

两分两至点热层大气密度变化

李永平^{1,2,3}, 孙越强^{1,2,3}, 王馨悦^{1,2,3}, 付振宇^{1,2,3}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

3. 中国科学院国家空间科学中心空间环境探测研究室, 北京 100190

摘要 热层大气受太阳辐射的影响, 其变化与光照时间长短密切相关, 在春分、秋分、夏至、冬至期间呈现出不同的特点。通过在中国低轨道航天器上装载大气密度探测器, 获得在轨原位探测数据, 分析大气密度在两分两至点时的变化关系。结果表明, 春分和秋分(两分点)期间全球热层大气密度随纬度对称性变化, 但夏至和冬至(两至点)期间则呈现出全球热层大气密度的南北半球不对称性变化; 两至点期间南北半球分别处于夏半球和冬半球, 在南北高纬地区(纬度 80°附近)670 km 上空热层大气密度存在显著差异, 探测值表示出 3~3.6 倍的差异, 而在 560 km 高度上探测到两者差异可高达 13 倍左右, 不对称程度与高度和纬度有关; 探测值与模式值比较表明, 模式值对冬夏半球上空热层大气密度差异变化显著响应不足。

关键词 两至点(夏至、冬至); 热层大气密度; 太阳远紫外辐射

热层大气密度存在显著的涨落和扰动现象, 原因之一是地磁活动, 它会导致注入大气的能量粒子通量和贯穿高度的变化, 促使大气加热和热离解。这种来自空间暴的作用^[1]形成了在磁扰期间特有的热层大气暴事件, 秦国泰^[2]利用 1997—2007 年由 GOES8、GOES11 和 GOES12 星载高能粒子探测器在地球同步轨道高度上所探测到的高能质子和高能电子通量探测数据, 以及高度 560 km 星载大气密度探测器所得到的热层大气密度探测数据, 统计分析了强地磁扰动、高能粒子通量跃变和热层大气密度涨落之间的相关关系。李永平等^[3]利用中国星载大气密度探测器和 CHAMP(challenging minisatellite payload)卫星加速度计在轨获得的连续

探测数据, 针对近年来多次强磁暴事件和多次中等强度扰动事件, 分析和比对不同强度磁扰事件期间、不同高度全球大气密度原位探测值与模式值(NRLM-SISE00)之间的差别。Liu 等^[4]利用 CHAMP 卫星加速度计获得的大气密度数据, 分析了 400 km 轨道高度上大气密度跟随地磁指数 K_p 值的变化, 表明大气密度的增加和地磁事件相关。Chen 等^[5-11]利用 STAR 加速度计或者质谱计测量获取的大气密度数据描述了在大磁暴(K_p 值为 5~9)期间对不同纬度大气密度的影响级别。

热层大气加热另一个重要原因是太阳辐射, 当太阳活动程度发生周期性和事件性变化时, 热层大气密度也随之发生响应性变化。不仅如此, 即使太阳活动

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2018-12-16

基金项目: 中国载人航天工程基金项目(Y39001A420)

作者简介: 李永平, 研究员, 研究方向为中高层大气环境探测技术、质谱分析技术, 电子信箱: lyp@nssc.ac.cn

引用格式: 李永平, 孙越强, 王馨悦, 等. 两分两至点热层大气密度变化[J]. 科技导报, 2019, 37(6): 104-113; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.06.014

处于十分宁静状态,也会因地球自转和自转轴以一定倾角绕太阳公转的缘故,产生日照时间长短和太阳光入射角度的变化,从而引起热层大气周期性显著涨落变化。Lei等^[12]采用卫星CHAMP和GRACE(gravity recovery and climate experiment)的观测数据,利用经验正交函数分析方法分析了不同太阳活动指数 $F_{10.7}$ 强度下大气密度的季节变化特性。Qian等^[13]利用TIE-GCM(thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model)模式和TIMED/GUVI(thermosphere-ionosphere-mesosphere energetics and dynamics/global ultraviolet imager)观测数据,分析了热层大气密度以及大气成分 O/N_2 比随季节的变化。Liu等^[14-16]等利用CHAMP、GOCE(gravity field and steady-state ocean circulation explorer)、GRACE卫星的大气密度数据,分析了太阳活动期间密度变化,大气密度在不同纬度随季节的变化特性,同时利用TIMED/GUVI观测数据分析了 O/N_2 的季节特性。

本研究将讨论在非地磁扰动期间和太阳宁静期间,春分、夏至、秋分及冬至期间热层大气密度南北半球的变化特性,即在两分(春分及秋分)两至(夏至及冬至)点期间,因南北半球(尤其是高纬地区)上空大气日照时间长短和日照角度的差异,引起南北半球高纬地区热层大气密度相对变化,分析其短期和较长期变化特性。

1 探测数据、空间环境数据及模式数据

1.1 热层大气密度探测数据

热层大气密度探测数据取自中国星载大气密度探测器长期在轨原位探测结果,探测器搭载在准圆形轨道运行的中国卫星上,卫星运行轨道高度分别为670、560 km,倾角约 92° 。探测器采用直接探测传感器内气体压力和温度的方法,并由气体分子动力学理论所建立的基本方程,结合卫星运行的姿态和速度来获得自由大气密度^[17](图1)。

探测器在地面上经轨道大气测试定标系统,用标准气样进行了标定和定期复校。在轨探测时,探测器传感器的标准测孔始终处于迎风面零攻角,并由精密姿态测系统和定轨系统分别获得姿态和轨道参数。表1列出了探测器的主要性能。

