

“神舟3号”运行高度上大气密度的变化^{*}

秦国泰 邱时彦 贺爱卿 祝义强 孙丽琳
林宪文 李 宏 徐学培 叶海华

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

“神舟3号”(SZ-3)大气密度探测器搭载在SZ-3留轨舱上于2002年3月发射入轨,在轨运行期间获得了轨道舱运行高度范围(330—410 km)内的大气密度数据.数据分析表明,无明显太阳和地磁扰动时,热层大气密度的主要变化之一是日照和阴影区域之间的涨落变化,最大涨落变化比约为3.0,变化比与太阳和地磁活动程度有关.在2002-04-17和2002-04-19的强地磁扰动时,全球热层大气密度上涨,同时在磁扰峰期探测获得30°N—40°N区域出现密度扰动异常现象.对强地磁扰动在运行轨道高度上大气密度最大涨幅约为60%左右,响应过程在时间上要比地磁扰动过程滞后6—7 h,日照和阴影区域中大气密度的响应变化程度明显不同.在太阳活动程度发生变化时,热层大气密度会呈现出明显的正相关变化关系.

关键词 大气密度; 太阳活动; 地磁活动

1 引言

地球高层大气的主要加热源和能量输入途径来自两个方面.一种途径是太阳辐射直接加热,因此辐射通量的变化会引起高层大气密度的涨落,同样因日照程度差异会形成相同高度上日照和阴影区域中大气密度的显著变化^{[1],[2]}.另一种途径是通过太阳风动能的部分被磁层耦合转换,并在极区和高纬地区高层大气中耗散,再输送给全球^{[3],[4]}.地磁扰动期间,表征着由这一途径输送的全球能量注入率剧增及对热层大气的扰动影响^{[5],[6]}.本文利用SZ-3大气密度探测器在SZ-3运行轨道高度范围(330—410 km)内所获得的大量探测数据和新的探测结果,分析和探讨上述加热源变化对飞船运行轨道空间环境大气密度的影响和变化特征.

2 数据

2.1 大气密度探测数据

SZ-3大气密度探测器于2002年3月入轨.在轨以倾角42°,330—410 km高度范围的准圆轨道运行.探测器采用直接探测传感器内气体压力和温度的方法,由气体分子动力学理论所建立的基本关系式获得自由大气密度.在轨运行时探测器每隔8秒向地面传送回

^{*} 载人航天工程应用项目资助

2003-08-19 收到原稿, 2004-05-08 收到修定稿

一组实测数据,经处理后,获得了2002年3月至6月期间船下点高度330—410 km范围内空间环境中性大气密度资料。

2.2 表征太阳活动和地磁活动强度随时间变化的数据

选用美国NOAA空间环境中心发布的2002年3月至8月间的 A_p 指数日平均值和 $F_{10.7}$ 日平均值变化数据。此期间包含了23周太阳活动双峰年中第二个峰期,也出现过多次强地磁扰动事件。

3 结果

3.1 无明显地磁扰动时大气密度的主要变化

在无明显地磁扰动状态下,太阳辐射是地球高层大气的主要加热源,它不仅与太阳活动程度密切相关,而且受地球自转影响,日照和阴影区之间由于加热程度差异,形成了所在高度上大气密度的显著涨落变化。通过SZ-3大气密度探测器的大量探测数据和分析,对日照和阴影区域之间的涨落变化特性有了新的结果和认识。

图1列举了SZ-3大气密度探测器于2002年6月2日至13日期间(此期间无明显地磁扰动),在355—377 km高度范围内的连续探测数据。图中每一组调制波动表示每天由高速数传系统下传的5—8个轨道圈探测数据,每个轨道圈的数据变化即为日照和阴影区大气密度的涨落变化。数据表明这种日照和阴影区之间的涨落变化具有以下特性。

(1)日照和阴影区之间大气密度的涨落变化是非扰动状态下飞船运行轨道空间环境大气密度最常见和显著的变化,也是飞船绕地球每运行一圈中要经受的大气密度涨落变化。这种涨落变化的比率范围在1.4—3.0内。330—400 km高度范围内,随高度增高,日照和阴影区之间大气密度涨落变化比率略有增大,由1.48增至1.59左右。

(2)日照区大气密度峰值出现在当地时间1200—1400 LT点之间,但实测结果也有偏离这个时区的现象。阴影区大气密度谷值一般出现在当地时间0400—0600 LT点之间^[2],实测结果偏离这个时区的现象就更多。

