

“神舟三号”大气成分探测器探测结果 ——2002年4月磁暴期间 大气成分的异常变化

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

“神州三号”(SZ-3)大气成分探测器搭载在SZ-3留轨舱上于2002年3月26日发射入轨,正遇2002年4月发生的连续两次地磁扰动事件,SZ-3大气成分探测器测得了轨道舱运行高度上(330—350 km附近)大气成分响应变化和异常现象.探测数据表明,在地磁扰动期间,不仅发生了大气中主要成分O和N₂的数密度值增变的响应变化,而且在进入地磁扰动峰期开始后6 h左右在较高纬度处出现了N₂的异常增变和O的异常降变.4—5 h后,这种异常增变峰和降变谷由纬度42°N左右逐渐推移向纬度较低地区,直至消失.

关键词 地磁活动; 大气成分; 数密度

1 引言

在非扰动状态下,高层大气主要成分(O、N₂和N等)垂直分布的控制因子之一是扩散平衡,同时根据SZ-2大气探测器的探测结果表明,日照变化也有显著影响^[1].在太阳和地磁扰动期间,要考虑到如下诸多因素:如太阳远紫外辐射能量被大气吸收产生的离解、电离过程会随能量源的扰动而变化^[2];热层大气中的动力学过程,如全球环流所带动的成分输送会改变主要成分分布;磁暴期间大量的能量粒子注入极区和高纬度地区,对高层大气产生强烈的大尺度加热,并形成大尺度上升流,通过纬向流再影响到较低纬度区域^[3]等.上述因素均可能打破扩散平衡对大气主要成分的控制,引起高层大气成分的异常变化.本文则主要通过发生在2002年4月的两次磁暴事件,由SZ-3大气成分探测器获得的相应轨探测数据,来展示和讨论磁暴期间高度330—350 km范围内大气成分的响应变化和异常现象.

2 数据

2.1 大气成分探测数据

SZ-3大气成分探测器搭载在SZ-3轨道舱上,于2002年3月26日发射入轨,于4月

1 日进入以倾角为 42° 、周期约 90 min、高度 330—350 km 左右的准圆轨道长期运行. 探测器由取样室、离子源、四极滤质器、离子检测器以及相应的电子线路组成, 在轨运行时以每秒扫绘 1 帧大气成分质谱图, 由 SZ-3 上高速数传系统将探测数据信息传送回地面, 获得运行轨道高度上空间大气环境中的主要成分及其变化状况.

2.2 地磁活动强度数据

选用了美国 NOAA 空间环境中心发布的 2002 年 4 月间的地磁 A_p 指数和太阳活动指数 $F_{10.7}$ 日变化数据, 如图 1 所示, 此期间发生了 4 月 17 日和 19 日 (世界时, 以下相同) 的连续两次地磁扰动事件. 而 $F_{10.7}$ 并无明显的涨落变化.

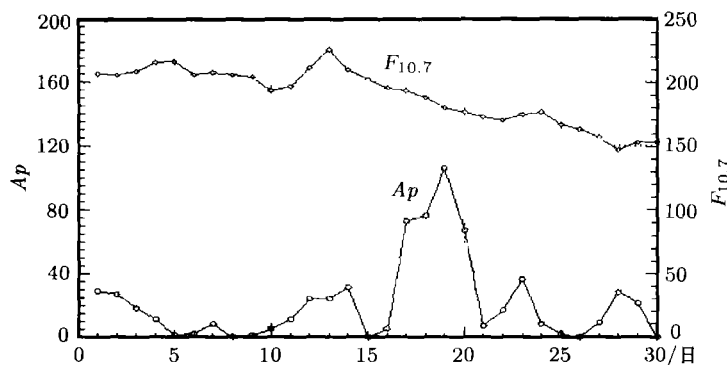


图 1 2002 年 4 月 A_p 指数和 $F_{10.7}$ 日平均值变化

Fig.1 Daily A_p index and $F_{10.7}$ value

3 结果

3.1 O 和 N_2 数密度值存在升变响

2002 年 4 月 17 日和 19 日的两次磁暴事件期间, 在高度 330—350 km 范围内, 大气中主要成分 O 和 N_2 数密度值呈程度不同的升变响应.

