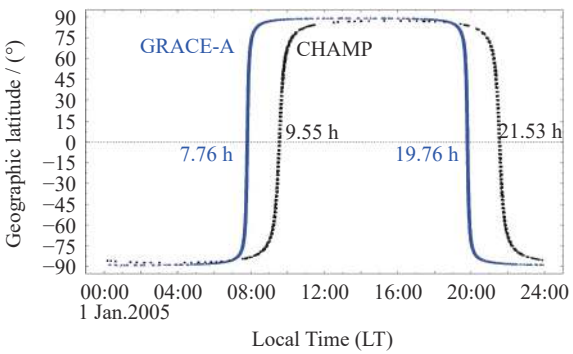

图 1 CHAMP 和 GRACE-A 星下点地方时轨迹分布

Fig. 1 Sub-satellite point trajectory of CHAMP and GRACE-A

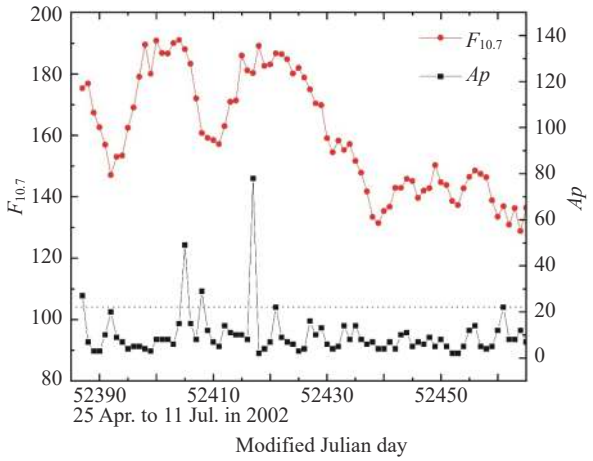

图 2 太阳射电辐射 $F_{10.7}$ 与日平均地磁 Ap 指数的变化

Fig. 2 Solar radio index $F_{10.7}$ and geomagnetic index daily Ap

191 之间起伏变化, 既有 2 个明显的周期波动(儒略日 52433 之前), 又有显著的线性下降趋势(52433 之后)。在同时期, 日地磁指数 Ap 基本上都在 22 以下波动(仅有 3 天例外, 可以排除这些资料)。表明这段时间太阳存在较明显的辐射变化, 但地磁活动总体处于低水平。

这期间, CHAMP 卫星在日照区的星下点从 15:00 LT 至 08:00 LT 变化, 高度在 396～428 km 起伏。首先, 用本文 1.3.1 和 1.3.2 节所述方法将日照区域南北纬70°之间所有大气密度归算到统一的高度(Z=404.48 km)和地方时(11:43 LT), 以消除纬度、高度和地方时等因素变化引起的密度起伏, 然后计算日照区平均密度。

图 3(a)为 CHAMP 测量数据归算后日照区平均密度, 并与 $F_{10.7}$ 指数随时间变化的对比, 图 3(b)为两者的线性相关分析。可以看出, 大气密度变化与 $F_{10.7}$ 变化趋势总体吻合, 既有周期起伏, 也有长期下降, 相关系数为 0.851。图 3(c)和(d)是 26～34 nm 极紫外辐射测量值与大气密度的对比, 可以发现大气密度与 SEM 测量值相关系数更高, 为 0.918。这表明, 相比于射电辐射指数 $F_{10.7}$, 极紫外辐射与大气密度的相关性更加显著。

2.1.2 一次剧烈太阳爆发事件

在 2003 年 10 月 16 日－11 月 11 日的一个太阳自转周期内, 发生了一次剧烈的太阳爆发事件, 太阳辐射指数 $F_{10.7}$ 从 95 增大到 279 再恢复到 95。期间还引发了一次地磁指数 ap 峰值为 400 的特大磁暴(与太阳爆发峰值时刻重合, 10 月 29－30 日对应简约儒略日 52941～52942)。

首先, 对比每天日照区平均大气密度与极紫外辐

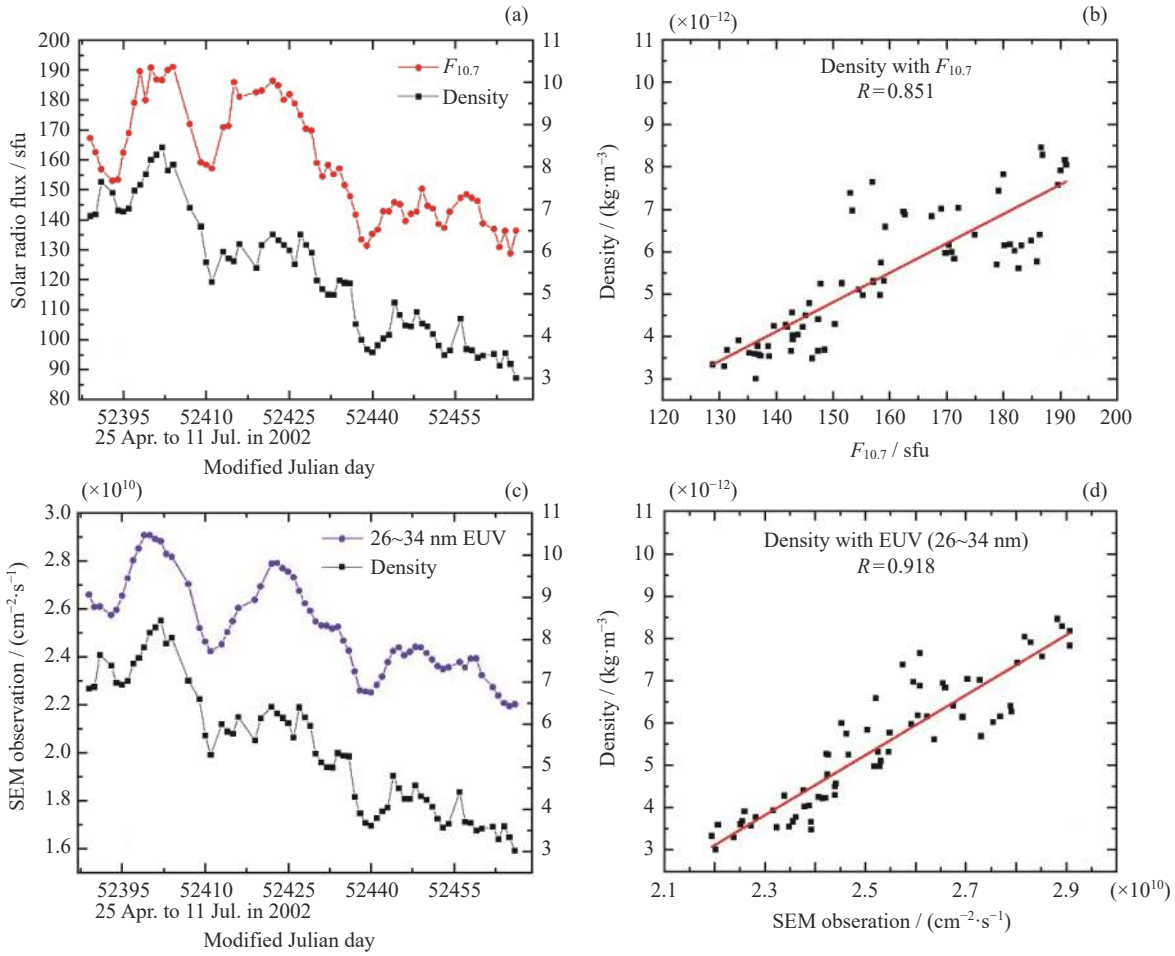

图 3 CHAMP 卫星记录大气密度变化与射电辐射指数 $F_{10.7}$ 和 26～34 nm 极紫外辐射测量值的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis by comparing densities variation observed by CHAMP with the solar radio index $F_{10.7}$ and EUV measurements at 26～34 nm wavelength