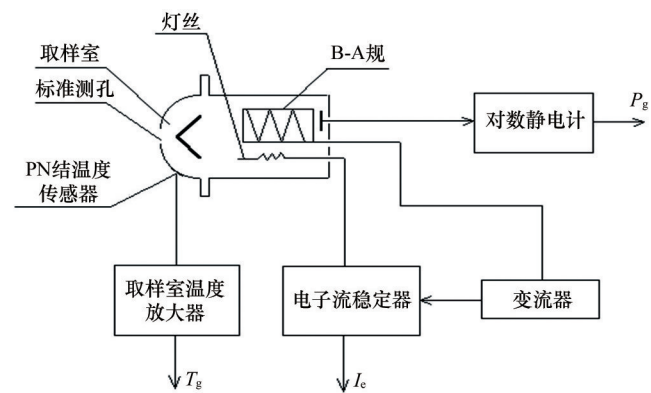


图1 大气密度探测器原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of atmospheric density detector

表1 中国星载大气密度探测器的主要性能

Table 1 Performance of Chinese in-situ atmospheric density detector

性能参数	数值
传感器内气体压力范围/Pa	$5 \times 10^{-7} \sim 10^{-3}$
传感器内气体温度范围/ $^\circ\text{C}$	$-10 \sim 60$
最小可检测压力/Pa	10^{-8}
温度分辨率/ $^\circ\text{C}$	0.1
压力校准总不确定度/%	3
探测器质量/kg	1.5
探测器功耗/W	1.5

探测器获取的原始数据与卫星平台数据经过地面数据系统处理后,最终得到3级数据产品,包括地方时、北京时、世界时、经度、纬度、高度及大气密度信息。该探测器已实现多次在轨探测,也发布了相关的探测成果^[3],分析了不同高度和不同地磁扰动期间模式值与在轨实测值的差异。

1.2 太阳活动指数($F_{10.7}$)和地磁活动指数(A_p)数据

选用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)空间环境中心发布的2008—2014年太阳辐射通量 $F_{10.7}$ 日均值和 A_p 日均值数据,太阳活动指数 $F_{10.7}$ 是表征太阳活动水平的一个重要参数,地磁活动指数 A_p 是表征地磁扰动强度的一种分级指标(全球的全日地磁扰动强度的指数)。其中2008—2009年期间的 $F_{10.7}$ 日均值数据表明了太阳活动程度处于十分宁静期。

1.3 模式数据

本研究选用NRLMSISE00^[18-20]模式数据进行比较。MSIS系列模式基于卫星质谱仪资料和非相干散射雷达

测量温度的结果建立,包括MSIS77、MSIS83、MSIS86、MSIS90(MSISE90)和MSIS00(NRLMSISE00)。

1983年,Hedin在模式中增加了高太阳活动时的观测数据以及利用3 h的地磁 A_p 指数描述大气参数在磁暴后的变化,并且将模式的高度范围扩展到90 km,形成了MSIS83模式。Hedin等在MSIS86中改善了极区宁静和扰动条件下成分变化的季节差异,增加了高纬和高太阳活动时的数据。而MSISE90将下边界下降到地球表面,主要描述从地面到热层高度的地球中性大气的温度、密度和各气体成分的数密度。NRLMSISE00模式则是美国海军实验室(Navy Research Laboratory, NRL)以MSISE90和Jacchia70为基础开发改进而来,包含卫星加速度计和卫星轨道反演得到的大气总质量密度数据、氧分子数密度数据及非相干散射雷达的温度数据。该模式描述了从地面到热层(0~1000 km)的中性大气密度和温度等大气物理性质,可以反映热层大气密度的基本变化特征。NRLMSISE00是目前国际上先进且完善的大气经验模式之一。

为求与原位探测数据点相对应的模式值,输入如表2所列的子项主要参数,计算出大气总质量密度等输出参数,即本文中所涉及模式值。该模式不仅能输出不同太阳活动水平和不同地磁扰动条件下热层大气密度数据,还可以输出主要大气成分的数据,是当前国际上广泛使用的、最有影响的热层大气模式。在以下的分析中,NRLMSISE00模式简称为MSIS00。

表2 MSIS00模式的输入和输出参数

Table 2 Input and Output Parameters of MSIS00 model

输入参数	输出参数
年、月、日(UTS)	He数密度
高度	O数密度
地理纬度	O ₂ 数密度
地理经度	N数密度
日出时间	N ₂ 数密度
81 d平均 $F_{10.7}$	Ar数密度
前1天的 $F_{10.7}$	H数密度
当日 A_p 磁场指数	原子氧数密度
3 h前 A_p 磁场指数	总质量密度
6 h前 A_p 磁场指数	外逸层温度
9 h前 A_p 磁场指数	高层温度
12~33 h前 A_p 磁场指数	
36~57 h前 A_p 磁场指数	

2 结果

2.1 两至点期间670 km热层大气密度的南北半球不对称性

当卫星以高倾角轨道绕地球运行时,每绕地球运行1圈,卫星要飞过含高纬地区在内的全球热层大气。在轨原位探测数据表明,在两至点期间,南北半球尤其是高纬地区上空热层大气密度存在显著差异。图2(a)、(b)分别例举了夏至和冬至日卫星运行轨道圈上热层大气密度变化。如图2(a)所示,夏至日探测结果表明,轨道圈上北半球热层大气密度随纬度增加而增