图 2 和图 3 分别表示了 2002 年 4 月 17 日磁暴事件前和磁暴峰期, 由 SZ-3 大气成分

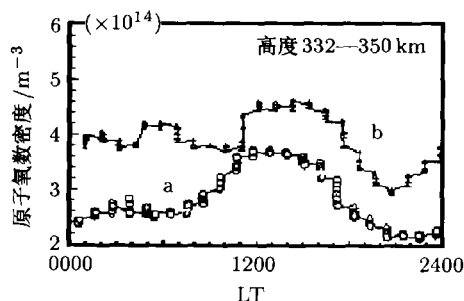


图 2 2002-04-17 磁暴期间高层大气原子氧变化
曲线 a 为磁暴前 7 h, b 为磁暴峰期

Fig.2 The change of upper atmospheric atomic oxygen density during geomagnetic disturbance on April 17, 2002

a: 7 hours before the geomagnetic disturbance,
b: during the peak geomagnetic disturbance

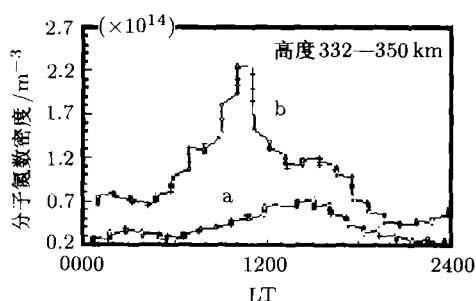


图 3 2002-04-17 磁暴期间高层大气分子氮变化
曲线 a 为磁暴前 7 h, b 为磁暴峰期

Fig.3 The change of upper atmospheric molecular nitrogen density during geomagnetic disturbance on April 17, 2002

a: 7 hours before the geomagnetic disturbance,
b: during the peak geomagnetic disturbance

探测器直接探测所得的原子氧 (O) 和分子氮 (N_2) 数密度的变化比较. 为了区分由日照和阴影区域所带来的影响, 图中均以数密度随当地时间分布变化来表示. 显然, 磁暴前 O 和 N_2 的数密度峰值区均出现在日照区正午时区 (1200—1500 UT), 而谷值区位于午夜时区 (0 时左右). 磁暴峰期的探测结果表明, 虽然两者时间相隔仅 20 h 左右, 且 O 和 N_2 数密度值在日照区峰值和阴影区谷值所位于的时区与磁暴前大致相同, 但数密度均有如图 2 和图 3 中的 b 所示的显著升变. 表 1 中列出日照区峰值和阴影区谷值的变化比较.

表 1 2002 年 4 月 17 日磁暴前和磁暴峰期大气中主要成分 O 和 N_2 数密度变化比较

Table 1 The comparison between the density changes of O and N_2 before geomagnetic disturbance and the changes during geomagnetic disturbance on April 17, 2002

区域		磁暴前/ m^{-3}	磁暴峰期/ m^{-3}	升变比率
日照区	O 峰值	3.71×10^{14}	4.64×10^{14}	1.25
	N_2 峰值	3.29×10^{13}	2.28×10^{14}	6.93
阴影区	O 谷值	2.13×10^{14}	2.94×10^{14}	1.38
	N_2 谷值	2.05×10^{13}	4.33×10^{13}	2.11

由表 1 可知, 不同成分响应变化的程度不同, 质量数较大的 N_2 要比质量数较小的 O 数密度值升变比率大得多.

3.2 O 和 N_2 数密度存在异常变化

2002 年 4 月 17 日和 19 日的两次磁暴期间, 大气中主要成分 O 和 N_2 数密度存在异常变化现象.

图 4 和图 5 分别表示了 4 月 19 日磁暴期间由 SZ-3 大气成分探测器在第 400 轨道圈上连续探测得到的 N_2 和 O 数密度变化. 由图可知, 高层大气主要成分 O 和 N_2 数密度发生了异常变化, 这种变化具有以下特征.