射测量值(见图 4)。可以看出,大气密度与极紫外辐射同步涨落,在极紫外辐射峰值时刻,大气密度也达到了峰值;以爆发前水平为参照,极紫外辐射从 1.71 增大到 21.41(单位均为10^{10} $cm^{-3}\cdot s^{-1}$,下同),增幅 11.5 倍,大气密度从 3.83 增大到 11.47(单位均为10^{-12} $kg\cdot m^{-3}$,下同),增幅 2 倍。进一步地,这次爆发事件还可细分为 3 个阶段:爆发前阶段(简约儒略日 52928～52939);剧烈爆发阶段(简约儒略日 52940～52943);爆发恢复阶段(简约儒略日 52944～52954)。可以发现,在剧烈爆发之前大气密度已经有明显抬升趋势,爆发后大气密度存在一个缓慢下降的过程。

为了更清晰地展示不同阶段的细节特征,可以单独分析爆发前和爆发后的样本(见图 5)。图 5 (a)(b)是爆发前共 12 天的情况,极紫外辐射从 1.71 增长到 2.45,增幅 43%,大气密度从 3.83 增长到 6.97,增幅 82%,图 5(b)图是爆发前阶段线性相关分析,相关系数为 0.939,斜率为 3.844。图 5(c)是爆发后共 10 天的情况(排除了 MJD 为 52946 的异常值),图 5 (d)给出的是爆发后线性相关分析,相关系数为 0.937,斜率为 2.746。图 5(a)(b)的曲线形态,以及相关系数均超过 0.93,说明无论爆发前或爆发后,太阳极紫外辐射都主导了大气密度的涨落。对比图 5 (b)和(d)中的斜率数值可以发现,爆发前的大气密度随极紫外的变化斜率更大,是爆发后的 1.4 倍,意味着爆发后的密度

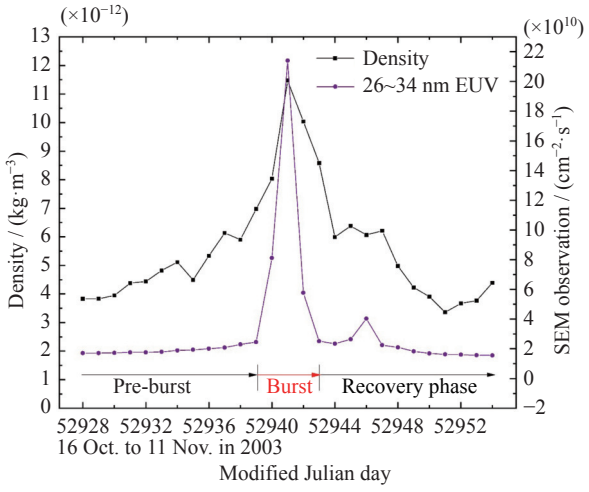

图 4 一个太阳自转周一次剧烈太阳爆发事件中 CHAMP 记录到的大气密度随极紫外辐射的变化

Fig. 4 Comparison of the densities observed by CHAMP with EUV measurement at 26～34 nm wavelength during a solar burst in the rotation cycle

下降速率相对趋缓。对比分析爆发前后的空间环境,发现原因是剧烈空间环境事件中,大气密度受到太阳和地磁两个因素共同主导,在恢复阶段,大气密度随极紫外辐射减弱而下降,2 次地磁爆发(10 月 31 日 *ap* 峰值 236,11 月 4 日 *ap* 峰值 132)带来额外的能量输入,引起大气密度增大且持续数天,两个相反的效应相互叠加,使得大气密度总体的衰减趋势被延缓。这也恰恰说明,在分析太阳辐射对大气影响时应尽量选择地磁活动水平较低时的资料,以避免地磁活动对统计结果的影响。

本次太阳爆发事件中,GRACE-A 卫星也记录了大气密度的涨落(见图 6)。可以看出,两颗卫星的密度变化曲线形态完全吻合,相关系数达 0.998。尽管其在不同的高度(高度差 100 km)、不同的轨道面(日照区 13:00 LT 和 16:00 LT),表明这次强烈的太阳爆发事件对不同区域大气密度变化起到一致的主导作用。差异在于 GRACE 的密度从 0.69 增大到 2.83,绝对增幅 2.14,明显小于 CHAMP 卫星探测到的密度绝对增幅 7.64。斜率及其变幅的差异,与两颗卫星所在高度和地方时有关。更详细地分析爆发前后两个阶段,结果显示相关系数分别为 0.956 和 0.954,两个阶段的变化斜率分别是 1.087 和 0.742,爆发前的斜率是爆发后的 1.46 倍。这种对比关系与 CHAMP 结果非常吻合。

2.2 长期统计分析

首先给出 2 个特殊地方时(周日峰、周日谷)的结果。图 7 给出的是阴影区 00:00－02:00 LT 区间、日照区 14:00－16:00 LT 区间分别得到的大气密度与极紫外辐射的相关关系及其斜率。可见无论日照区还是阴影区,相关系数都很高,超过 0.97,说明极紫外辐射主导着全球密度变化。从斜率上看,日照区周日峰(中值 15:00 LT)的斜率 5.848,而阴影区(中值 01:00 LT)斜率为 2.841,前者是后者的 2.1 倍。这说明,太阳极紫外辐射对于不同地方时大气的加热程度有很大差别,从而驱动了大气密度周日效应。更多地方时区间的统计结果见表 2。比较表 3 中的大气密度与辐射的相关系数平均值,发现用极紫外测量值计算的相关系数比 $F_{10.7}$ 指数的计算结果大,说明极紫外测量值与大气密度的相关性更强。表 3 还给出了按白天和夜间统计的斜率平均值,可以看出夜间斜率分别为白天的 69%,58% 和 59%,并且随着高度的增大,相关系数和斜率都在降低。

