

Qin Guotai. Relationship between severe geomagnetic storm, energetic particle storms and thermosphere density strong disturbances. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 39-47

强磁暴、能量粒子暴与热层大气密度 涨落之间的相关关系^{*}

秦国泰

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘要 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 左右星载大气密度探测器所得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。初步获得强地磁扰动期间, 地球同步轨道(外辐射带外环)均出现了增幅大于三个数量级的高能质子通量(尤其是 $E > 1$ MeV)强增强现象, 随后热层大气密度强烈上涨, 表明三者之间是正相关关系。在时间上地球同步轨道高能质子通量强增强现象先于日均 A_p 值(地磁活动程度)上涨约一天左右, 而热层大气密度强涨落现象又明显滞后于强地磁扰动事件。

关键词 地磁扰动, 能量粒子, 大气密度

中图分类号 P 353

Relationship Between Severe Geomagnetic Storm, Energetic Particle Storms and Thermosphere Density Strong Disturbances

QIN Guotai

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract During severe geomagnetic storms, there are strong changes of high energy proton flux and high energy electron flux measured by high energy particle detectors in the geosynchronous orbit. Thermosphere density will follow strong changes in the LEO orbit. Generally, the thermosphere density increased by the enhancement of the solar $F_{10.7}$ flux and the energy particle flux, however, which energy particles (*e.g.* proton or electron) and which particle energies (*e.g.* $E > 2$ MeV relativistic electrons or $E < 50$ keV low energies electrons) plays an important role during severe geomagnetic storms. This paper discussed the relationship between severe geomagnetic storm, energy particle storm and thermosphere density from the in-situ measurement data of energy particles from GOES8, GOES11 and GOES12 high energy particle detectors (from 1997 to 2007), and the thermosphere density data from Chinese satellite-borne density detectors (in 2005). The relevant results reveal that

* 中国载人航天工程项目资助

2011-08-20 收到原稿, 2012-09-26 收到修定稿

E-mail: qgt@nssc.ac.cn

during severe geomagnetic storms, high energy proton flux of $E > 1 \text{ MeV}$ showed strong enhancement, with the change ratio $\geq 10^3$. After one day the thermosphere density strong enhancement follow the variations of the high energy proton flux of $E > 1 \text{ MeV}$ and between severe geomagnetic activity, high energy proton flux and thermosphere density exhibits an obvious positive correlation, that is before the severe geomagnetic storm (near 1 day), the high energy proton flux showed strong enhancement in the geosynchronous orbit, and after the severe geomagnetic storm (delay 3~6 h), the thermosphere density obviously increases.

Key words Geomagnetic activity, Energy particle, Atmospheric density

0 引言

地球高层大气结构参数和成分的变化受到太阳活动程度大小调制,由此形成 11 年太阳活动周变化、半年变化、太阳自转周期(约 27 天)变化及周日变化等,而主要起源则是太阳远紫外辐射和 X 射线辐射,当其强度发生变化时会引起高层大气吸收辐射产生加热差异,导致大气密度发生涨落和扰动变化^[1-2].长期的观测表明,当地磁扰动程度变化时,不仅辐射带中高能粒子通量会发生异常变化,地球中高层大气密度也会发生显著涨落和剧烈扰动^[3-5].这种变化呈突发型和区域型,涨落周期视地磁扰动时间而定,短则几小时,长则几天.有关起因和机理,到目前为止通常认为是,在地磁扰动期间大量能量粒子加速注入并贯穿到较低大气层^[6-7],进而通过粒子在注入过程中不断耗散能量,给予大气加热,从而引起热层大气密度的涨落和扰动.然而是何种能量粒子(高能质子、高能电子或中子等)的加速注入和通量增强,何种能谱谱段的能量粒子(以能量电子而言,是 $E > 2.0 \text{ MeV}$ 相对论电子,还是 $E < 50 \text{ keV}$ 的低能电子等)起主要和决定性作用,这些均是尚不清楚而又倍受关注有待深入研究的问题.

本文利用地球同步轨道能量粒子探测器的长期观测数据,结合热层星载大气密度探测器所得的探测数据,探讨了强地磁扰动与能量粒子通量跃变和热层大气密度涨落之间的相关特性.这一研究对分析空间暴之间的相关特性以及空间物理现象之间的耦合关系具有积极意义,也对空间天气和空间环境预报具有实际应用价值.

1 数据

本文采用的地球同步轨道高度高能质子通量和高能电子通量的观测数据取自 NOAA 空间环境中心发布的 GOES8, GOES11, GOES12 卫星探测器 1997-2007 年的探测结果. Kp 和 Ap 地磁指数也取自 NOAA 发布的这一时间段的数据.

高层大气密度探测数据取自中国星载大气密度探测器 2005 年的探测结果.探测高度在 560 km 附近,探测器地面校准总不确定度为 5%~7%,在轨探测数据的精度(标准误差)小于 12%.