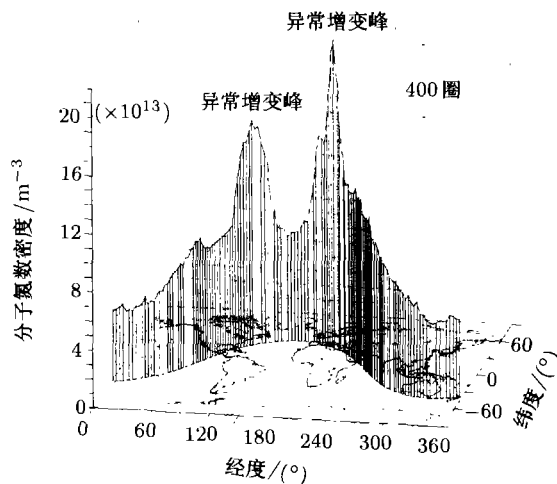


图 4 2002 年 4 月 19 日磁暴峰期 N_2 的异常增变

Fig.4 Abnormal N_2 increase during peak geomagnetic disturbance on April 19, 2002

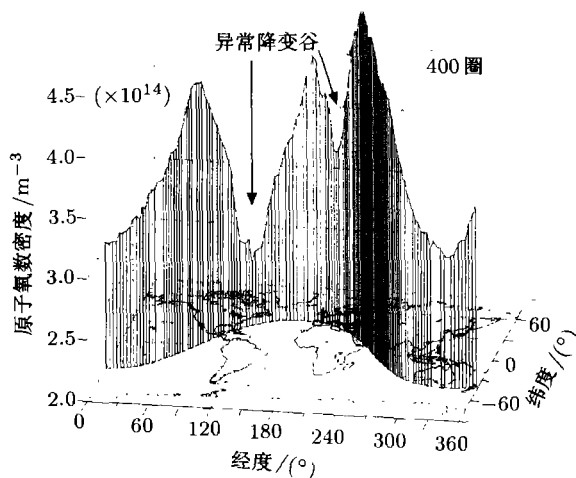


图5 2002年4月19日磁暴峰期O的异常降变

Fig.5 Abnormal O increase during peak geomagnetic disturbance on April 19, 2002

(1) N_2 数密度为异常增变, 而与此同时 O 数密度却对应为异常降变.

(2) N_2 数密度的双增变峰和 O 的双降变谷均对称地出现在北半球的日照区和阴影区, 但响应程度不同, 日照区 N_2 数密度增变峰高于阴影区, 而阴影区 O 数密度降变谷却更低于日照区.

(3) 异常变化出现在 $40^\circ N$ 附近, 而南半球 $42^\circ S$ 以下却没有探测到这种异常变化.

上述现象在 4 月 17 日磁暴期间的探测结果中同样存在.

由图 6 和图 7 可区分高层大气成分随当地时间变化的影响和比较磁暴期间与磁暴前、后高层大气主要成分的数密度变化差异. 在非扰动期间 (即磁暴前和磁暴结束后) 高层大气中主要成分 N_2 和 O 数密度随当地时间的变化规律十分一致, 其峰值均位于日照区正午时区, 而谷值均位于阴影区午夜时区. 在 4 月 17 日和 4 月 19 日的地磁扰动峰值期间, 这种分布变化明显地出现了偏离, 除了原有峰区和谷区之外, 在非正午时区出现比正午时区峰值高出成倍的 N_2 数密度异常增变, 而在非午夜时区出现了比午夜时区谷值更低的 O

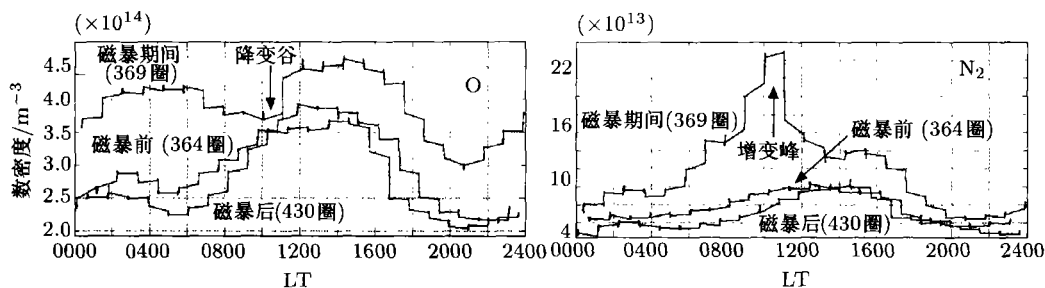


图6 2002年4月17日磁暴前后和峰期的大气成分随当地时间变化比较

Fig.6 The variation of atmospheric composition with local time before, after and in the peak of geomagnetic disturbance on April 17, 2002