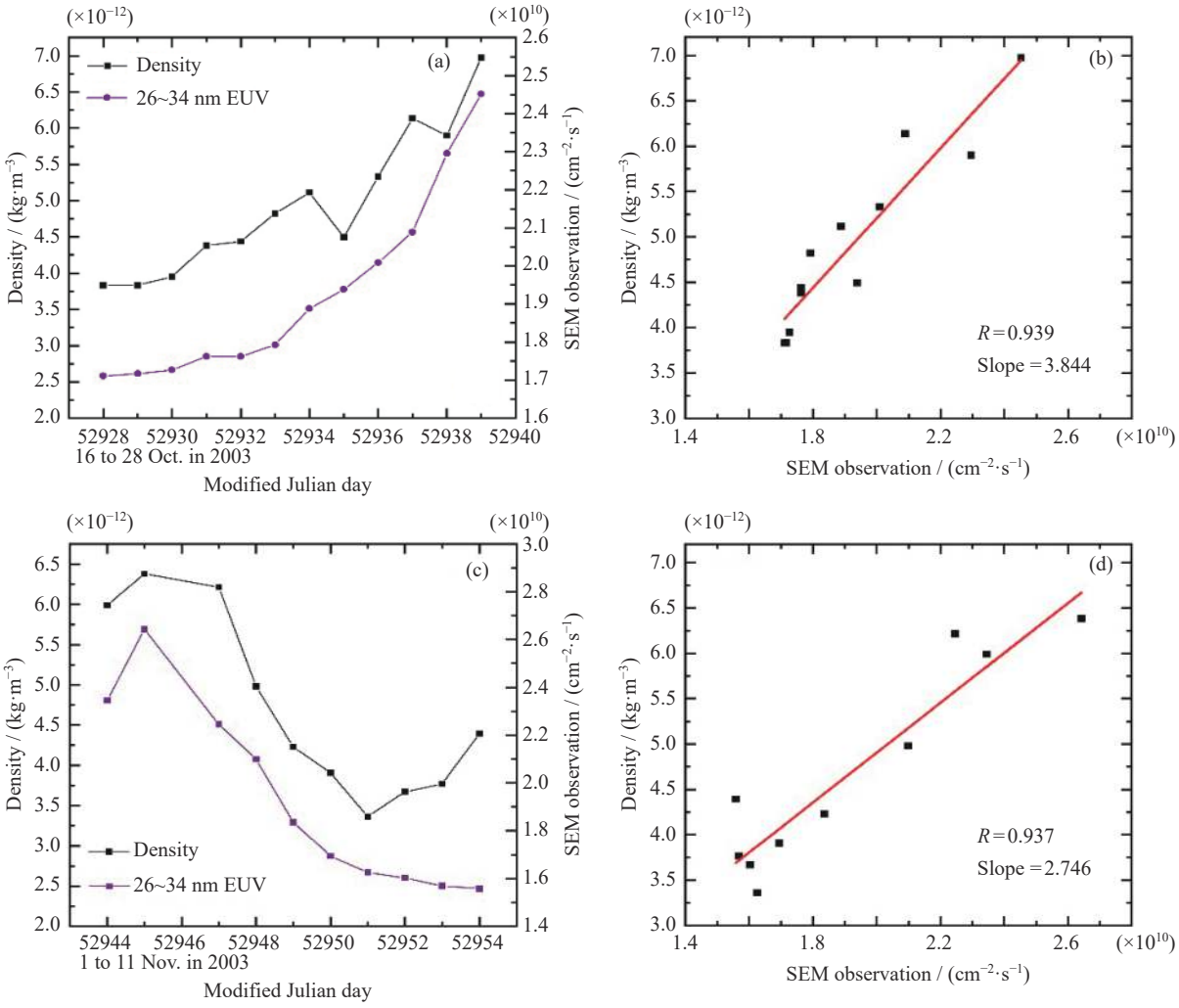

图 5　太阳爆发事件前后 CHAMP 记录大气密度与极紫外测量值的相关性分析（图 4 中的爆发事件）

Fig. 5　Correlation analysis of densities observed by CHAMP and EUV measurement during the period of pre-burst and recovery (the same event with Fig.4)

图 8 更直观地给出 CHAMP, SWARM-C 和 GRACE-A 数据在每个地方时区间统计得到的斜率，可见三颗卫星的结果曲线形态基本一致，最大斜率都出现在 15:00 LT，即为 14:00－16:00 LT 区间，最小斜率在 01:00 LT，即为 00:00－02:00 LT 区间。对比发现，随着高度的增大，斜率值减小；CHAMP 资料统计得到的斜率变化范围是 2.841～5.848（幅度 3.0），GRACE-A 变化范围是 0.439～1.279（幅度 0.84），后者的变化幅度仅为前者的 28%，考虑到两颗卫星的高度相差 100 km，说明随着高度增大，昼夜绝对差异在缩小。

2.3　极紫外辐射对大气密度影响的空间差异（地方时、地理纬度）

前文的研究是将日照区或阴影区南北纬 70°之间的平均密度作为统计量。本节对地理纬度区间进一步细分，采用 10°的纬度间隔，将南北纬 70°之间范围分为 14 个子区间，与经度方向的 12 个地方时区间结合在一起，观察极紫外辐射对大气加热效应在经纬度二维空间上的差异。

2.3.1　CHAMP 卫星的结果

图 9 给出了不同纬度区间的斜率和相关系数，按照白天半球 10:00－16:00 LT 和夜间半球 22:00－04:00 LT 两种情况分析。图 9（a）～（c）为太阳赤纬大于 5°的资料统计结果，此时北半球为夏季半球，南半球为冬季半球。图 9（d）～（f）是太阳赤纬小于 –5°的统计（与第一行正好相反，北半球为冬季半球，南半球为夏季半球）。整体来看，上下两行对应的曲