2 结果

2.1 强磁暴期间高能质子通量出现强增强

利用 NOAA 空间环境中心发布的地磁活动数据和 GOES 卫星在地球同步轨道高度上高能质子通量的观测结果,统计得到 1997-2007 年日均 $Ap > 100$ 的强地磁扰动事件共 17 次,同时统计与这些事件期间相对应的地球同步轨道上高能质子通量的变化.表 1 列出了这 17 次强地磁扰动事件期间地球同步轨道上 $E > 1 \text{ MeV}$ 和 $E > 10 \text{ MeV}$ 高能质子日均通量的相关变化关系.

由表 1 可知,强地磁扰动事件期间,地球同步轨道 $E > 1 \text{ MeV}$ 和 $E > 10 \text{ MeV}$ 的高能质子日均通量均出现了强增强, $E > 1 \text{ MeV}$ 的高能质子通量增幅通常要大于 $E > 10 \text{ MeV}$ 时.前者增幅最低也有 2 个数量级(日均通量值增至 $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,最高可达 5 个数量级(日均通量值达 $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$).

表 1 1997—2007 年强地磁扰动事件期间地球同步轨道高度 $E > 1 \text{ MeV}$ 和 $E > 10 \text{ MeV}$ 日均高能质子通量变化

Table 1 Change of daily high energy proton flux in the geosynchronous orbit during severe geomagnetic storms from 1997 to 2007

强地磁扰动事件日期 年-月-日	日均 A_p 值	$E > 1 \text{ MeV}$ 质子通量/($\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)		$E > 10 \text{ MeV}$ 质子通量/($\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)	
		日均值	增量(数量级)	日均值	增量(数量级)
1998-08-26	112	4.8×10^8	3	2.9×10^7	3
1998-09-25	121	1.1×10^8	3	3.4×10^5	1.5
2000-07-15	152	2.6×10^9	5	1.1×10^7	4
2001-03-31	155	6.8×10^7	3	2.1×10^6	2
2001-11-06	112	2.4×10^9	4	6.2×10^8	4
2001-11-24	108	2.3×10^9	4	3.8×10^8	3
2003-10-29	189	3.0×10^9	3	7.7×10^8	4
2003-11-20	117	2.8×10^7	2	7.3×10^5	1.5
2004-07-25	122	1.6×10^8	3	9.5×10^6	2
2004-07-27	162	2.7×10^8	3	1.9×10^6	2
2004-11-08	189	2.0×10^8	3	1.1×10^7	3
2004-11-09	120	3.0×10^8	3	3.9×10^6	2
2004-11-10	181	2.2×10^8	3	1.1×10^7	3
2005-05-15	105	6.7×10^8	3	2.2×10^7	3
2005-08-24	110	2.6×10^8	2.5	1.7×10^7	3
2005-09-11	105	1.1×10^9	3	7.4×10^7	3.5
2006-12-14	104	4.5×10^8	3	2.7×10^7	3

注 增量(数量级)是指高能质子通量在强磁扰峰期日均值与磁扰前日均值之间的增变数量级。

这种被加速和通量增强后的高能质子是否会沿磁场线向地球极区和高纬地区贯穿到热层高度,在能量耗散的过程中加热大气,形成强磁扰事件期间大气的主要加热源,使热层大气密度出现全球性显著抬升和局部区域的显著扰动变化有待研究。

图 1 给出了这 17 次强地磁扰动事件期间地磁活动程度(用日均 A_p 值表示)与地球同步轨道高能质子通量强度(用 $E > 1 \text{ MeV}$ 的高能质子日均通量值表示)之间的相关关系。图 1 中日均 $A_p < 50$ 的数据点为强地磁扰动事件前 5 天左右的日均 A_p 值和日均高能质子通量($E > 1 \text{ MeV}$),而日均 $A_p > 100$ 的数据点为强地磁扰动峰期日均 A_p 值和相对应的日均高能质子通量值。由图 1 可知,地磁活动程度与地球同步轨道高能质子通量($E > 1 \text{ MeV}$)强度之间呈正相关关系,强地磁扰动(日均 $A_p > 100$)时,高能质子日均通量均跃增到新的强度。

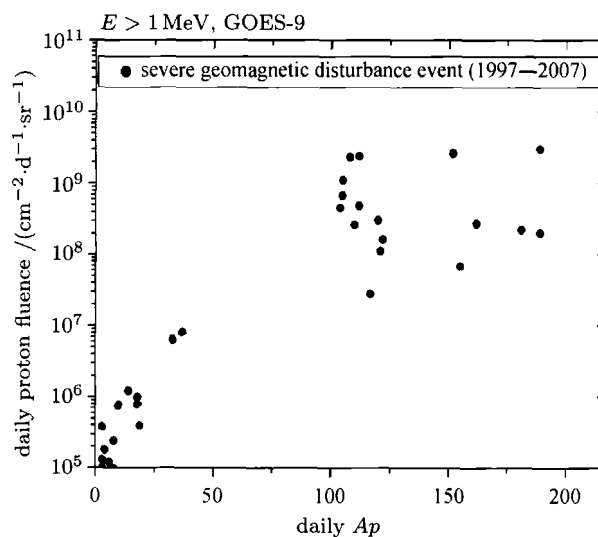


图 1 强地磁扰动事件期间地磁活动程度与地球同步轨道高能质子通量强度($E > 1 \text{ MeV}$)的相关关系

Fig. 1 Relativity between daily A_p and daily high energy ($E > 1 \text{ MeV}$) proton flux during severe geomagnetic disturbance event