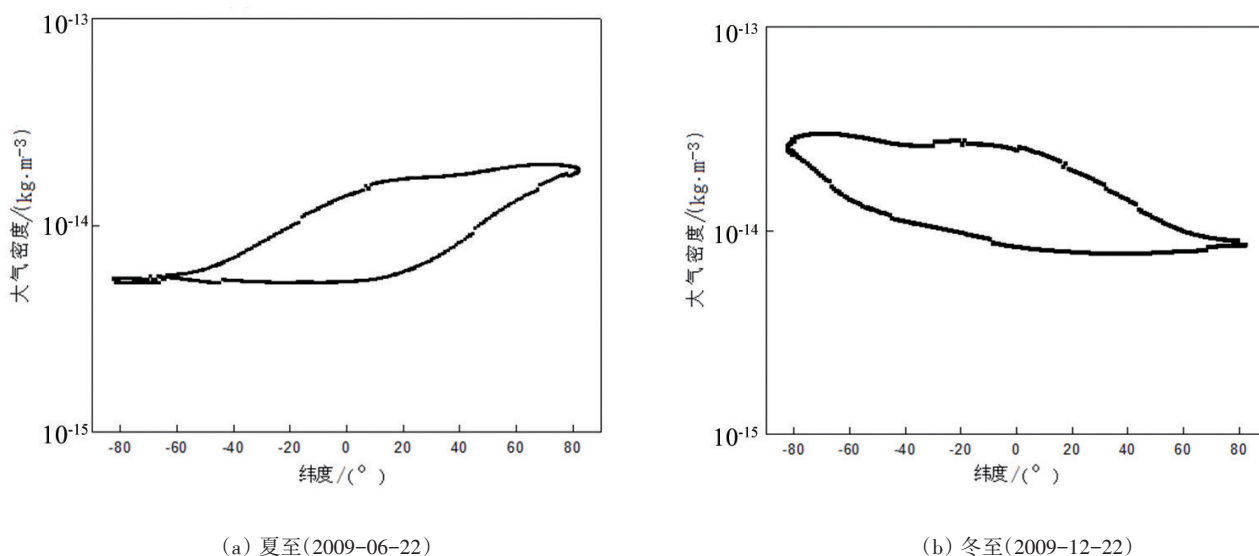


图2 两至点期间670 km高度附近南北半球大气密度的不对称性变化(探测值)

Fig. 2 Asymmetry of the thermospheric density for southern and northern hemisphere during solstice at 670 km

高;而南半球则相反,随纬度增加而降低,呈现出显著的南北半球大气密度不对称变化,N80°附近热层大气密度要比S80°处高约3.65倍。而图2(b)所示,冬至时探测数据则呈现出相反结果,北半球热层大气密度随纬度增加而降低;而南半球则随纬度增加而增高,同样表示出显著的南北半球大气密度不对称变化,但此时却是S80°附近热层大气密度要比N80°处高约3.2倍。由图2可知,这种不对称性不仅具有南北半球热层大气密度随纬度增高的双向性,而且呈现出两至点期间双向交替变化的特点。

图3(b)、(d)显示了2009年夏至和冬至日全球热层大气密度分布变化态势,而图3(a)、(c)显示了当年春分和秋分日全球热层大气密度分布变化,用来比较南北半球热层大气密度不对称性变化显著差异;表3例举了2009年两至点和两分点日相对应的 $F_{10.7}$ 和 A_p 值。由

表3可知,当日的太阳和地磁活动程度均处于十分宁静期,表明这种南北半球热层大气密度不对称性变化与太阳和地磁活动变化无明显相关性。由图3(a)、(c)可见,两分点期间,南北半球上空大气密度随纬度呈对称性变化,即在赤道和低纬地区上空热层大气密度最高,随着南、北半球纬度增高而大气密度均呈相近的下降,直至±80°高纬附近最低,而图3(b)、(d)则展现出十分明显的不对称变化,夏至日全球热层大气密度北(半

表3 2009年两分和两至点日均 $F_{10.7}$ 和 A_p 值
Table 3 The $F_{10.7}$ and A_p during equinox and solstice in 2009