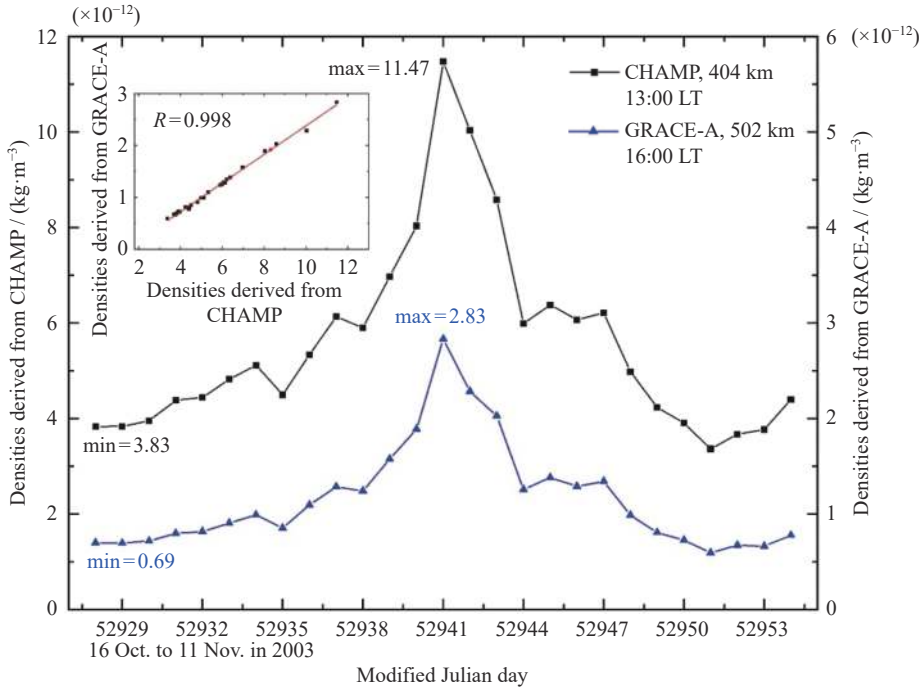

图 6 同一次太阳爆发事件中 CHAMP 与 GRACE-A 测量大气密度的涨落对比（分处在不同高度和地方时）

Fig. 6 Comparison of densities observed by CHAMP and GRACE-A during the same solar burst event and their correlation analysis (at different altitude and local time)

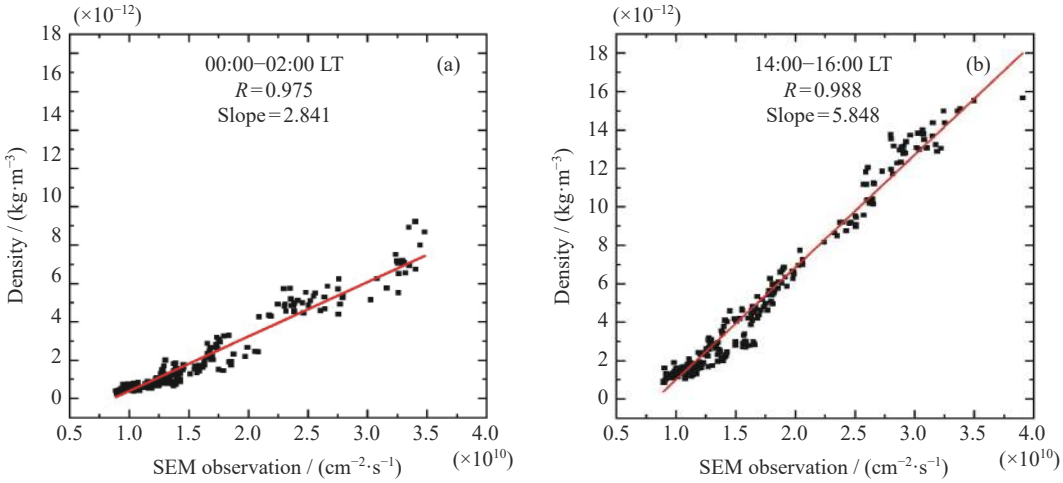

图 7 CHAMP 在两个不同地方时区间记录的大气密度与极紫外辐射的相关性分析

Fig. 7 Long-term correlation analysis between densities observed by CHAMP and EUV measurement at two bins of local time

线呈镜像翻转的特征，来源于夏冬季节的差异。详细对比可以发现，夏季半球的斜率大于冬季半球；在白天中纬度地区斜率高于赤道和高纬度地区，赤道附近的中纬度呈现典型的双峰结构与之前 Liu 等[18]报道赤道区域密度异常（Equatorial Mass Anomaly, EMA）特征一致；在夜间，最大斜率出现在夏季半球的高纬度地区；从相关系数看，全部纬度区域的系数都超过 0.95，整体呈现单调线性变化特征，最大值出现在夏季半球高纬度区域，最小值在冬季半球高纬度区域。

表 2 不同地方时的相关系数和斜率 (CHAMP)

Table 2 Correlation coefficients and slopes at different LT(CHAMP)

LT	R *via* $F_{10.7}$	R *via* SEM	Slope *via* SEM
01:00	0.935	0.975	2.841
03:00	0.966	0.981	3.068
05:00	0.963	0.962	2.908
07:00	0.921	0.966	3.711
09:00	0.965	0.960	4.578
11:00	0.955	0.961	5.133
13:00	0.944	0.982	5.510
15:00	0.972	0.988	5.848
17:00	0.966	0.968	4.861
19:00	0.918	0.969	4.296
21:00	0.959	0.958	3.821
23:00	0.946	0.952	3.398

表 3 用不同太阳辐射参数计算的相关系数平均值和白天夜晚区域的斜率平均值

Table 3 Average results of correlation coefficient *via* different solar parameters of solar radiation, and the average slopes in the dayside and nightside

Satellite	Average R		Slope *via* SEM	
	$F_{10.7}$	SEM	dayside	nightside
CHAMP	0.951	0.968	4.940	3.389
SWARM-C	0.926	0.938	1.278	0.744
GRACE-A	0.915	0.923	1.030	0.603

2.3.2 SWARM-C 和 GRACE-A 的结果

两颗星的高度相差 20 km, 把 SWARM-C 和 GRACE-A 的结果同时在图 10 中给出, 可以看出形态完全一致, 在高度上 SWARM-C 略低 20 km, 斜率值也略大。而且, 随着太阳纬度在南北半球的变化, 图 10(a)(b), 相比于图 10(c)(d), 斜率均表现出镜像翻转的特征, 与图 9 中 CHAMP 结果完全一致。值得说明的是, 两颗星虽然高度接近, 但资料的时间跨度绝大部分是不重叠的, GRACE-A 是 2002−2014 年, SWARM-C 是 2014−2021 年。两者曲线的一致性表明, 纬度特征与资料时间无关, 它是极紫外辐射对大气影响的客观规律。

2.4 现有模型描述空间差异特征的不足

以 CHAMP 资料归算的统一高度 380 km 为例, 用两个主流大气模型(DTM2000[19] 和 NRLMSISE00[20])

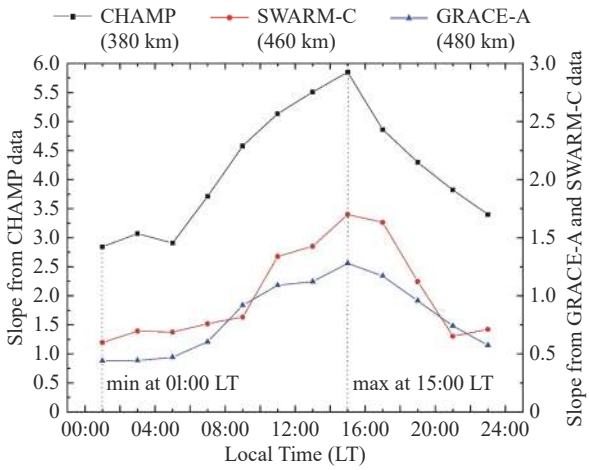

图 8 大气密度与极紫外辐射的线性相关斜率变化与所在地方时的关系

Fig. 8 Variation of slope derived by correlation analysis between densities and EUV measurement at different local time