2.2 高能质子通量增强在时间上
明显先于强磁暴事件

图 2 和图 3 分别比较了 23 周峰年期间 (1998—2001 年) 和太阳活动程度高年向低年过渡期间 (2003—2005 年), 强地磁扰动峰期前后 5 天 (图中横坐标 0 表示峰期当日, 正负号分别表示峰期前后的天数) 日均 A_p 值和地球同步轨道日均高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 的变化. 由图 2 可知, 出现在太阳活动峰年期间的强地磁扰动事件持续时间均在一天左右, 而地球同步轨道高能质子通量增强事件峰区时间处在同一天, 但强磁扰事件前一天高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$)

就已出现了显著增强 (日均通量已大于 $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 增幅达 2 个数量级左右. 图 3 给出的是从峰年到谷年期间的强地磁扰动事件, 与前者不同, 它们不仅强度更强, 而且持续时间更长 (最长可达 3 天), 同样, 地球同步轨道高能质子通量增强事件峰区时间也处于相同时区, 但强地磁扰动事件前一天高能质子通量也出现了显著增强 (日均通量已大于 $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 增幅也达 2 个数量级), 由此表明, 两者之间在时间上具有的特征是, 强地磁扰动期间, 地球同步轨道高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 增强现象要先于强地磁扰事件一天以上.

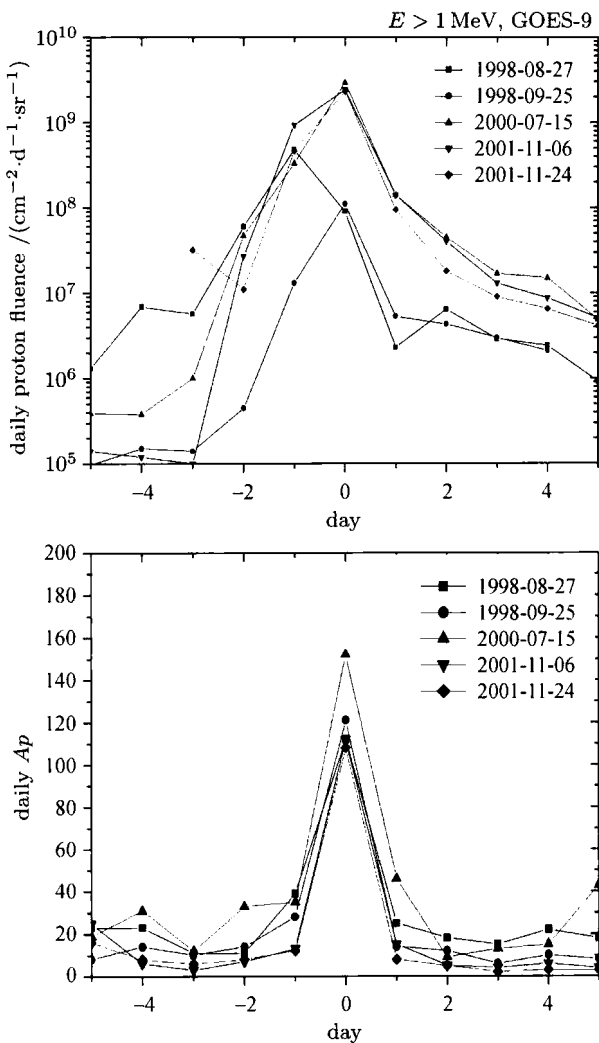


图 2 23 太阳活动周峰年期间强地磁扰动事件日均 A_p 值与地球同步轨道日均高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 变化的比较

Fig. 2 Change of daily A_p and daily high energy proton flux ($E > 1 \text{ MeV}$) in the geosynchronous orbit during severe geomagnetic storms