时间	$F_{10.7}$	A_p
春分(3月22日)	69	4
夏至(6月22日)	68	3
秋分(9月22日)	75	4
冬至(12月22日)	82	2

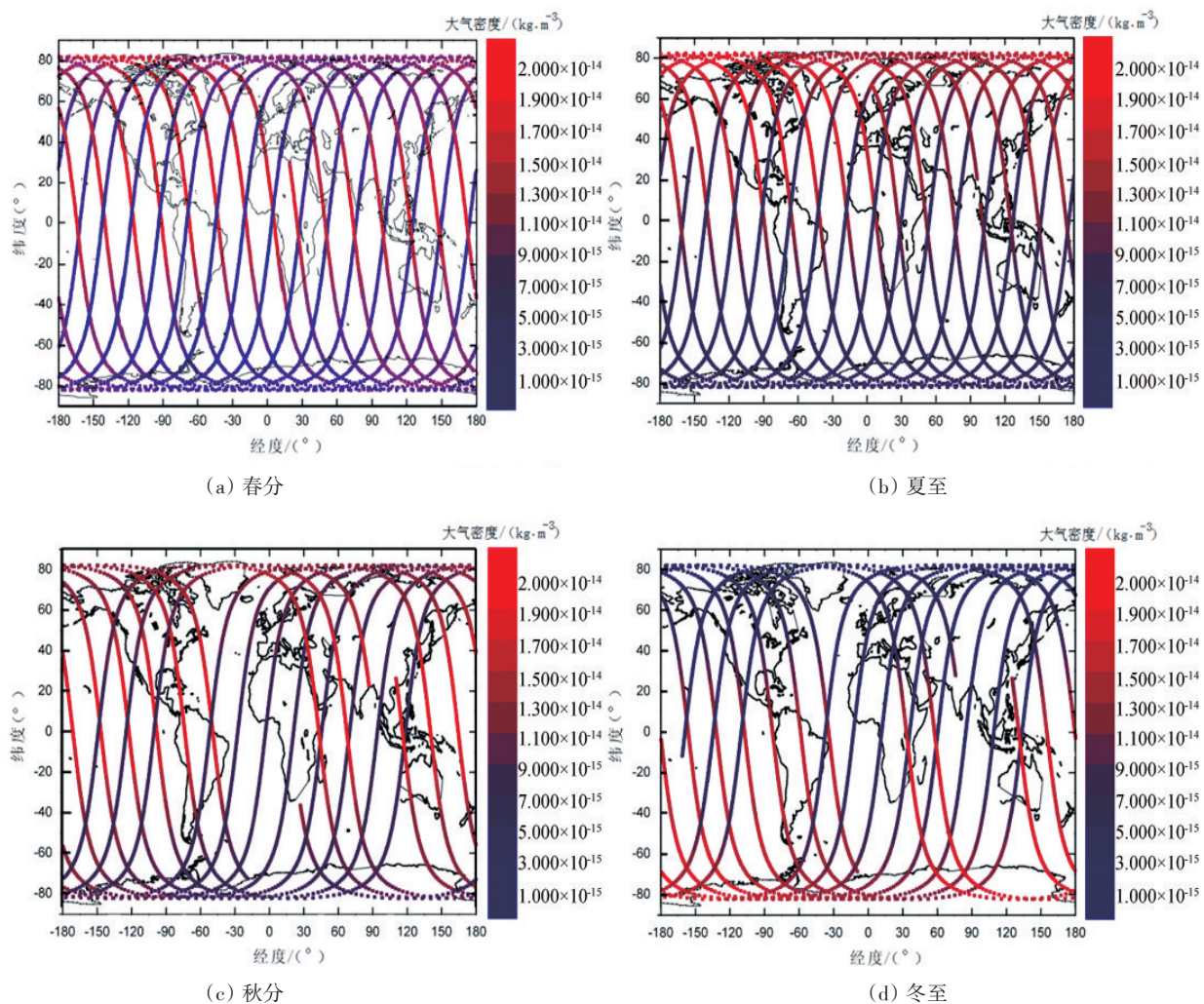


图3 2009年两分两至日全球热层大气密度分布变化

Fig. 3 Distribution of the thermospheric density during equinox and solstice in 2009

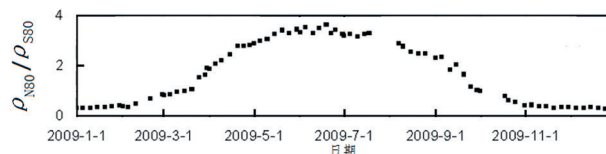
球)高南(半球)低,随南北纬度增高,北半球渐增,至N80°附近接近最高值,南半球则呈渐降趋势,至S80°附近达到最低值;冬至日则相反,全球热层大气密度则呈现南高北低,同样随纬度增高,南半球大气密度渐增,至S80°附近达到最高,北半球则相反呈渐降趋势,至N80°附近降至最低值。由图3可知,这种不对称性不仅呈现全球变化态势,而且具有季节性。

究其原因,可能主要是两至点期间南北半球(尤其是中、高纬度地区)日光照时间和光照角度的显著差异所致,以北京地区为例(N42°附近),夏至日光照时间长达14~15 h,而冬至日光照时间则缩短至不足10 h。日光照时间长短和光照角度变化直接影响到大气的加热程度,引起大气密度的不同涨落。

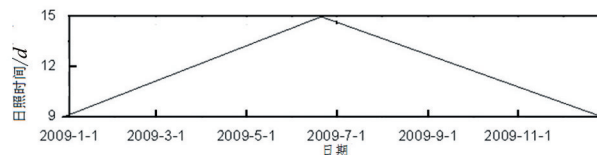
2.2 热层大气密度南北半球不对称性与日光照时间的对应关系

图4(a)、(b)、(c)分别表示在2009年期间高度670 km附近N80°与S80°上空热层大气密度比值变化、日光照时间和 $F_{10.7}$ 日均值的变化。由图4(a)、(b)可知,在两分点期间, ρ_{N80}/ρ_{S80} 比值均在1.0附近,表明南北半球热层大气密度随纬度呈对称变化,此期间日光照时间也相近;夏至期间,北半球处于夏半球季节,南半球则相反为冬半球季节,南北半球中、高纬度地区日光照时间相差可达5 h左右,相对应 ρ_{N80}/ρ_{S80} 比值高至3.65,呈现出热层大气密度北高南低的显著不对称性;冬至期间,则北半球处于冬半球季节,南半球转变成夏半球,日光照时间也同样呈南北半球交替变换,此期间相对应 ρ_{N80}/ρ_{S80} 比值低至0.32左右,出现热层大气密度南高北低的显著不对称性。图4(c)表示2009年期间 $F_{10.7}$ 日均值的变化,由图而知,其变化范围仅在68~87之间,表明期间太阳活动程度起伏不大,处于较为宁静状态,与南、北半球不对称性无明显直接相关关系。探测结果表明,在剔除太阳活动与地磁扰动影响后,南北半球80°上空大气密度比值与日光照时间密切相关,在夏至日附近北半球日照时间达到最大值,其密度值也达到最大,而在冬至日附近则相反, ρ_{N80}/ρ_{S80} 比值与日照时间呈正相关关系。图4(d)进行了 ρ_{N80}/ρ_{S80} 值与日照时间的相关性分析,采用二次函数进行拟合,得出 $y=1.800-0.725x+0.059x^2$,相关系数可达0.9353,可见 ρ_{N80}/ρ_{S80} 值与日照时间呈正相关关系,比值随着日照时间的增长而增长。Liu^[14]的结论是大气密度在夏半球平均增幅为40%,在