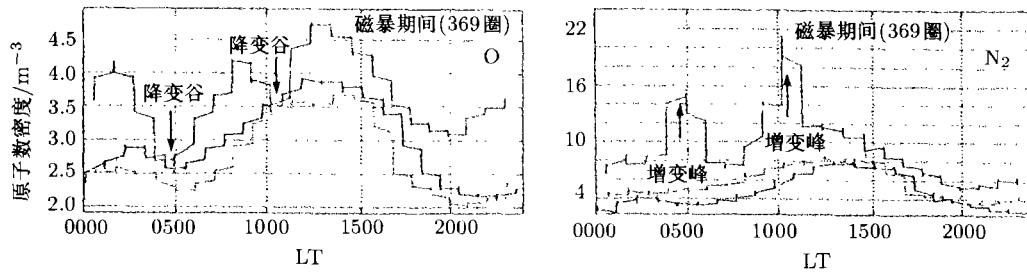


图 7 2002 年 4 月 19 日磁暴前后和峰期的大气成分随当地时间变化比

Fig.7 The variation of atmospheric composition with local time before, after and in the peak of geomagnetic disturbance on April 19, 2002

数密度异常降变. 上述结果表明了磁暴峰期所出现的大气成分异常变化完全有别于大气成分随当地时间的变化. 同时随着磁扰动结束, 高层大气中主要成分数密度也回复到磁扰动前的状态.

表 2 列举了 2002 年 4 月 17 日和 4 月 19 日的磁暴峰期 N_2 和 O 数密度异常变化值.

表 2 2002 年 4 月 17 日和 19 日两次磁暴峰期 N_2 和 O 数密度值的异常变化

Table 2 The abnormal changes of N_2 and O density during two geomagnetic disturbance peak on April 17 and 19, 2002

	ρ_{N_2}/m^{-3}			ρ_O/m^{-3}		
	异常增变峰值	磁暴前峰值	变化率	异常降变谷值	正午时区峰值	变化率
2002 年 4 月 17 日	2.28×10^{14}	3.29×10^{13}	6.93 (+)	3.70×10^{14}	4.64×10^{14}	0.8 (-)
2002 年 4 月 19 日	2.02×10^{14}	3.29×10^{13}	6.14 (+)	3.00×10^{14}	4.41×10^{14}	0.68 (-)

3.3 O 和 N_2 数密度存在纬度移动变化

两次磁暴峰期所出现的 N_2 数密度异常变化增变峰和 O 数密度异常降变谷均存在着随时间从较高纬度向较低纬度移动的变化.

图 8 和图 9 分别表示了 2002 年 4 月 19 日磁暴事件过程 (高度 330—350 km 附近) 大气中主要成分 N_2 和 O 数密度随纬度 ($42^\circ N$ — $20^\circ N$) 的变化. 图 8 和图 9 中 (a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 均分别表示磁暴前、磁暴峰期后 6 h、7.5 h、9 h 和 10.5 h 的探测结果. 因此实际上这些图组之间除 (a) 以外均表示了轨道舱在运行一圈 (约 90 min) 时间内的变化.

由图 8 可知, 在磁暴前 N_2 数密度随纬度变化并不显著, 但磁暴开始进入峰期 6 h 左右, 在 $40^\circ N$ 附近出现 N_2 数密度异常增变峰 (见图 8(b), 此时为 0900 LT 左右) 从 $6.0 \times 10^{13}/m^3$ 跃增至 $2.28 \times 10^{14}/m^3$, 并向较低纬度移动, 如图 8(c)、(d) 所示, 在推移过程中增变峰逐渐下降直至 4.5 h 左右后消失, 恢复接近到磁暴前状况. 同样由图 6 可知, O 数密度异常降变状况, 在 N_2 发生异常增变的时刻和纬度处发生了 O 数密度异常降变, 从 $3.63 \times 10^{14}/m^3$ 降至 $3.00 \times 10^{14}/m^3$, 如图 9(b) 所示. 谷区也向较低纬度推移, 如图 9(c)、(d) 所示, 在推移过程中降变逐渐减小直至 4.5 h 左右后消失, 恢复接近到磁暴前状况. 上述现象在 4 月 17 日磁暴事件也同样复现.