模拟计算不同地方时和纬度区域, $F_{10.7}$ 从 50 增大至 240 的大气密度, 进而得出密度与辐射指数 $F_{10.7}$ 的线性函数斜率, 画图给出斜率在地方时和纬度两个维度上的差异(见图 11)。模拟中地磁指数取为 ap=0, 时间选择为 2008 年 6 月 22 日(夏至, 太阳直射北半球)。将图 11 与 CHAMP 实测的对应结果图 9(a)和(b)对比, 可见两个模型在白天与实测结果总体一致, 北半球的中纬度出现峰值, 高纬度是最小值, DTM2000 更接近实测结果, 包括中纬度和赤道区域。然而在夜间, 两个模型完全没有反映出实测曲线特征, 未刻画出北半球(夏季)高纬度的峰值、南半球(冬季)中纬度地区的谷值。因此有必要进行建模改正, 本文尝试提出一种改进思路。

2.5 建模改进思路

在建模之前, 需要对 14 个纬度区域、12 个地方时区域统计得到的斜率进行归一化处理(共计 168 个区间样本)。记每个区域内大气密度与极紫外辐射的斜率为$S_{i,j}$, 这里 i,j 分别为地方时和纬度的序号, i 为 1～12, j为 1～14。记$y_{i,j}$为对$S_{i,j}$归一化后的结果, 方法如下:

$$y_{i,j}=\frac{S_{i,j}-\bar{S}}{\bar{S}},$$

$$\bar{S}=\frac{\sum_{i=1}^{14}\sum_{j=1}^{12}S_{i,j}}{168}. \quad (1)$$

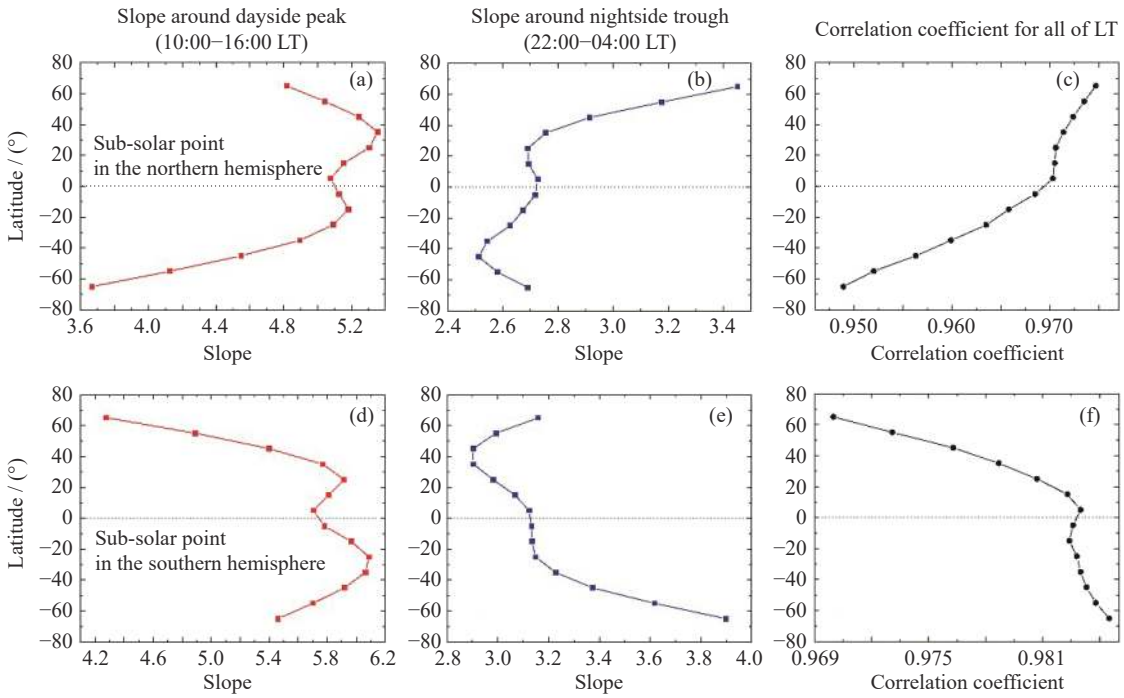

图 9 大气密度对极紫外辐射的线性斜率随地方时和地理纬度的变化（CHAMP）

Fig. 9 Slope of linear correlation between densities and EUV measurements at different Local Time (LT) and geomagnetic latitude (CHAMP)

关于太阳辐射对大气影响在空间经纬度上的差异，主流大气模型一般以地方时的三角函数与季节、纬度项相互耦合方式描述[19,20]，但上节已表明，刻画效果存在明显不足。这里尝试用如下两种方法对空间差异特征重新建模。

方法 1 参考主流模型的思路，建立多元线性回归函数，这个函数可以用来拟合逼近极紫外辐射对不同经纬度区域大气的影响差异。首先，完备写出与地方时相关变量t的 1～3 倍角正余弦、地理纬度φ的 5 阶勒让德多项式($n=1\sim5;\ m=0,1$)，及其之间耦合项，一共多达 46 项。再用三颗卫星的资料，选择F检验置信度水平$\alpha=0.05$，用逐步线性回归分析的方法，遴选出 13 项主要参数，即

$$\begin{aligned} y =& a_1\cos2\omega t + a_2\sin2\omega t + a_3\cos3\omega t + \\ & a_4\sin3\omega t + \cos\omega t\cdot\left[a_5P_{1,0} + a_6P_{4,0} + \right. \\ & \left. a_7P_{1,1} + a_8P_{3,1}\right] + a_9\sin\omega tP_{1,1} + a_{10}\cos2\omega tP_{1,1} + \\ & a_{11}\sin2\omega tP_{1,0} + a_{12}\sin\varphi + a_{13}\sin3\varphi. \end{aligned} \tag{2}$$

其中，t为地方恒星时与周日峰 15:00 LT 的夹角，$\omega=2\pi/24$，φ为地理纬度，$P_{n,m}$为综合勒让德函数，以$\sin\varphi$为参数。

方法 2 参考地球引力场位函数形式，建立如下球谐函数

$$\begin{aligned} y =& \sum_{n=1}^{N_{\max}}\sum_{m=0}^{n}P_{n,m}(\mu)\left(A_{n,m}\cos m\lambda + \right. \\ & \left. B_{n,m}\sin m\lambda\right). \end{aligned} \tag{3}$$

其中，$\mu=\sin\varphi$，$\lambda=\omega t$，$t,\varphi,\omega,P_{n,m}$等变量的含义与方法 1 中一致。$A_{n,m}$和$B_{n,m}$为球谐系数，求和号的指标n,m为球谐函数的阶次。一般阶次越高拟合效果越好。但具体问题中，样本空间分辨率的限制会使得过高阶次的求解收敛失败。本问题将地理纬度和地方时划分为$14\times12=168$个样本点，能成功收敛的最高阶次为$N_{\max}=6$。

