

哨声模合声波与地球同步轨道高能电子通量 增强事件事例研究*

何甜^{1,2} 刘四清¹ 郑金磊^{1,2} 龚建村¹

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 局部加速机制是磁暴期间地球外辐射带高能电子通量增强事件发生的重要原因. 此加速机制需要两个基本条件, 一是存在种子电子, 二是存在能与种子电子产生共振的加速波动, 包括哨声模合声波. 通过对 2004—2006 年 Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子通量的相关性分析, 更明确提出 Pi1 地磁脉动的持续时间可以作为种子电子通量的指示剂. 通过对三个磁暴事例地球同步轨道的种子电子通量、高能电子通量及哨声模合声波变化情况的分析, 发现在高能电子通量较强的事例中, 均观测到较高的种子电子通量和较强的哨声模合声波, 这在一定程度上验证了哨声模合声波对种子电子的回旋加速机制, 且合声波强度与高能电子通量有正的相关性.

关键词 地球同步轨道, 高能电子通量, 哨声模合声波, 地磁脉动

中图分类号 P 352

Study on High Energy Electron Flux Enhancement Events and Whistler Chorus Wave

HE Tian^{1,2} LIU Siqing¹ ZHENG Jinlei^{1,2} GONG Jiancun¹

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The local acceleration mechanism is one of the crucial factors for the high energy electron flux enhancement events in the outer radiation belt. There are two substantial preconditions for this acceleration mechanism. The first and the most important one is the presence of enough low energy electron (on the order of tens to hundreds of keV), so-called seed electron; the other is the enhancement of plasma waves including whistler chorus waves which can contribute to the electron acceleration by wave-particle interaction. Geomagnetic field data observed by Memambetsu ($L = 1.57$) observatory are used to extract Pi1 pulsation during 2004—2006. The linear correlation between Pi1 pulsation duration and seed electron flux (LANL 50~225 keV) is greater than 0.7, which indicates

* 国家重点基础研究发展计划项目资助 (2012CB825606)

2011-11-19 收到原稿, 2012-08-30 收到修定稿

E-mail: hetian06@mails.gucas.ac.cn

that the Pi1 pulsation duration is a good indicator of seed electron flux. After the investigation of three magnetic storms events in 2005, the evidence had been found for acceleration of seed electrons to high energies by whistler chorus waves and the positive correlation between the chorus waves' spectral density and high energy electron flux.

Key words Geosynchronous orbit, High energy electron flux, Whistler chorus wave, Geomagnetic pulsation

0 引言

在磁暴期间, 地球辐射带尤其是地球同步轨道(GEO)的高能电子通量增强事件历来是研究的热点问题. 在辐射带电子现存的几种加速机制中, 对局部加速机制的研究不断深入, 此加速机制需要存在两个基本的条件, 一是存在能量约为 100 keV 的种子电子; 二是存在各种能够与种子电子发生共振, 从而对种子电子进行加速的波动, 包括哨声波、ULF 超低频脉动等. 目前在 ULF 波方面对种子电子的加速机制已有很多研究^[1-3], 且已经以此加速机制为基础, 建立了一些初步的事件预报模式^[4-6].

已有事件预报模式研究指出, Pi1 地磁脉动持续时间可以作为种子电子数量的指示剂. 但这种关系只是通过其与高能电子通量的相关性而间接推断的, 且只考虑了 ULF 波对种子电子的加速, 并没有考虑其他波动对种子电子的可能加速, 例如哨声波^[7-11]. 因此在本文中, 通过相关性分析, 一是更确切地提出 Pi1 地磁脉动的持续时间能够较好地代表种子电子的数量; 二是对三个磁暴事例 GEO 轨道高能电子通量和哨声模合声波的变化情况进行初步分析, 为进一步研究量化哨声模合声波对 GEO 轨道种子电子的加速效果提供基础.