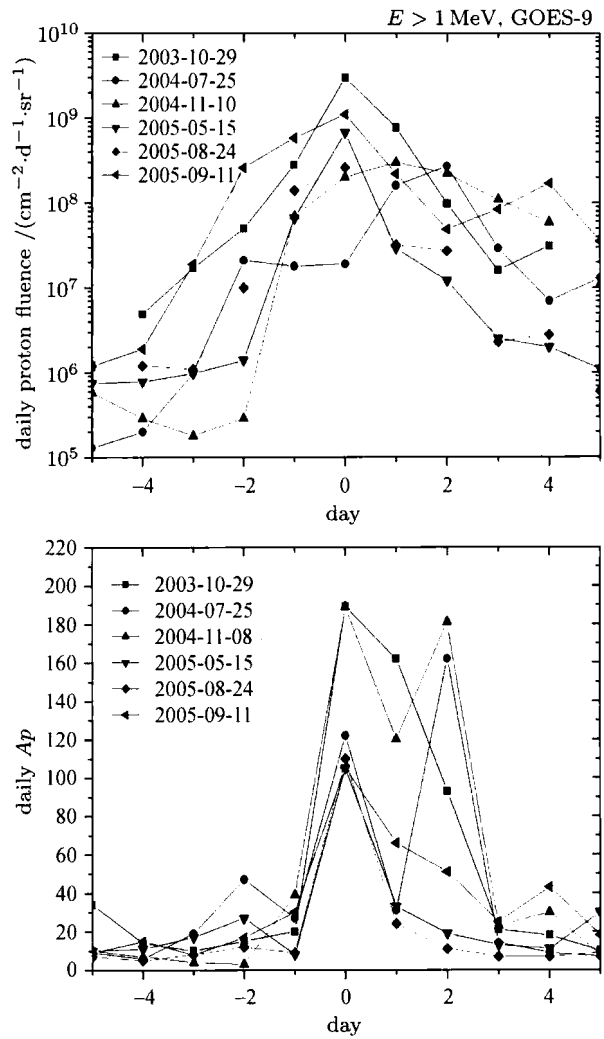


图 3 太阳活动峰年到谷年期间强地磁扰动事件中日均 A_p 值与地球同步轨道日均高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 变化的比较

Fig. 3 Change of daily A_p and daily high energy proton flux ($E > 1 \text{ MeV}$) in the geosynchronous orbit during severe geomagnetic storms

2.3 强磁暴期间热层大气密度与高能质子 通量之间存在相关响应 ($E > 1 \text{ MeV}$)

2005年8月24日和2005年9月11日两次强地磁扰动事件期间, 正值星载大气密度探测器在轨就位探测, 因此进行了事件期间地磁扰动程度、地球同步轨道高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 和热层大气密度变化的同期比较分析. 图4和图5分别给出了2005

年8月24日和2005年9月11日强地磁扰动期间地球同步轨道日均高能质子通量 ($E > 1 \text{ MeV}$), 日均 A_p 值以及日均全球热层 (约 570 km) 大气密度的同期变化比较. 由图可以看出, 变化呈正相关关系, 即强地磁扰动事件期间日均 A_p 值、高能质子通量和热层大气密度均为显著增变, 且增幅相随并与涨落过程基本一致. 在时间上, 这两次强磁扰事件期间, 均是地球同步轨道高能质子通量首先出现增强, 约一天后, 日均 A_p 值和热层大气密度随之达到峰区. 回落过程中也是高能质子通量首先呈现显著下降, 热层大气密度随之回落. 比较这种变化过程, 事件期间日均热层大气密度与日均高能质子通量变化两者之间呈现出

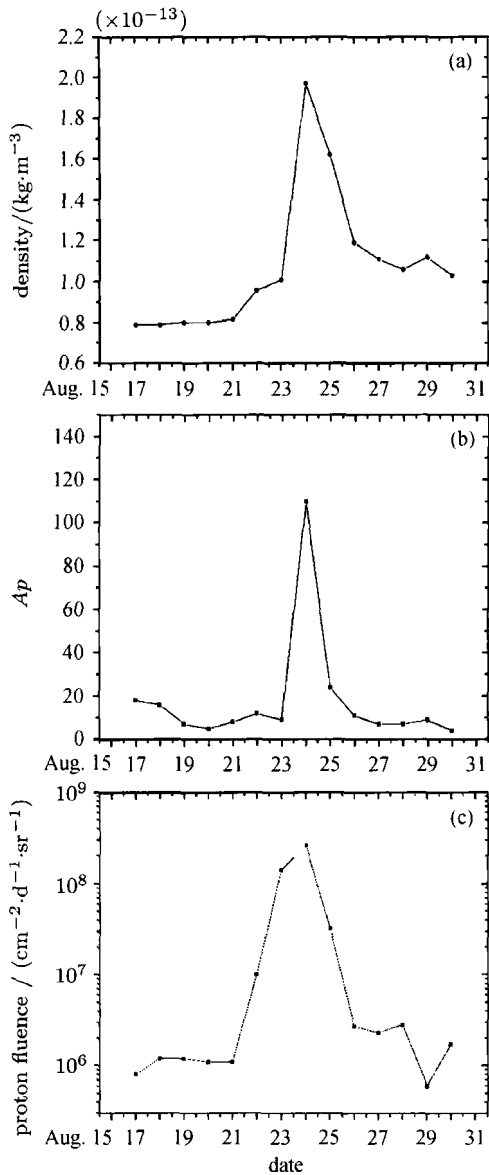


图4 2005年8月24日强地磁扰动期间地球同步轨道日均高能质子通量 (a), 日均 A_p 指数 (b) 和日均大气密度 (c) 变化的比较

Fig. 4 Change of daily high energy proton flux (a), daily A_p index (b) and daily atmospheric density (c) during severe geomagnetic storms on 24 August 2005