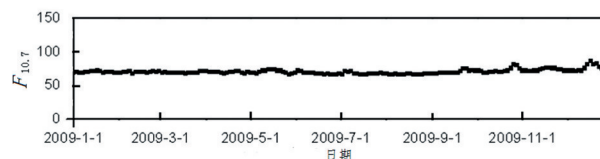
冬夏半球热层大气密度随季节呈现出不对称现象,与本文得出的观点一致。



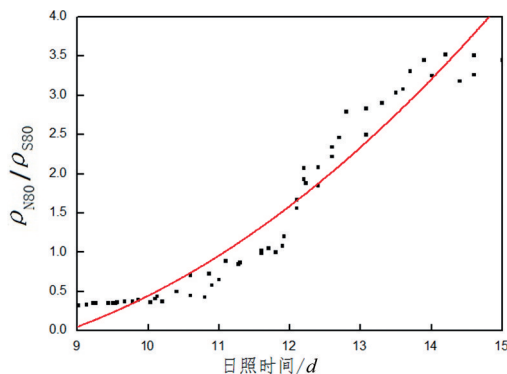
(a) 2009年670 km高度北纬80度与南纬80度大气密度比值



(b) 2009年日照时间



(c) 2009年太阳活动指数



(d) 相关性分析

图4 高度670 km N80°和S80°附近热层大气密度比值变化
Fig. 4 Variation of the thermospheric density between N80° and S80° during equinox and solstice at 670 km in 2009

2.3 不同高度的热层大气密度不对称性

图5(a)、(b)分别表示560 km和670 km高度附近在夏至和冬至期间,南北半球热层大气密度不对称程度比较及其随纬度变化。如图5所示,两至点期间不同高度上均存在随纬度增高的南北半球热层大气密度差异,随着纬度的升高差异性在逐步增大。结合表4进行分析,在低纬上空,相同南北纬度上,热层大气密度差

异不显著,但随着纬度增高,南北半球上空热层大气密度差异逐渐增大,到纬度 80°附近,夏至期间 560 km 附近, ρ_{N80}/ρ_{S80} 值高达 13.2, 而 670 km 附近该比值仅为 3.65, 两者之间相差 3 倍多, 表明 560 km 附近呈现出更为显

著的南北半球不对称性,冬至期间 560 km 附近, ρ_{N80}/ρ_{S80} 低至 0.07, 而 670 km 附近该比值为 0.32, 两者之间相差 4.5 倍左右, 同样表明 560 km 高度附近呈现出更为显著的不对称性。

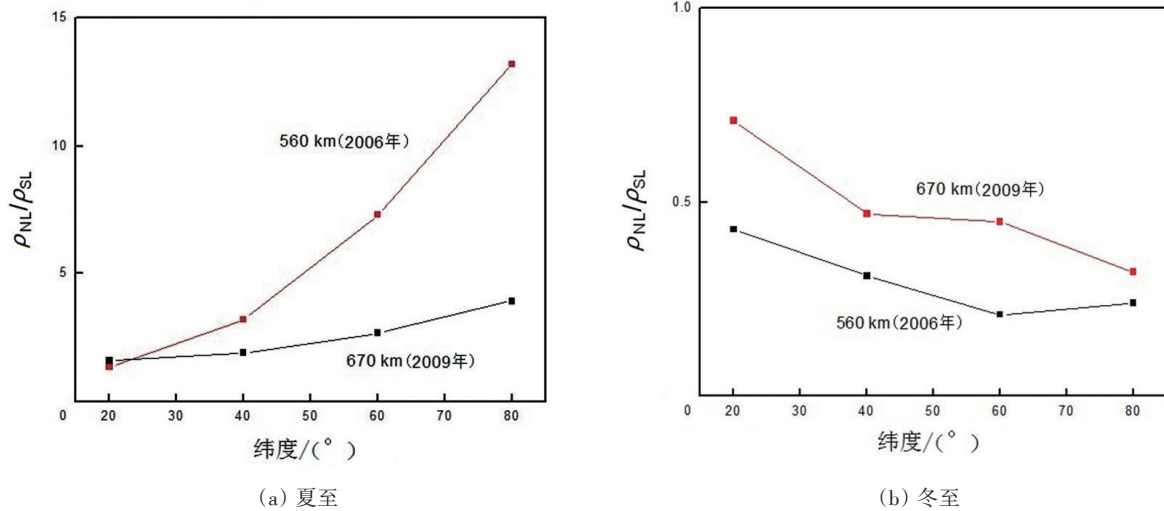


图5 560 km和670 km高度附近夏至和冬至期间相同南北纬度上空热层大气密度比值 ρ_{NL}/ρ_{SL} 变化
Fig. 5 Variation of the thermospheric density between the same latitude during solstice at 670 km and 560 km

表4 560 km和670 km高度附近两至点期间南北半球热层大气密度不对称程度变化
Table 4 Ratio of thermospheric density between the same latitude during solstice at 670 km and 560 km

时节	高度/km	日均 $F_{10.7}$	ρ_{NL}/ρ_{SL}			
			20°	40°	60°	80°
夏至	560	72(2006年)	1.36	3.2	7.3	13.2
	670	68(2009年)	1.56	1.91	2.67	3.65
冬至	560	93(2005年)	0.43	0.31	0.21	0.07
	670	78(2009年)	0.71	0.47	0.45	0.32

图6(a)、(b)分别为春分和秋分期间高度 560 km 和 670 km 附近相同纬度热层大气密度比值变化, 由图 6 可知, 与两至点期间热层大气密度不对称性不同, 两分点