对两种方法的拟合效果进行对比，结果表明球谐函数方法有更高的精度和稳定性。原因是球谐函数有很好的正交性。表 4 中 R 为复相关系数，STD 为拟合后的均方差。可见球谐函数方法的复相关系数 R 全部超过 0.99，均方差比多元回归分析法降低了 40%～56%，可见拟合效果更好。以 CHAMP 资料为例，给出线性回归函数(方法 1)和 6 阶球谐函数(方法 2)的拟合曲线对比(见图 12)。可见球谐函数方法的拟合曲线，在整体和细节上都与实测样本曲线吻合得更好。

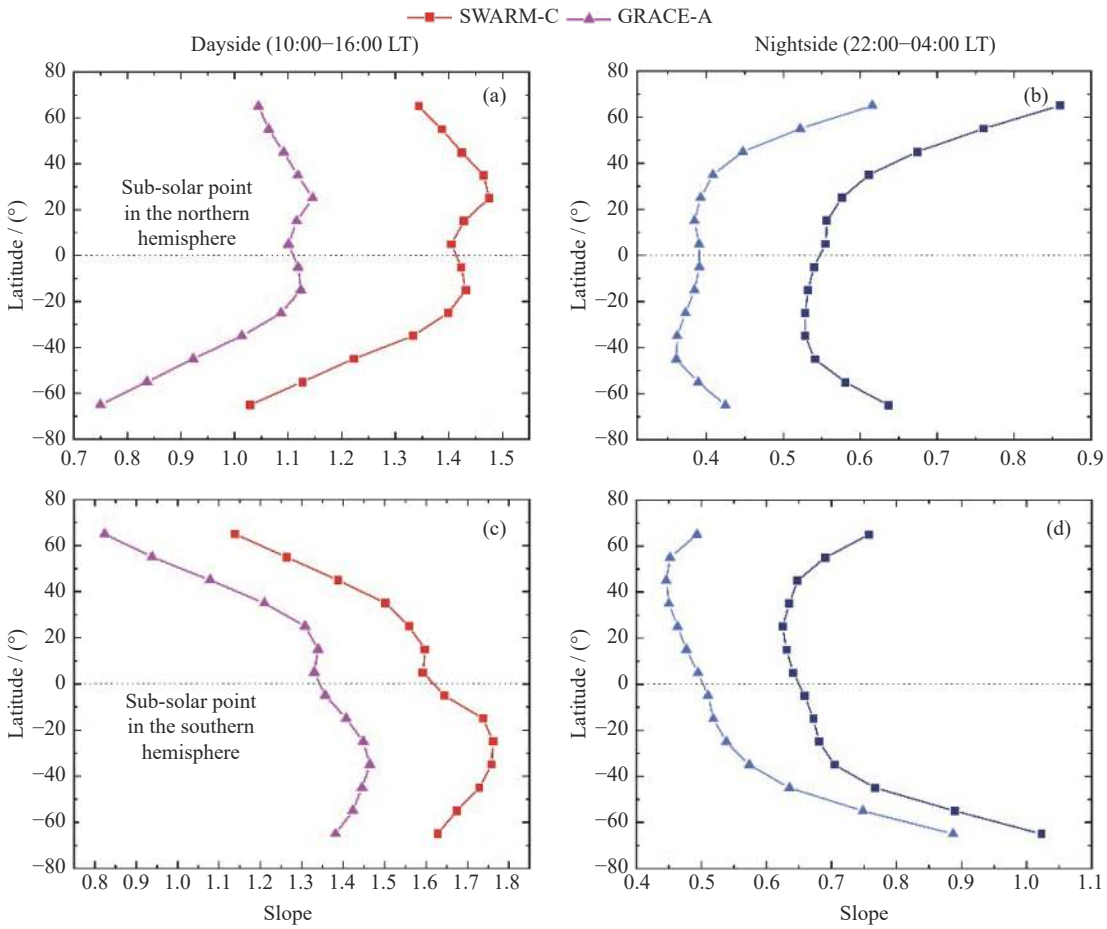

图 10　大气密度对极紫外辐射的线性斜率随地方时和地理纬度的变化（GRACE-A，SWARM-C）

Fig. 10　Slope of linear correlation between densities and EUV measurements at different Local Time (LT) and geomagnetic latitude (GRACE-A, SWARM-C)

3　关于统计现象的机制讨论

统计结果显示，夏季半球的平均斜率值高于冬季半球。这是可以理解的，因为日下点落在夏季半球，太阳入射高度角更大，吸收的太阳辐射能量更多，从而导致夏季半球的加热效应更显著。

统计得到夜间斜率是白天斜率的 60%～70%，这是因为夜间阴影区并不直接受到太阳辐射，而是由日照区受到的辐射能量一部分向夜间传输，是一个由温度梯度引起的能量再分配过程[17]。

同时考虑季节和昼夜两个因素，真实物理图景变得复杂，主流模型在夜间阴影区已经不能准确刻画两种观测特征（夏季半球高纬度斜率最大，冬季半球中纬度斜率最小）。通过文献调研[21,22]，可以注意到热层在两个半球之间存在夏季到冬季的经向环流，以及沿子午线方向从夏季到冬季的风场，并且带动较轻的成分（例如 He 和 O）发生垂直对流，在夏季半球抬升，穿越赤道传播到冬季半球后下降，引起冬季密度异常[23,24]。

分析本文对加热效应（斜率）的统计结果，并结合夏季到冬季的经向环流机制推论——从夜间高纬度斜率最大，可见太阳辐射能量首先从日间高纬度向夜间的高纬度地区传播，然后在夜间半球沿着子午线向中低纬度和赤道传播。在夏季半球，经向环流与能量传输方向是一致的，所以能量较容易地传播到至赤道地区；而在冬季半球，经向环流与能量传输方向是相反的，能量传输被抑制阻碍，只有较少一部分能量被传输至中低纬度，从而引起冬季半球中纬度的斜率出现谷值。值得说明的是，在日照区也存在夏季到冬季的经向环流，但此时两个半球都直接受到太阳辐射，主导着大气温度与密度，经向环流引起的能量传输作用不显著；而在夜间阴影区，没有了太阳直接辐射，环