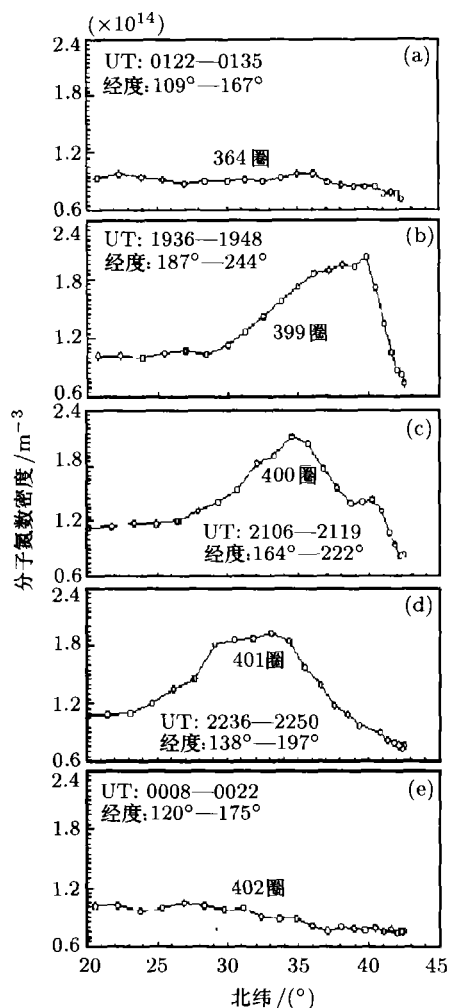


图 8 2002 年 4 月 19 日磁暴前和磁暴期间 N_2 数密度随纬度变化比较

(a) 磁暴前, (b) 峰期后 6 h, (c) 峰期后 7.5 h, (d) 峰期后 9 h, (e) 峰期后 10.5 h

Fig.8 N_2 density changes with latitude before and during geomagnetic disturbance on April 19, 2002

(a) before geomagnetic disturbance, (b) 6 hours after geomagnetic disturbance peak, (c) 7.5 hours after geomagnetic disturbance peak, (d) 9 hours after geomagnetic disturbance peak, (e) 10.5 hours after geomagnetic disturbance peak

4 结语

综上所述在 2002 年 4 月 17 日和 19 日两次磁暴事件中, SZ-3 大气成分探测器所获

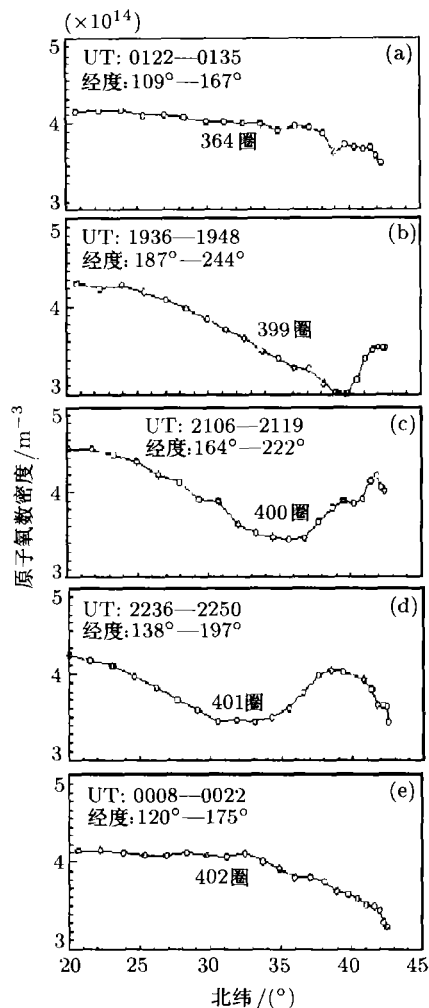


图 9 2002 年 4 月 19 日磁暴前和期间 O 数密度随纬度变化比较

(a) 磁暴前, (b) 峰期后 6 h, (c) 峰期后 7.5 h, (d) 峰期后 9 h, (e) 峰期后 10.5 h

Fig.9 O density changes with latitude before and during geomagnetic disturbance on April 19, 2002