1 观测结果

所使用的电子通量数据来自 LANL 卫星, 包括 50~225 keV, 315~1500 keV 两个能道 (1 min 精度), 其中, 第一个能道可以代表能量约在 100 keV 的种子电子, 第二个能道则代表高能电子. *Dst* 指数与地磁数据均来自世界地磁数据中心, 其中地磁数据来自日本 Memambetsu 台站 (简称 MMB 台站, $L = 1.57$, 1 min 精度)*, 并使用地磁数据的水平分

量来抽取 Pi1 (25~400 mHz) 地磁脉动^[4]. 本文采用 Cluster 4 卫星 STAFF 探测器上的磁场波动功率谱密度数据 (1 min 精度, 频率范围 8~4000 Hz) 对磁暴事例中的合声波进行了研究.

1.1 Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子的相关性

为更确切地研究 Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子的相关性, 本文对 2004—2006 年种子电子日积分通量 (LANL, 50~225 keV) 与高能电子日积分通量 (LANL, 315~1500 keV) 以及 Pi1 地磁脉动的日持续时间与种子电子的日积分通量进行了线性相关性分析, 结果如图 1 所示.

从图 1(a) 可以看出, 种子电子通量与高能电子通量具有良好的相关性, 且在延迟两天左右线性相关性系数达到了最高值, 符合加速时间一般在 2~4 天的预期^[12-14]. 从两者的线性相关系数最高可达 0.7 以上来看, 种子电子是高能电子通量增加的主要因素; 从延迟时间上看, 可以种子电子作为输入, 建立高能电子通量的预报模型. 从图 1(b) 可以看出, Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子通量也具有良好相关性, 且延迟时间可以忽略, 这更加确切说明 Pi1 地磁脉动的持续时间可以较好地作为种子电子数量的指示剂.

1.2 高能电子通量增强事件观测

为研究哨声波合声模在高能电子通量增强事件中的作用, 利用 LANL 卫星与 Cluster 卫星数据, 对 2005 年 10 月 31 日, 2005 年 9 月 11 日和 2005 年 8 月 6 日三个磁暴事例的 GEO 轨道高能电子通量和哨声模合声波变化情况进行分析. 在这三个磁暴事件中, Cluster 4 卫星正值穿越地球同步轨道附近, 为观测提供了条件.

1.2.1 三个事件的观测结果

在 2005 年 10 月 31 日的事件中, *Dst* 指数约在 20:00 UT 左右达到最小值 -75, 为一个中等磁

* <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

暴(见图 2a). 其种子电子通量在 10 月 31 日的下半日(上半日数据缺失)以及 11 月 1 日期间基本在 10^5 以下(见图 2b), 其高能电子通量在 11 月 1-2 日维持在 10^3 以下(见图 2c). Cluster 4 卫星在 10 月 31 日的 09:35 UT-10:10 UT 和 11:15 UT-11:40 UT 穿越地球同步轨道附近, 均观测到了磁层扰动, 根据频率和形态判断, 存在频率低于 $0.5 f_{ce}$ (电子回旋频率) 的哨声波. 考虑到强度因素, 这里只给出了哨声波较强的 11:15 UT-11:40 UT 的波谱(见图 2d, 白线为 $0.5 f_{ce}$), 从图 2(d) 可以看出, 其穿越 GEO 轨道附近时 ($L = 6.6$), 哨声波强度不超过 $10^{-6} \text{ nT}^2/\text{Hz}$. 在另外两个事件中, 同样只给出了哨声波较强时期的波谱.

在 2005 年 9 月 11 日的事件中, Dst 指数约在 11:00 UT 达到最小值 -147 , 为一个强磁暴, 如图 3(a) 所示. 其种子电子通量在 9 月 11 日下半日以及 9 月 12 日期间基本在 10^5 以上, 如图 3(b) 所示, 其高能电子通量在 9 月 11 日下半日起也曾长时间维持在 10^3 以上, 如图 3(c) 所示. Cluster 4 卫星在 9 月 11 日 10:40 UT-11:15 UT 穿越地球同步轨道附近, 观测到了磁层哨声波扰动(见图 3d, 白线为 $0.5 f_{ce}$), 从图 3(d) 可以看出, 其穿越 GEO 轨道附

近时 ($L = 6.6$), 哨声波强度不超过 $10^{-5} \text{ nT}^2/\text{Hz}$.