期间不同高度相同纬度热层大气密度相近, 随纬度变化均较小, 因此表明两分点期间, 南北半球热层大气密度呈现随纬度准对称性变化。

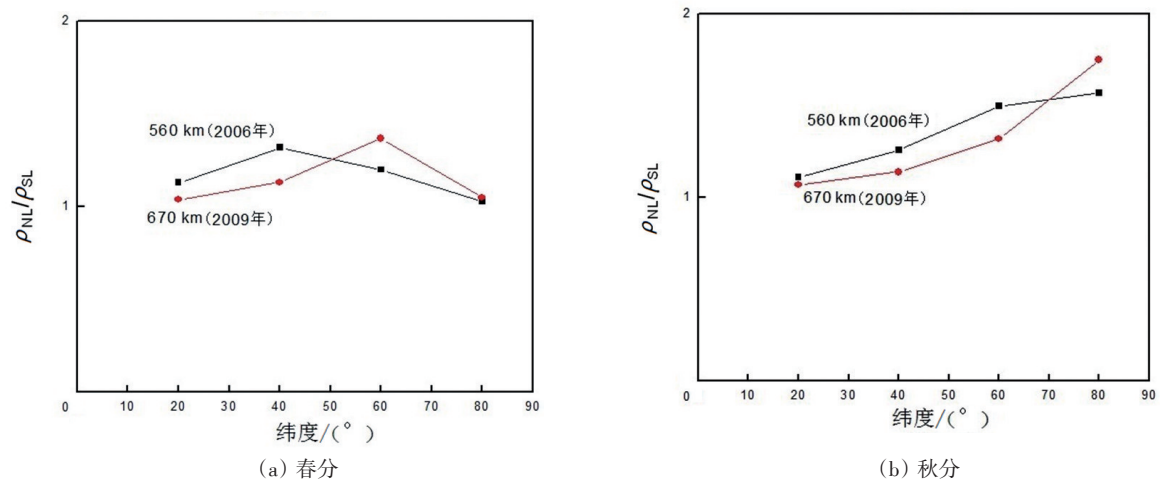


图6 560 km和670 km高度附近,春分和秋分期间相同纬度上热层大气密度比(ρ_{NL}/ρ_{SL})变化比较。
Fig. 6 The variation of thermospheric density between the same latitude during equinox at 670 km and 560 km

2.4 两至两分点期间热层大气密度比值 ρ_{N80}/ρ_{S80} 的 5 年变化特性

图 7 表示了从 2009—2013 年期间两至点和两分点期间高度 670 km 附近南北高纬 80° 附近上空热层大气密度比的变化, 由图 7 可知, 5 年内两至点期间均呈现出

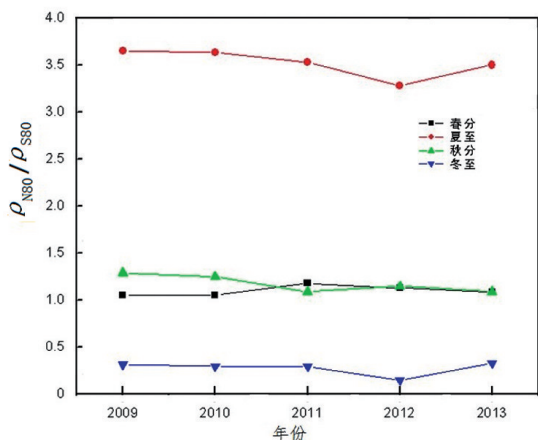


图 7 2009—2013 年两至点和两分点附近高度 670 km 上空热层大气密度 ρ_{N80}/ρ_{S80} 变化

Fig. 7 Variation of the thermospheric density between $N80^\circ$ and $S80^\circ$ during solstice and equinox at 670 km from 2009 to 2013

南北半球热层大气密度的显著不对称, 这种不对称性是一致的, 只是不同年份之间稍有程度差异; 而两分点期间, 则均呈现出南北半球热层大气密度随纬度对称变化特点。5 年间连续探测结果表明, 南北半球两至点和两分点期间热层大气密度随纬度变化特性与日光照时间交替变化紧密相关。

2.5 热层大气密度探测值与模式值比较

对比 2009 年在轨原位探测值与 MSIS00 模式值来讨论探测值与模式值在两分两至点附近全球热层大气密度的南北半球不对称性的差异问题(图 8)。图 8(a)、(c) 分别为春分和秋分期间航天器运行轨道圈上大气密度探测值与模式值的比较。图 8(b)、(d) 则分别为夏至和冬至期间的比较, 由图 8 可知两分点期间, 探测值与模式值的全球变化基本一致。表 5 列出了两分点期间南北半球纬度 80° 附近 670 km 高度上两者之间((探测值-模式值)/探测值)相对偏差。

由表 5 可知, 在 $N80^\circ$ 附近高度上两者数值接近一致, 偏差小于 1%; $S80^\circ$ 附近两者数值差也相近, 相对偏差小于 20%。由图 8(c)、(d) 可知, 两至点期间, 探测值与模式值之间差异显著, 夏半球模式值明显偏低, 随纬度增高偏低程度增大, 冬半球模式值又明显偏高, 偏高