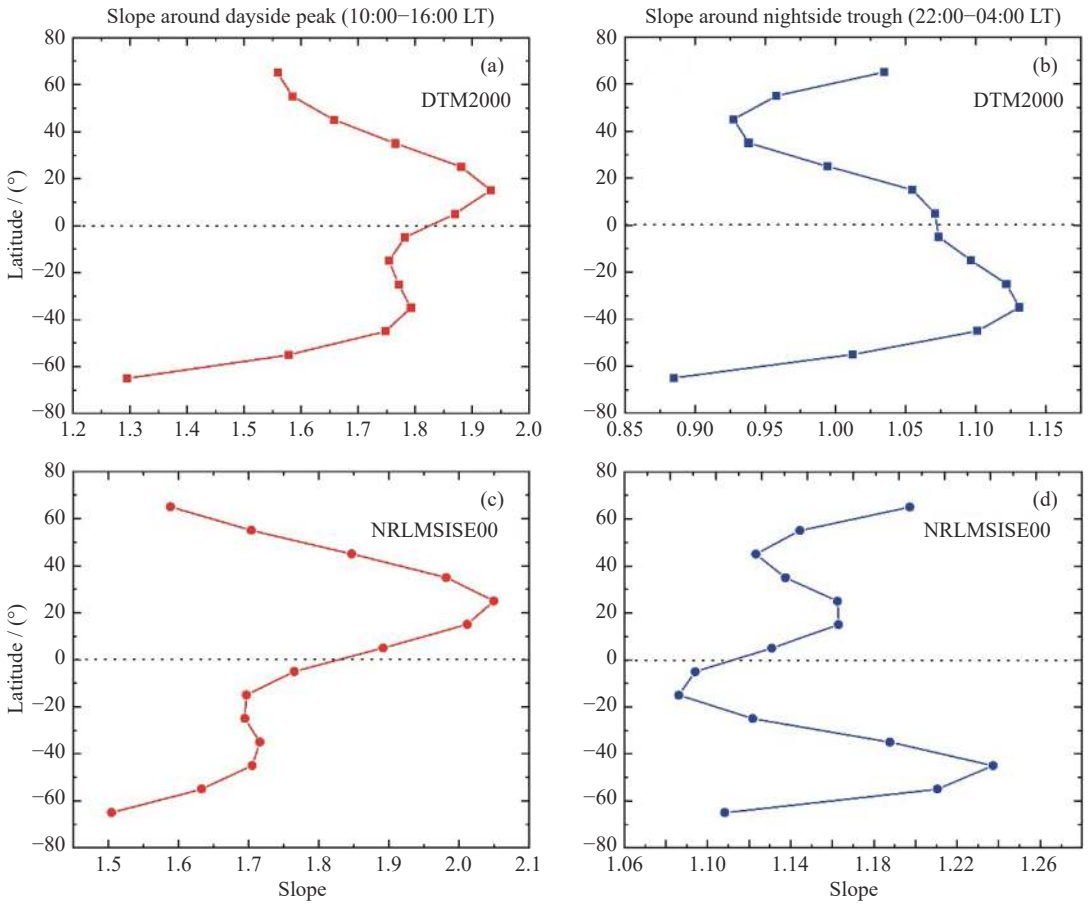

图 11 大气密度对极紫外辐射的线性斜率随地方时和地理纬度的变化（380 km 高度大气模型模拟结果）

Fig. 11 Slope of linear correlation between densities and EUV measurements at different LT and geomagnetic latitude (simulation results by DTM2000 and NRLMSISE00 at 380 km altitude)

表 4 多元回归函数方法与 6 阶球谐函数方法的拟合效果对比

Table 4 Fitting results of multiple regression method and six-order spherical harmonics method

		Multiple Regression method		Spherical Harmonics method		$(STD_1-STD_2)/STD_1/(\%)$
		R_1	STD_1	R_2	STD_2	
CHAMP	N	0.978	0.260	0.996	0.114	56
	S	0.982	0.205	0.995	0.107	48
SWARM-C	N	0.991	0.053	0.997	0.032	40
	S	0.971	0.103	0.992	0.054	48
GRACE-A	N	0.966	0.077	0.991	0.040	48
	S	0.988	0.055	0.997	0.028	49

注 N和S分别为太阳直射北半球和南半球情形。

流引起的能量传输在冬季和夏季差异显得非常突出。以上关于物理机制的讨论限于 400～500 km 高度范围，今后需要分析更多高度的卫星实测资料来进一步验证。

4 结论

针对三个太阳自转周和一次太阳爆发事件的个例分析表明，太阳极紫外辐射主导着全球大气密度的

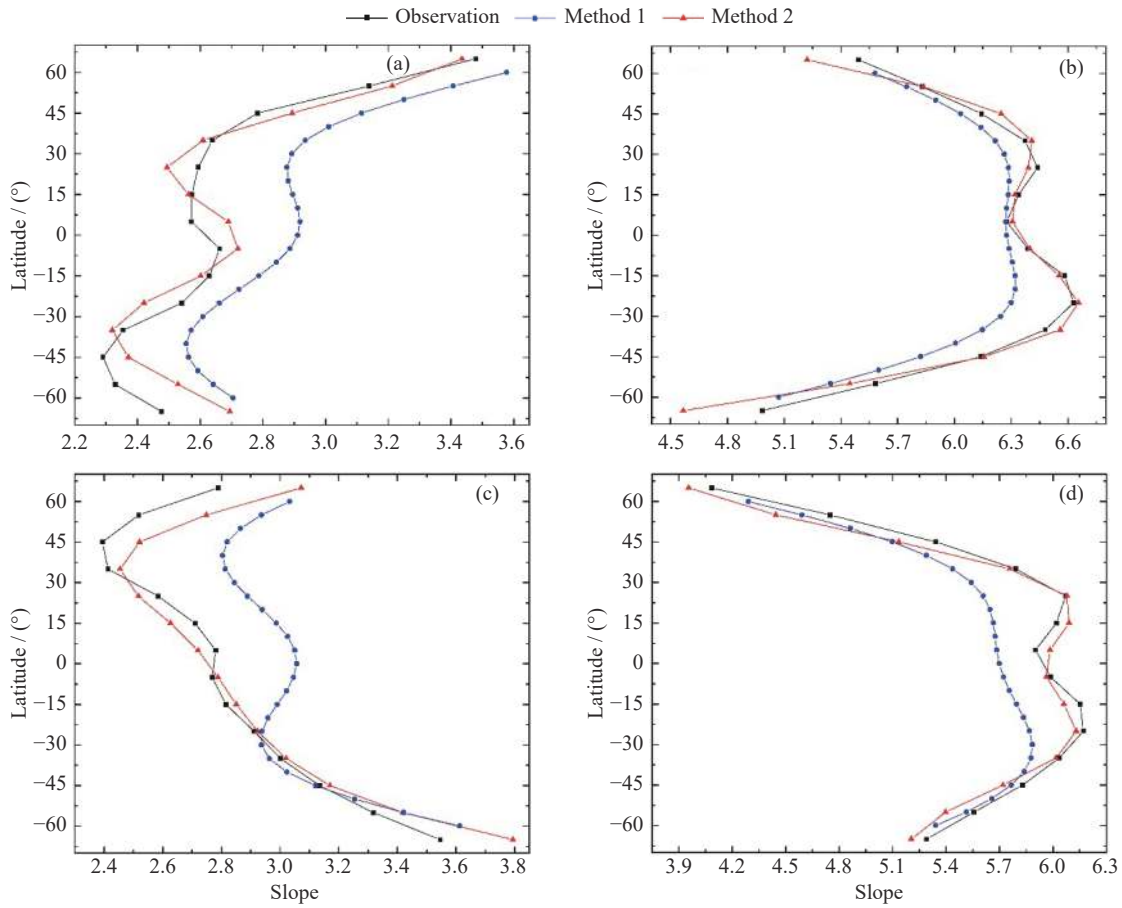

图 12　两种方法的拟合曲线与实测曲线对比。（a）（b）为太阳直射北半球时夜间 01:00 LT 和白天 15:00 LT 情形，（c）（d）为太阳直射南半球时夜间 01:00 LT 和白天 15:00 LT 情形