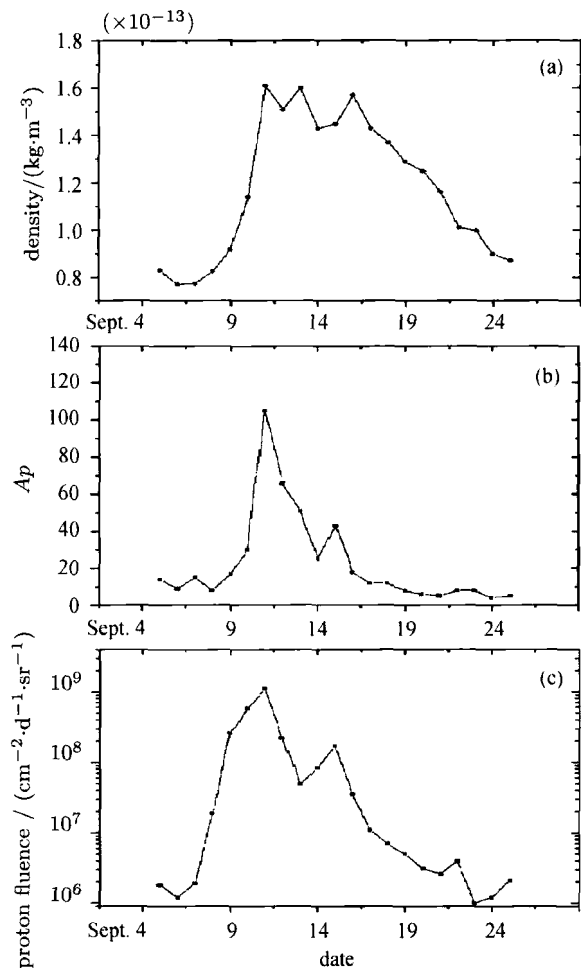


图5 2005年9月11日强地磁扰动期间地球同步轨道日均高能质子通量 (a) 日均 A_p 指数 (b) 和日均大气密度 (c) 变化的比较

Fig. 5 Change of daily high energy proton flux (a), daily A_p index (b) and daily atmospheric density (c) during severe geomagnetic storms on 11 September 2005