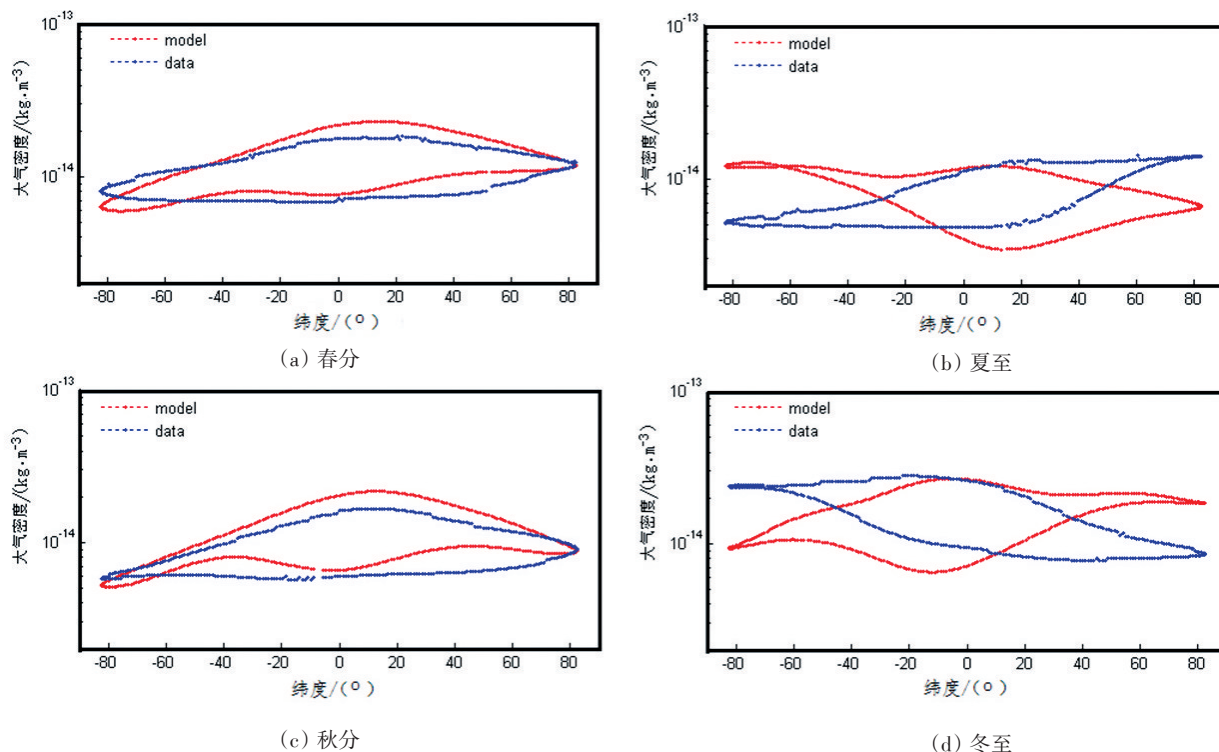


图 8 2009 年 670 km 高度附近两分两至点航天器运行轨道圈上大气密度探测值与模式值比较
Fig. 8 Comparison of observation data with MSIS00 data at 670 km during solstice and equinox in 2009

程度同样随纬度增高又增大,表6列出了两至点期间南北半球纬度 80° 附近670 km高度上两者之间的相对偏差。

表5 2009年670 km高度附近两分点期间大气密度探测值与模式值之间相对偏差

Table 5 Deviation of observation data with MSIS00 data between $N80^{\circ}$ and $S80^{\circ}$ during equinox at 670 km in 2009

地理位置	春分时相对偏差/%	秋分时相对偏差/%
$N80^{\circ}$ 附近	< 1	< 1
$S80^{\circ}$ 附近	+19	+13

表6 2009年670 km高度附近两至点期间大气密度探测值与模式值之间相对偏差

Table 6 Deviation of observation data with MSIS001 data during solstice at 670 km on 2009

地理位置	夏至时相对偏差/%	冬至时相对偏差/%
$N80^{\circ}$ 附近	58	-58
$S80^{\circ}$ 附近	-117	63

由表6可知,夏至期间模式值对日光照时间较长的夏半球地区显然响应不足,比探测值偏低58%左右,而对于日光照时间相对较短的冬半球地区,同样表示出跟踪性差,反而比探测值要高出1倍多。冬至期间北半球处于冬半球,模式值则比探测值偏高58%左右,而处于夏季的南半球上空模式值比探测值偏低63%左右。虽然从全球平均密度值而言,两者可能是相接近的,但对于航天器运行轨道上原位大气密度变化而言,模式是不够充分的,尚需做进一步修订。

3 结论

大量探测数据表明,热层大气密度不仅存在着随太阳和地磁活动程度的显著涨落和扰动,而且随太阳光照时间不同会呈现明显差异。低轨航天器运行轨道大气密度除了在经过日照和阴影上空所探测到的显著涨落变化之外,还会因地球以一定倾角绕太阳公转发生一年中南北半球上空夏冬半球的交替,而可能形成两至点附近全球热层大气密度的南北半球不对称性。

1) 航天器运行轨道上在轨原位大气密度探测数据表明,南北半球(尤其在高纬地区)高度670 km附近热层大气密度在夏至和冬至期间呈现出高、低差异的不

对称性,夏至期间在纬度 80° 附近处于夏半球的北半球要比处于冬半球的南半球相同纬度上空热层大气密度高出约3.65倍;冬至期间则相反,在纬度 80° 附近处于夏半球的南半球要比处于冬半球的北半球相同纬度上空热层大气密度也会高出约3.2倍,该差异程度均随着纬度降低而减少。

2) 春分和秋分期间南北半球相同纬度附近日光照时间相近。原位探测数据表明,两分点期间南北半球上空热层大气密度随纬度呈现与之相应的对称性变化,即赤道和低纬地区上空热层大气密度最高,随南北纬度增高大气密度均相近地下降,直至 80° 高纬度附近均接近最低值。

3) 不同高度呈现出两至点期间南北半球热层大气密度的不对称性程度不同。560 km高度附近大气密度在轨原位探测数据表明,夏至期间 $N80^{\circ}$ 比 $S80^{\circ}$ 上空要高高达13倍;而冬至期间则相反, $N80^{\circ}$ 只有 $S80^{\circ}$ 上空大气密度的7%左右,显然不对称性程度远大于670 km高度附近大气密度不对称性程度。但由于目前尚缺较低轨道热层大气密度探测数据,这种特性的高度变化尚待完善。