Fig. 12　Comparison of fitting curves by two methods with the observed curves by CHAMP, graph (a) and (b) are at 01:00 LT and 15:00 LT when sub-solar point in the north hemisphere, and graph (c) and (d) are 01:00 LT and 15:00 LT when sub-solar point in the south hemisphere

整体变化趋势。利用长达 20 年的资料做线性相关分析，证实了极紫外辐射与大气密度之间，比 10.7 cm 射电辐射具有更强的相关性。

线性相关分析得到的斜率值是极紫外辐射对大气密度加热效应强弱程度的定量表征。统计表明，地方恒星时白天 15:00 LT 前后大气密度对极紫外测量值的斜率最大，夜间 01:00 LT 前后为斜率最小值，证实了极紫外辐射在不同地方时的影响程度存在显著差异，从而驱动大气密度的周日变化。对比三颗卫星的资料表明，在 350～500 km 区域内随着高度增大，极紫外辐射对大气密度的影响逐步减弱。

利用三颗卫星高时空分辨率和全球覆盖特性，揭示了极紫外辐射对大气的影响存在地方时（经度）和纬度上的空间差异。结果表明，夏季半球的斜率大于冬季半球；在白天，中纬度地区斜率高于赤道和高纬度地区；在夜间，最大斜率出现在夏季半球的高纬度地区，谷值出现在冬季半球的中纬度地区。 通过与 DTM2000 和 NRLMSISE00 模型计算结果对比，发现模型在预测太阳辐射对夜间大气的影响方面存在不足。为尝试解决这个问题，提出基于 6 阶球谐函数的拟合逼近方法，优于主流模型中周日效应采用的表达式，拟合后剩余均方差降低了 40%～56%，这对大气周日效应的建模或修正提供新的有益借鉴。

致谢 SEM 测量数据由 NASA 和 ESA 联合实施的 SOHO 卫星计划提供，CHAMP 和 GRACE 卫星资料大气密度数据(https://lasp.colorado.edu/space-weather-portal)由美国科罗拉多大学提供，SWARM 卫星数据(http://www.esa.int/Swarm)由 ESA 提供。封莉、赵金松和陈玲给予了

数据分享及建议，刘尧和汪亚在 SWARM-C 数据读取中提供了帮助。

参考文献

[1] HARRISON R A, SAWYER E C, CARTER M K, *et al*. The coronal diagnostic spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 233-290

[2] HOVESTADT D, HILCHENBACH M, BÜRGI A, *et al*. CELIAS – Charge, element and isotope analysis system for SOHO[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 441-481

[3] WOODS T N, EPARVIER F G, BAILEY S M, *et al*. Solar EUV Experiment (SEE): mission overview and first results[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2005, **110**(A1): A01312

[4] WOODS T N, EPARVIER F G, HOCK R, *et al*. Extreme *Ultraviolet Variability Experiment* (EVE) on the *Solar Dynamics Observatory* (SDO): overview of science objectives, instrument design, data products, and model developments[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 115-143

[5] TANG Cheng, LI Jiawei, ZHANG Xiaoxin, *et al*. TIEGCM numerical study on the thermospheric density response to solar $F_{10.7}$ radio flux variations during the 23 rd solar cycle[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 704-714 (唐成, 李嘉巍, 张效信, 等. 第23太阳活动周热层大气密度对太阳辐射指数$F_{10.7}$响应的模拟研究[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(5): 704-714)

[6] TOBISKA W K, BOUWER S D, BOWMAN B R. The development of new solar indices for use in thermospheric density modeling[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(5): 803-819

[7] WANG Hongbo, ZHAO Changyin. Effects of various solar indices on accuracy of Earth's thermospheric neutral density models[J]. *Science in China Series G*: *Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, **39**(7): 1120-1128 (汪宏波, 赵长印. 不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响分析[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, **39**(7): 1120-1128)

[8] BRUINSMA S, TAMAGNAN D, BIANCALE R. Atmospheric densities derived from CHAMP/STAR accelerometer observations[J]. *Planetary and Space Science*, 2004, **52**(4): 297-312

[9] SUTTON E K, NEREM R S, FORBES J M. Density and winds in the thermosphere deduced from accelerometer data[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, **44**(6): 1210-1219

[10] REIGBER C, LÜHR H, SCHWINTZER P. CHAMP mission status[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **30**(2): 129-134

[11] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, *et al*. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(9): L09607

[12] WANG Hongbo, XIONG Yongqing, ZHAO Changyin. The new calibration method of accelerometer in GRACE satellites based on precise solar radiation model[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, **57**(5): 544-559 (汪宏波, 熊永清, 赵长印. 基于精密光压模型的GRACE卫星加速仪校标新方法[J]. 天文学报, 2016, **57**(5): 544-559)

[13] FRIIS-CHRISTENSEN E, LÜHR H, KNUDSEN D, *et al*. *Swarm*-an earth observation mission investigating geospace[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(1): 210-216

[14] GUO J P, WAN W X, FORBES J M, *et al*. Effects of solar variability on thermosphere density from CHAMP accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2007, **112**(A10): A10308

[15] JACCHIA L G. Thermospheric Temperature, Density, and Composition: New Models[R]. Cambridge: Smithsonian Institution Astrophysical Observatory, 1977

[16] HEDIN A E. Correlations between thermospheric density and temperature, solar EUV Flux, and 10.7-cm Flux variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(A11): 9828-9834

[17] HEDIN A E, MAYR H G. Solar EUV induced variations in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(D1): 869-875

[18] LIU H, LÜHR H. Strong disturbance of the upper thermospheric density due to magnetic storms: CHAMP observations[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2005, **110**(A9): A09S29

[19] BRUINSMA S, THUILLIER G, BARLIER F. The DTM-2000 empirical thermosphere model with new data assimilation and constraints at lower boundary: accuracy and properties[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, **65**(9): 1053-1070

[20] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al*. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2002, **107**(A12): 1468

[21] REBER C A, HAYS P B. Thermospheric wind effects on the distribution of helium and argon in the Earth's upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(16): 2977-2991

[22] LIU X J, WANG W B, THAYER J P, *et al*. The winter helium bulge revisited[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(19): 6603-6609

[23] KEATING G, PRIOR E. The winter helium bulge[J]. *Space Research*, 1968, **8**: 982

[24] SUTTON E K. Interhemispheric transport of light neutral species in the thermosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(24): 12325-12332