更为相近的相关性响应变化,且热层大气密度涨落明显滞后高能质子通量变化约一天以上。

关于热层大气密度对地磁扰动的响应特性问题,已有研究利用星载探测器所测大气密度数据进行对

比分析^[4-5,8]。

2.4 强磁暴期间相对论电子通量呈现急剧降变

GOES 高能电子探测器多次探测到在强地磁扰动期间地球同步轨道 $E > 2$ MeV 的相对论电子通量

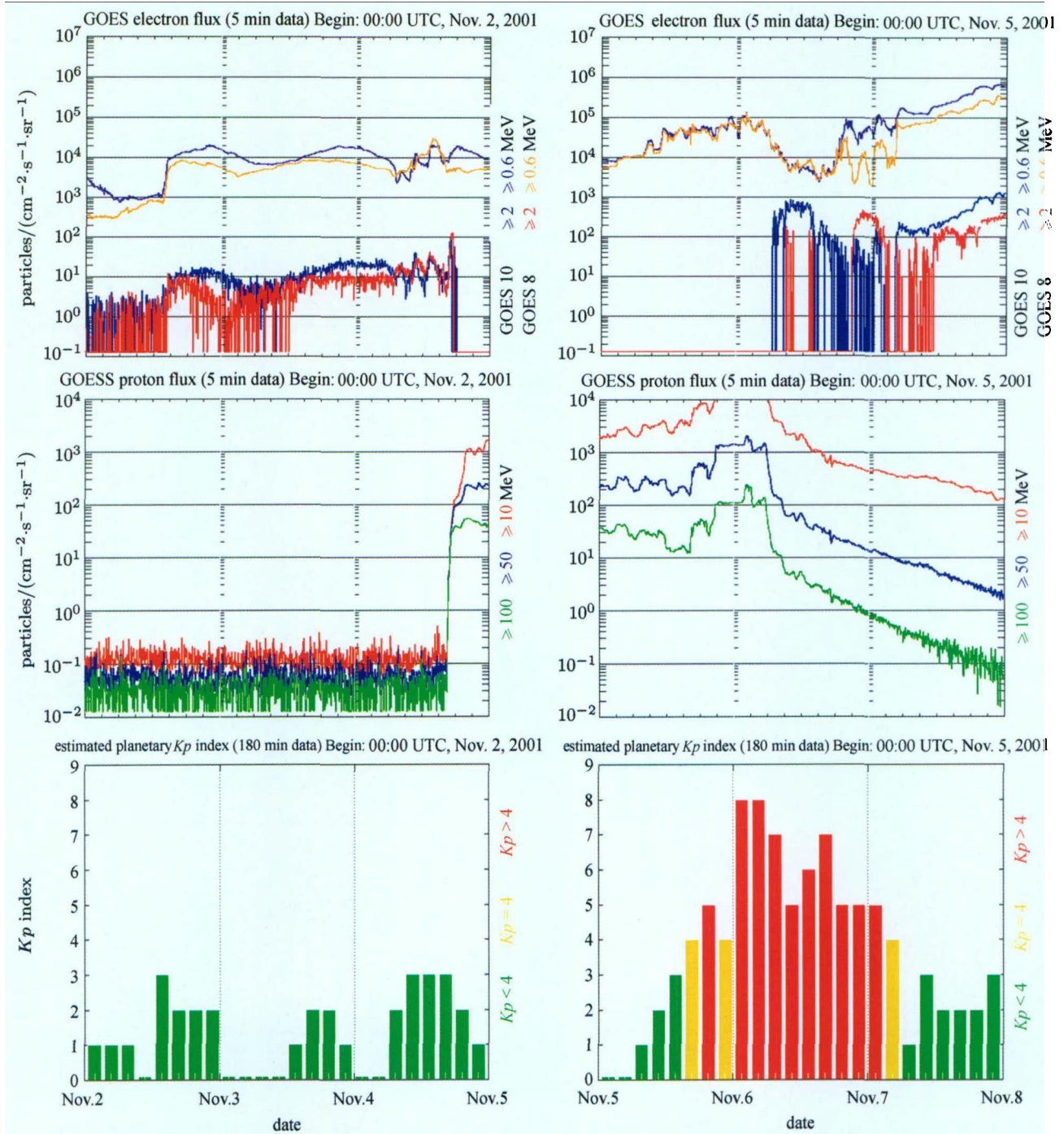


图 6 2001 年 11 月 5 日强地磁扰动期间地球同步轨道高能电子通量 (a), 高能质子通量 (b) 和 Kp 指数 (c) 的变化

Fig. 6 Change of high energy proton flux, high energy electron flux and Kp index (3 hours' data) during severe geomagnetic storms on 5 November 2001

急剧降变的现象. 图 6 和图 7 给出了 2001 年 11 月 5 日和 2003 年 10 月 29 日强地磁扰动期间, 地球同步轨道高能电子通量、高能质子通量及 K_p 指数的变化. 由图可知这两次地磁扰动事件前一天,

不仅发生了高能质子通量强增强, 与此同时 $E > 2$ MeV 的相对论电子通量呈现出急剧下降现象, 通量由 $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 迅速降至 $10^{-1} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 降幅达 2~3 个数量级. 但能量较低的电子通量却变