(3)由图1可知随着 $F_{10.7}$ 值的逐渐下降,这种涨落变化的幅度也跟随下降,即图中

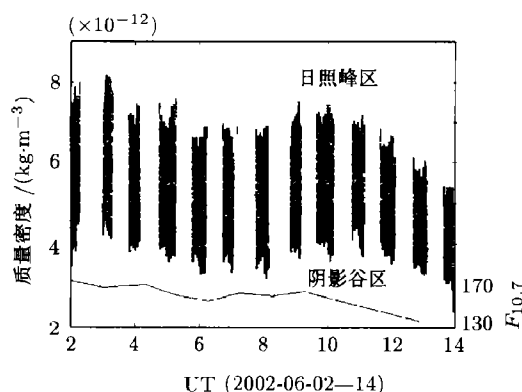


图1 日照和阴影区大气密度的涨落变化

Fig.1 Atmospheric density change of the sunshine and shaded area

上、下包络线之间幅度随 $F_{10.7}$ 值下降而减小. 表 1 显示了日照和阴影区之间大气密度涨落变化比率与 $F_{10.7}$ 值呈正相关关系, 同时也表明了日照区对 $F_{10.7}$ 的响应变化要高于阴影区.

表 1 日照区大气密度峰值 (ρ_p) 与阴影区大气密度谷值 (ρ_v) 比随 $F_{10.7}$ 的变化关系
Table 1 The change of ratio between the atmospheric density peak value (ρ_p) in the sunshine and valley value (ρ_v) in the shade with $F_{10.7}$

$F_{10.7}$	ρ_p / ρ_v
175	2.0
155	1.88
131	1.70

(4) 日照和阴影区之间大气密度涨落变化比与地磁扰动程度密切相关. 表 2 表示了由 SZ-3 大气密度探测器探测数据分析而得的日照区大气密度峰值和阴影区大气密度谷值之比与 A_p 值之间的变化关系. 显然两者呈现出负相关关系, 同时表明了阴影区大气密度对地磁扰动的响应变化要高于日照区.

表 2 日照区大气密度峰值 (ρ_p) 与阴影区大气密度谷值 (ρ_v) 之比随 A_p 值的变化关系
Table 2 The changes of ratio between the atmospheric density peak value (ρ_p) in the sunshine and valley value (ρ_v) in the shade with A_p

A_p	ρ_p / ρ_v
5.73	2.5—3.1
8.13	2.0—2.6
18.3	1.6—2.2
45—62	1.5—1.7

3.2 磁暴期间 SZ-3 运行轨道高度上大气密度的变化

地磁扰动期间大量能量粒子会在极区和高纬地区注入, 产生大尺度的大气加热, 引起所在高度上的大气密度增变, 并通过全球纬向流影响到纬度较低处. SZ-3 大气密度探测器首次较为详尽地探测到了磁暴期间飞船运行轨道高度上大气密度响应变化的全过程和扰动异常现象.

图 2 中分别列举了发生在 2002 年 4 月 17 日和 19 日的两次磁暴事件中磁扰峰期、磁扰前和磁扰结束后 SZ-3 运行轨道圈上 (332—350 km) 大气密度变化的比较. 可以看出以下特征.

(1) 飞船运行轨道高度上大气密度对地磁扰动过程的响应变化在时间上要滞后 6—7 h. 通常在地磁扰动达到峰值后 6—7 h, 大气密度才达到上涨峰值.

(2) 强地磁扰动期间, 热层全球大气密度均存在显著的上漲变化, 不同时区和地域的上涨幅度不同. 表 3 分别列举了发生在 2002 年 4 月 17 日和 19 日两次强地磁扰动期间不同时区和地域的大气密度上涨幅度变化, 表中说明了阴影区上涨幅度要明显大于日照区, 其中阴影区低纬地域上涨幅度最大.

表 3 强地磁扰动期间不同时段和地域的大气密度涨幅变化

Table 3 The changes of atmospheric density to different areas and LT during strong geomagnetic disturbance

大气密度涨幅	2002 年 4 月 17 日 (UT) 磁暴 / (%)	2002 年 4 月 19 日 (UT) 磁暴 / (%)
日照区正午 (1200—1400 LT)	~22	~28
阴影区清晨前 (0400—0600 LT)	~40	~47
阴影区低纬地域 (20°S—20°N)	~56	~54