(a) before geomagnetic disturbance, (b) 6 hours after geomagnetic disturbance peak, (c) 7.5 hours after geomagnetic disturbance peak, (d) 9 hours after geomagnetic disturbance peak, (e) 10.5 hours after geomagnetic disturbance peak

探测结果, 不仅再一次证实了热层大气成分对磁暴的响应变化^[4], 而且更详尽地展现了在高度 330—350 km 范围内, 高层大气中主要成分 O 和 N₂ 数密度响应程度的差异, 探测得到了在两次磁暴事件中均出现的 N₂ 数密度异常增变和 O 数密度异常降变现象. N₂ 增变比可达 6.9 左右, 而 O 的降变比也会低至 0.7 左右. 因此这表明 N₂ 与 O 之比发生了显著变化. 会由非扰动期的 0.15—0.20 跃增至 0.67 左右. 同时大气平均分子质量也会有明显增变. 探测结果还表明高层大气中主要成分对磁暴事件的响应具有日照和阴影区域的差异和南、北半球的不对称性等特征.

另外, 由探测结果可知这种在磁暴峰期中所出现的 N₂ 异常增变和 O 异常降变均逐渐向较低纬度推移, 变幅也随着减小直至消失. 从异常现象出现至消失的时间过程大约 4—5 h.

分析上述现象的产生应与磁暴期间大量能量粒子注入极区和高纬地区高层大气有关, 引起热层高度上大气被强烈大尺度加热, 形成大尺度上升流, 把较低高度上的大气抬升至较高高度, 形成上述的异常变化. 并通过纬向流把变化由较高纬度区域推移到较低纬度区域. 但有关高层大气中主要成分对磁暴事件的响应的日照、阴影区域差异和南、北半球不对称性问题还有待更多的探测结果证实和深入的机理分析.

参 考 文 献

- [1] Qin Guotai *et al.* “SZ-2” atmospheric composition detector measurement result: Chang of the upper atmosphere composition during solar and geomagnetic activity disturbance. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(Supp):42—48
- [2] Fuller-Rowell T J, Rees D. Numerical simulations of the distribution of atomic oxygen and nitric Oxide in the thermosphere and Upper Mesosphere. *Adv. Space Res.*, 1996, **18**(9/10):255—304
- [3] Rees D, Fuller-Rowell T J, Rishbeth H. On the use of mass spectrometer measurements to derive thermospheric temperature and density. *Planet. Space Sci.*, 1987, **36**:281—290
- [4] 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**:141—147)

**“SZ-3” ATMOSPHERIC COMPOSITIONS
DETECTOR MEASUREMENT RESULT
——ABNORMAL CHANGE OF THE UPPER
ATMOSPHERE COMPOSITION DURING
GEOMAGNETIC ACTIVITY DISTURBANCE
ON APRIL 2002**

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

An atmospheric composition detector born on spacecraft “SZ-3” lunched on 26 March 2002. It met two times geomagnetic activity disturbance events during April 2002. “SZ-3” atmospheric composition detector measurements show the change and abnormal phenomenon of atmospheric composition on 330—350 km. Measurement results show that not only the responses of the O and N₂ density in creases during geomagnetic activity disturbance events, but also the phenomenon of the abnormal N₂ density increases and the abnormal O density decreases, during the peak of geomagnetic activity disturbance events, and it moved from 42°N to lower latitude (near 27°N) during 4—5 hours.

The reason causing above mentioned phenomena might be relative to the energetic particle input into the pole and high latitude region which heats the upper atmosphere in a large scale and produce a large scale air upstream which brings the air from lower altitude up to higher altitude and results in the above mentioned abnormal changes. The latitude circulation moves the change from high latitude to lower latitude region.

Key words Geomagnetic activity, Atmospheric composition, Number density