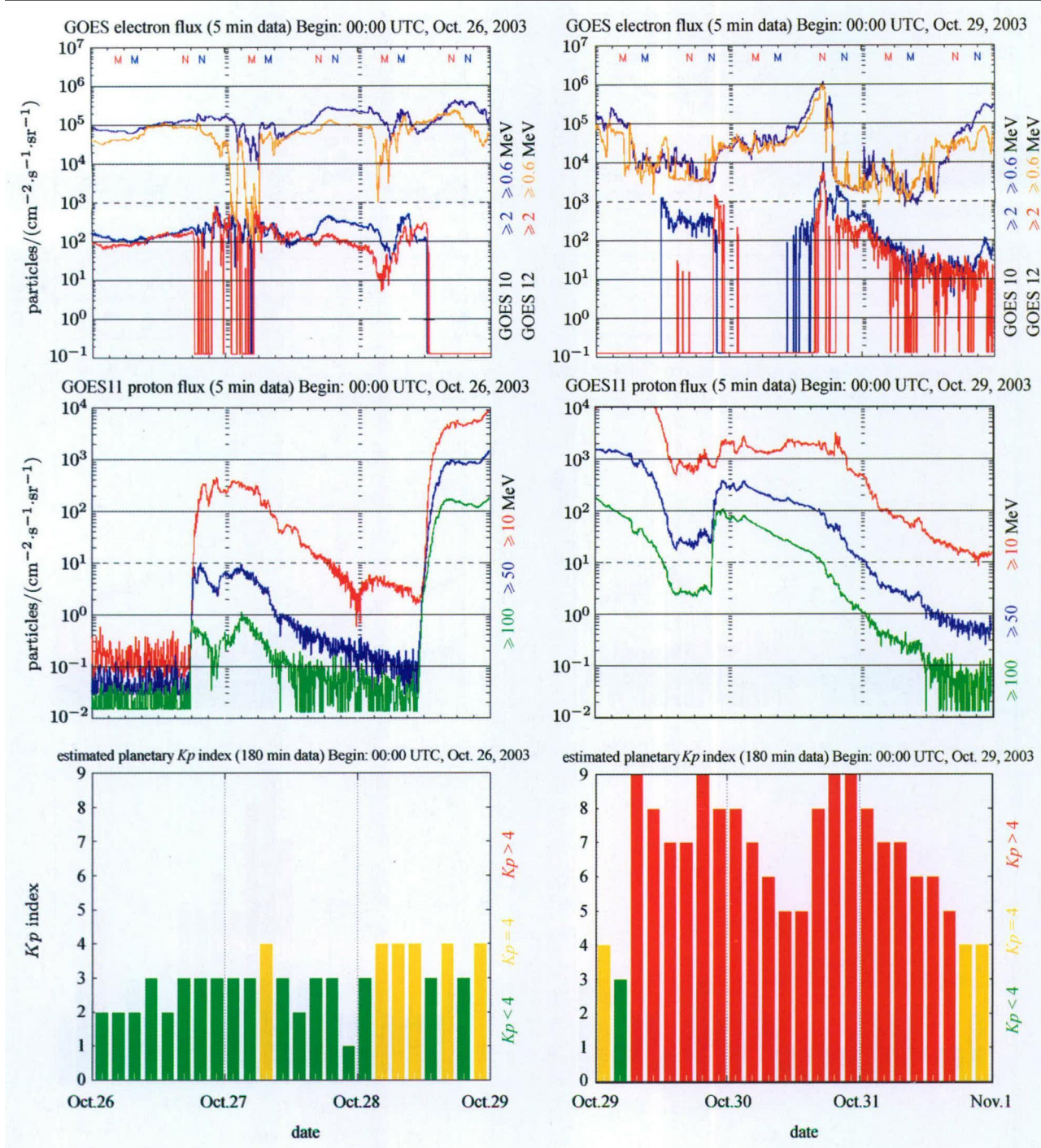


图 7 2003 年 10 月 29 日强地磁扰动期间地球同步轨道高能电子通量 (a), 高能质子通量 (b) 和 K_p 指数 (c) 的变化
 Fig. 7 Change of high energy proton flux, high energy electron flux and K_p index (3 hours' data) during severe geomagnetic storms on 29 October 2003

化不明显. 相对论电子通量剧降表明, 能量较高的电子发生迁移, 可能主要受强太阳风影响被压向较低高度. 也有一些观测结果表现出略有区别的变化, 图 8

给出了 2005 年 8 月 24 日强地磁扰动期间地球同步轨道高能电子通量, 高能质子通量及 K_p 指数的变化, 期间地球同步轨道高能质子通量同样在强地磁扰

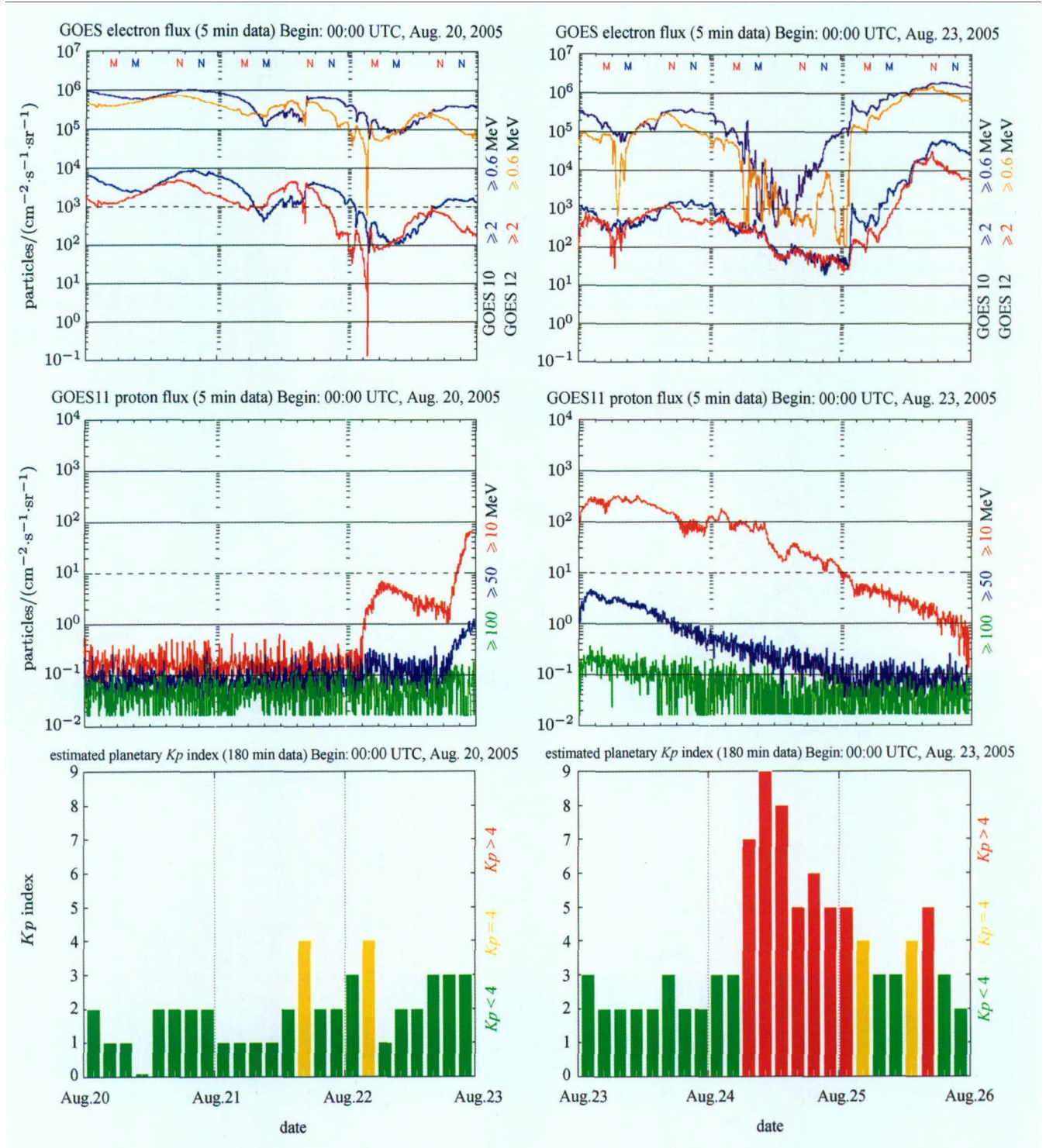


图 8 2005 年 8 月 24 日强地磁扰动期间地球同步轨道高能电子通量 (a), 高能质子通量 (b) 和 K_p 指数 (c) 的变化

Fig. 8 Change of high energy proton flux, high energy electron flux and K_p index (3 hours' data) during severe geomagnetic storms on 24 August 2005