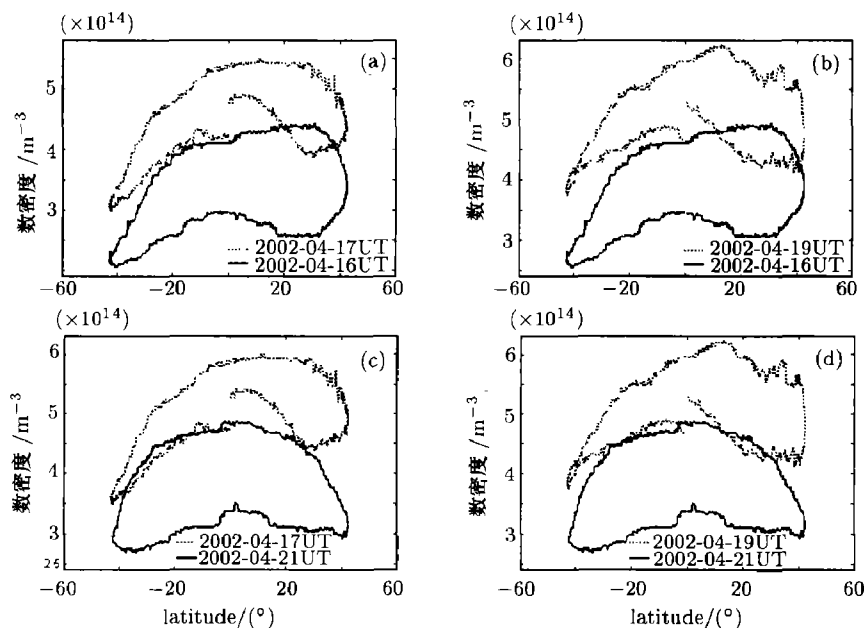


图 2 磁扰期间高层大气密度的涨落和扰动变化

- (a) 2002 年 4 月 17 日磁扰期间和磁扰前数密度比较 (b) 2002 年 4 月 19 日磁扰期间和磁扰前数密度比较
(c) 2002 年 4 月 17 日磁扰期间和磁扰结束数密度比较 (d) 2002 年 4 月 19 日磁扰期间和磁扰结束数密度比较

Fig.2 The change of the atmospheric density during 2002-04-17 and 2002-04-19 geomagnetic disturbance events

- (a) The comparison between before and in 2002-04-17 events (b) The comparison between before and in 2002-04-19 events (c) The comparison between the end and in 2002-04-17 events (d) The comparison between the end and in 2002-04-19 events

(3) 每次地磁扰动结束后, 全球大气密度很快回落至接近磁扰前状态. 大气密度涨落变化的时间与地磁扰动持续时间相对应. 对中等强度以上的磁暴事件引起大气密度扰动变化的时间尺度为 1—3 d.

(4) 发生在 2002-04-17 和 2002-04-19 的两次磁暴事件峰期中不仅存在着全球热层大气密度上涨性的响应变化, 而且在 30°N—40°N 出现了大气密度扰动异常现象, 在此纬度圈内发生了变幅为 10%—15%, 周期约为几分钟的大气密度显著涨落变化. 地磁扰动峰期过后, 这种异常现象也随着消失.

3.3 SZ-3 运行轨道高度上大气密度随太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的响应变化

太阳远紫外辐射是高层大气的主要加热源之一, 当太阳活动程度改变时, 太阳远紫外辐射通量也会随着变化 (通常用太阳活动指数 $F_{10.7}$ 来表征), 大气受到加热程度也就不同. 因此大气密度存在着与 $F_{10.7}$ 之间的相关响应变化. 在 2002 年 6 月 2 日至 14 日期间, $F_{10.7}$ 值 175 逐渐降至 131, 相对变化约为 34%, 而表征地磁活动强度的 A_p 值为 10—17 之间, 处于非明显扰动状态.

图 3 给出了由 SZ-3 大气密度探测器在此期间所测得的日照区大气密度峰值日平均值与 $F_{10.7}$ 值之间的变化关系. 由图 3 可知, 在 $F_{10.7}$ 值由 175 逐渐降至 131 的过程中, 370 km 高度附近, 1200—1400 LT 时区内相对应的大气密度峰值日平均值由 $2.57 \times 10^{14}/\text{m}^3$ 逐渐减小至 $1.49 \times 10^{14}/\text{m}^3$, 减幅达 72%. 两者之间呈正相关关系.

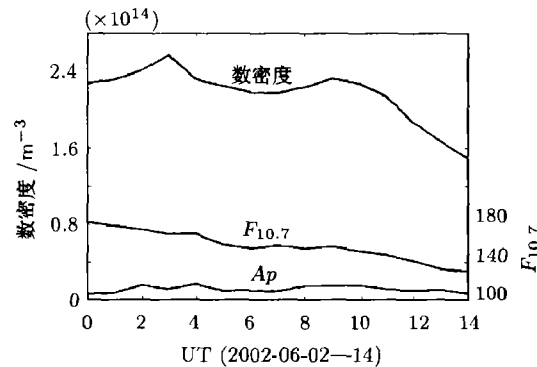


图 3 2002 年 6 月期间高度 370 km 附近大气密度与 $F_{10.7}$ 的变化比较

Fig.3 The change of atmospheric density with $F_{10.7}$ value during June 2002 at about 370 km

4 结语

由 SZ-3 大气密度探测器所得探测结果, 对飞船运行轨道高度上大气密度的变化, 可得以下结论.