4) 探测值与模式值比较结果表明,当前模式值尚不能充分示踪出两至点期间,全球热层大气密度的南北半球不对称性,也就是说缺失对两至点期间(含前后)全球热层大气密度的夏半球与冬半球显著差异的充分考量,可能需做相应修正。

参考文献(References)

- [1] Daglis I A. Space storms and space weather hazards[M]. Dordrecht: Springer, 2001.
- [2] 秦国泰. 强磁暴、能量粒子暴与热层大气密度涨落之间的相关关系[J]. 空间科学学报, 2013, 33(1): 39-47.
Qin Guotai. Relationship between severe geomagnetic storm, energetic particle storms and thermosphere density strong disturbances[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33(1): 39-47.
- [3] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 不同高度和不同地磁扰动期间热层大气密度模式值与探测值的显著差异[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11): 3703-3714.
Li Yongping, Zhu Guangwu, Qin Guotai, et al. Significant differences of thermosphere density between the model and the observation values during different altitudes and geomagnetic disturbances[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(11):

- 3703–3714.
- [4] Liu H, Luhr, Henize V. Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110, A4: 301.
- [5] Chen G M, Xu J Y, Wang W, et al. A comparison of the effects of CIR- and CME-induced geomagnetic activity on thermospheric densities and spacecraft orbits: Case studies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A8): 315.
- [6] Sutton E K, Forbes J M, Nerem R S. Global thermospheric neutral density and wind response to the severe 2003 geomagnetic storms from CHAMP accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110, A9: S40.
- [7] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 地磁扰动期间热层大气 N_2 数密度异常增变[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(8): 883–889.
Li Yongping, Zhu Guangwu, Qin Guotai, et al. The abnormal variation of N_2 number density in thermosphere during geomagnetic disturbance[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 44(8): 883–889.
- [8] 秦国泰, 孙丽琳, 曾宏, 等. 2005年8月24日强磁暴事件对高层大气密度的扰动[J]. *空间科学学报*, 2008, 28(2): 137–141.
Qin Guotai, Sun Lilin, Zeng Hong, et al. Disturbance of the upper atmospheric density during August 24, 2005 severe geomagnetic storm event[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, 28(2): 137–141.
- [9] Willis P, Deleflie F, Barlier F, et al. Effects of thermosphere total density perturbations on LEO orbits during severe geomagnetic conditions (Oct–Nov 2003) using DORIS and SLR data [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 522–533.
- [10] Bruinsma S, Forbes J M, Nerem R S, et al. Thermosphere density response to the 20–21 November 2003 solar and geomagnetic storm from CHAMP and GRACE accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111 (A6): 03.
- [11] Qin G, Qiu S, Ye H, et al. The thermospheric composition different responses to geomagnetic storm in the winter and summer hemisphere measured by “SZ” atmospheric composition detectors[J]. *Advances in Space Research*, 42(7): 1281–1287.
- [12] Lei J H, Matsuo T, Dou X K, et al. Annual and semiannual variations of thermospheric density: EOF analysis of CHAMP and GRACE data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A1): 310.
- [13] Qian L Y, Solomon S C, Kane T J, et al. Seasonal variation of thermospheric density and composition[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A1): 312.
- [14] Liu J, Liu L B, Zhao B Q, et al. Superposed epoch analyses of thermospheric response to CIRs: Solar cycle and seasonal dependencies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A9): L10.
- [15] Weng L B, Lei J H, Doornbos E, et al. Seasonal variations of thermospheric mass density at dawn/dusk from GOCE observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 36(2): 489–496.
- [16] Xu J Y, Wang W B, Lei J H, et al. The effect of periodic variations of thermospheric density on CHAMP and GRACE orbits [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116, A2: 315.
- [17] 李颀, 徐寄遥, 唐歌实, 等. APOD卫星大气密度数据处理与标校[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(9): 3567–3576.
Li Xie, Xu Jiyao, Tang Geshi, et al. Processing and calibrating of in-situ atmospheric densities for APOD[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3567–3576.
- [18] 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): 15–16.
- [19] Picone M, Hedin A E, Drob D. NRLMSISE-00 model 2001 [EB/OL]. [2018-10-01]. <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/nrlmsise00.html>.
- [20] Emmert J T. Thermospheric mass density: A review[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(5): 773–824.

Variations of thermospheric density during equinox and solstice

LI Yongping^{1,2,3}, SUN Yueqiang^{1,2,3}, WANG Xinyue^{1,2,3}, FU Zhenyu^{1,2,3}

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China
2. Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Laboratory of Space Environment Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The thermospheric neutral density sees a strong variation during equinoxes and solstices due to the solar insolation variation. The long-term continual data from Chinese Atmospheric Density Detector installed on the satellite are used to study this variation. The main results of this study are that the thermospheric density has an obvious symmetry around March equinox and September equinox; the thermosphere density has an obvious asymmetry around June solstice and December solstice; the variations have an obvious hemispheric asymmetry in high latitude (around 80 degrees); the proportion of the atmospheric density is 3 ~ 3.6 times at the height of 670 km, 13 times at the height of 560 km; the latitude and the altitude contribute to this asymmetry; the comparison of the measured data and the NRLMSISE00 data shows that the NRLMSISE00 data cannot fully respond to the summer and winter hemisphere atmospheric density variations.

Keywords June solstice and December solstice; atmospheric density; solar far ultraviolet radiation ●



(责任编辑 王志敏)