动事件前一天发生了强增强, 但高能电子, 尤其是相对论电子通量只是在强地磁扰动发生时才有明显下降, 而且能量较低电子通量下降更显著. 高能电子通量在不同能谱段和不同时间区的降变差异, 可能是引起强地磁扰动期间热层大气密度出现区域性和随机性强烈扰动现象的主要因素之一.

3 结语

1997—2007年期间共发生了17次强地磁扰动事件, 对这些事件期间地磁活动程度, 地球同步轨道高能粒子通量探测数据和热层大气密度探测数据进行了统计分析, 结果表明, 强地磁扰动程度、高能粒子通量变化和热层大气密度显著涨落之间存在以下相关关系.

(1) 在日均 $A_p > 100$, K_p 指数峰值达到9的强地磁扰动事件期间, 地球同步轨道高能质子通量 (主要是 $E > 1\text{ MeV}$ 以及 $E > 10\text{ MeV}$ 的高能质子) 均出现了强增强现象, 增幅一般为3~4个数量级, 最低也有2个数量级 (日均通量值增至 $10^7\text{ cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$, 最高可达5个数量级 (日均通量值高达 $10^9\text{ cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$), 两者呈正相关关系. 与此同时还探测到高能电子通量 (主要是 $E > 2.0\text{ MeV}$ 相对论电子通量) 有急剧下降的现象.

(2) 强地磁扰动期间地球同步轨道高能粒子通量急剧变化, 无论是高能质子通量强增强, 还是相对论电子通量剧降, 均表征出外辐射带能量粒子向地球或沿磁场线向地球极区和高纬地区输送的加速和加强, 其作用是对地球高层大气输入能量, 粒子沉降过程中能量被耗损而加热大气, 这种加热源会引起热层大气密度显著上涨和扰动. 以2005年8月和2005年9月两次强地磁扰动事件为例, 事件期间所得热层大气密度探测数据表明, 其与表征地磁活动程度的日均 A_p 指数、地球同步轨道高能质子 ($E > 1\text{ MeV}$) 通量一样, 均为显著增变, 且增幅相随, 与涨落过程也基本一致. 这表明三者之间呈现出正相关关系.

(3) 在响应时间上, 这两次强磁扰事件均是地球同步轨道高能质子通量首先出现显著增强, 约一天后, 日均 A_p 指数和热层大气密度才出现增长; 同样

高能质子通量增至峰区后一天左右, 日均 A_p 指数与热层大气密度随之达到峰值区; 回落过程也是高能质子通量首先呈现显著降落后, 热层大气密度才跟随回落. 整个过程表明强磁扰事件中, 热层大气密度与地球同步轨道高能质子通量之间呈现出更为相近的相关性响应变化, 且热层大气密度涨落明显滞后高能质子通量强增强变化约一天.

参考文献

- [1] Qin Guotai, Qiu Shiyan, He Aiqing, *et al.* "SZ-2" atmospheric density detector measurement result (II): Change of the thermosphere density during solar and geomagnetic activity [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(2):135-141. In Chinese (秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 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 [J]. *空间科学学报*, 2003, **23**(2):135-141)
- [2] Banks P M, Foster J C, Doupanik J R. Chatanika radar observations relating to the latitudinal and local time variations of Joule heating [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:6869-6878
- [3] Qin Guotai, Sun Lilin, Zeng Hong, *et al.* Disturbance of the upper atmospheric density during August 24, 2005 severe geomagnetic storm event [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(2):137-141. In Chinese (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)
- [4] Liu H, Luhr H. Strong disturbance of the upper thermospheric neutral density due to magnetic storms: CHAMP observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A09529, doi:10.1029/2004, JA010908
- [5] Wills Petal. Effects of thermosphere total density perturbations on LEO orbits during severe geomagnetic conditions (Oct.–Nov.2003) using DORIS and SLR data [J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**:522-533
- [6] Baker D N, Kanekal S G. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2007, doi:10.1016/j.jastp.2007.08.031
- [7] Rostokre Gordon, Skone Susan, Baker Daniel N. On the origin of relativistic electrons in the magnetosphere associated with some geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3901-3704
- [8] Sutton E K, Forbes J M, Nerem R S. Global thermosphere neutral density and wind response to the severe 2003 geomagnetic storms from CHAMP accelerometer data. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A09s40, dio: 10. 1029/2004 JA01098