(1) 在无明太阳和地磁扰动状态下, 330—410 km 高度范围内大气密度的主要变化是日照和阴影区之间的涨落变化. 最大涨落变化比可达 3.0, 该比率与太阳活动程度呈正相关变化关系, 与地磁扰动程度呈负相关变化关系. 对于在轨运行的低轨航天器而言, 这种涨落变化是航天器所要经受的主要周期性大气阻力变化.

(2) 地磁扰动期间, 全球热层大气密度均存在着显著的上涨性响应变化. 对于强地磁扰动, 在 330—410 km 高度范围内, 大气密度的最大涨幅约为 60%, 其中阴影区上涨幅度明显大于日照区. 在响应时间方面, 由地磁扰动引起的大气密度响应变化要滞后地磁扰动 6—7 h, 响应变化的全过程时间通常为 1—3 d. 2002-04-17 和 2002-04-19 的两次强磁扰峰期在 30°N—40°N 地区同时出现了短时间尺度和幅度显著的大气密度扰动异常现象.

(3) 非地磁扰动期间, 探测得到在高度 370 km 附近, 1200—1400 LT 时区内大气密度峰值日平均值与 $F_{10.7}$ 有如下正相关变化关系, 当 $F_{10.7}$ 值由 175 逐渐降至 131 过程中, 大气密度值相应降变约 72% 左右.

参 考 文 献

- [1] Hargreaves J K. The solar-terrestrial environment. London: Cambridge University Press. 1992
- [2] Qin Guotai *et al.* "SZ-2" atmospheric density detector measurement result (I): Change of the thermosphere density in the sunshine and shaded area. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(2):136—141. in Chinese (秦国泰等. 神舟 2 号大气密度探测器的探测结果 (I): 日照和阴影区域热层大气密度变化. 空间科学学报, 2002, **22**(2):136—141)
- [3] Pross G W, Roemer M, Slowey J W. Dissipation of solar wind energy in the earth's upper atmosphere: The geomagnetic activity effect. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**(516):215—261
- [4] Wei S, Ahn B H, Akasofv S I. The global joule heat production rate and the AE index. *Planet. Space Sci.*, 1985, **33**:279—281
- [5] Qin Guotai *et al.* "SZ-2" atmospheric density detector measurement result (II): Change of the thermosphere density during solar and geomagnetic activity. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(2):135—141. in Chinese (秦国泰等. 神舟 2 号大气密度探测器的探测结果 (II): 在太阳和地磁扰动期间高层大气密度的变化. 空间科学学报, 2003, **23**(2):135—141)
- [6] Qin Guotai, Sun Lilin, Li Hong. Change of thermosphere composition and density during severe geomagnetic activities. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(2):141—147. in Chinese (秦国泰, 孙丽琳, 李宏. 在强地磁活动期间热层大气成分和密度的变化. 空间科学学报, 1999, **19**(2):141—147)

CHANGES OF THE ATMOSPHERIC DENSITY AT SZ-3 ORBIT ALTITUDE

QIN Guotai QIU Shiyan HE Aiqing ZHU Yiqiang SUN Lilin
LIN Xianwen LI Hong XU Xuepei YE Haihua

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

Atmospheric density detector was on board spacecraft SZ-3 launched on March 2002. At SZ-3 orbit altitude (330—410 km) atmospheric density data were collected near half year. The results show that in the rather quiet period of solar and geomagnetic activity, the difference of the atmospheric density between the sunshine and shade area is one of the principal change of thermosphere density, the highest ratio of atmospheric density in the sunshine to the density in the shade reaches about 3.0, and correlate with solar and geomagnetic activity; During 2002-04-17 and 2002-04-19 two strong geomagnetic disturbance events, the globe thermosphere density obviously increases and amplitude of the increase reached about 60%, and shows a positive correlation with a delay of about 6—7 h; The abnormal disturbance of atmospheric density were observed in the 30°N—40°N during these strong geomagnetic disturbance events; The thermospheric density changes with the value of $F_{10.7}$ which represents the solar activity level and exhibits a obvious correlation.

Key words Atmosphere density, Solar activity, Geomagnetic activity