在 2005 年 8 月 6 日的事件中, Dst 指数大约在 20:00 UT 左右达到最小值 -43 , 为一个弱磁暴, 如图 4(a) 所示. 其种子电子通量长时间维持在 10^5 以上, 如图 4(b) 所示, 其高能电子通量自 8 月 7 日起也

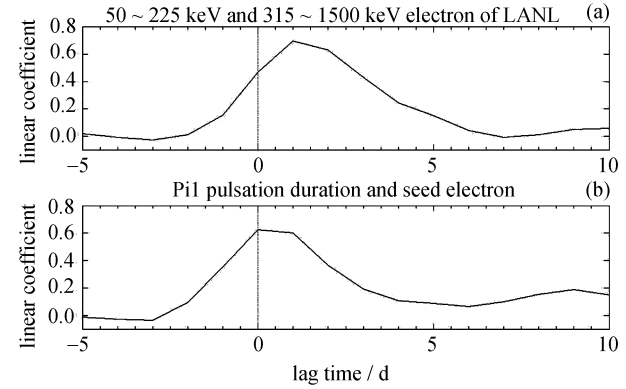


图 1 2004-2006 年 LANL 卫星不同能道电子通量延迟 (a) 和 Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子 (LANL, 50~225 keV) 通量延迟 (b)

Fig. 1 Linear correlation between 50~225 keV and 315~1500 keV for different lag days (a) and between Pi1 pulsation duration and 50~225 keV for different lag days (b) in 2004-2006

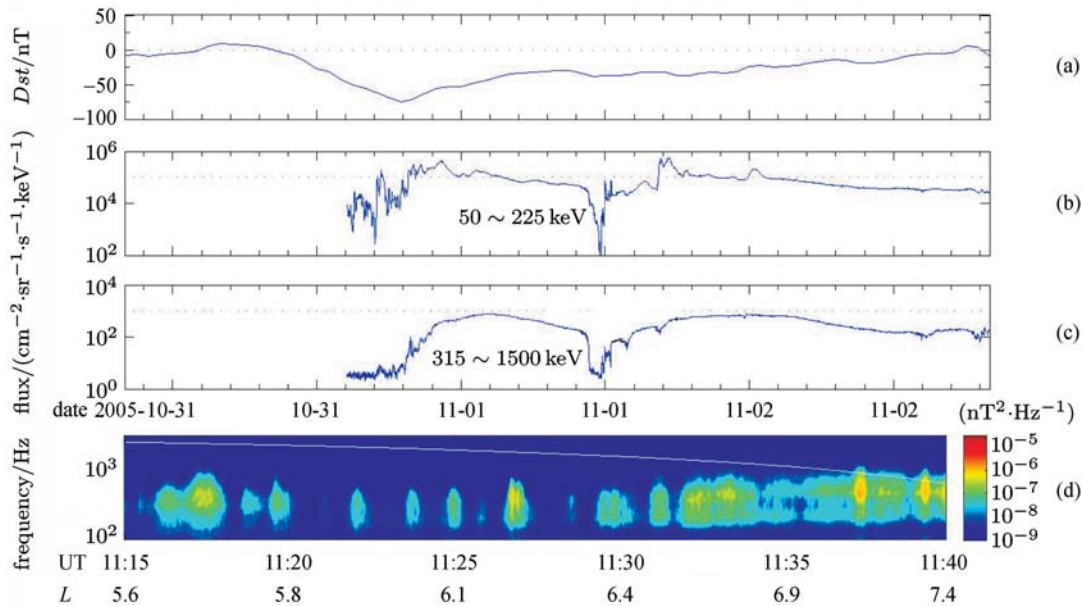


图 2 2005 年 10 月 31 日磁暴事例的 Dst 指数 (a), LANL 卫星 50~225 keV 和 315~1500 keV 电子通量 (b, c) 以及 Cluster 4 卫星观测到的哨声波 (d)

Fig. 2 Dst index (a), electron flux for 50~225 keV and 315~1500 keV on LANL (b, c) and whistler chorus waves observed by Cluster 4 (d) in October 31, 2005 magnetic storm event

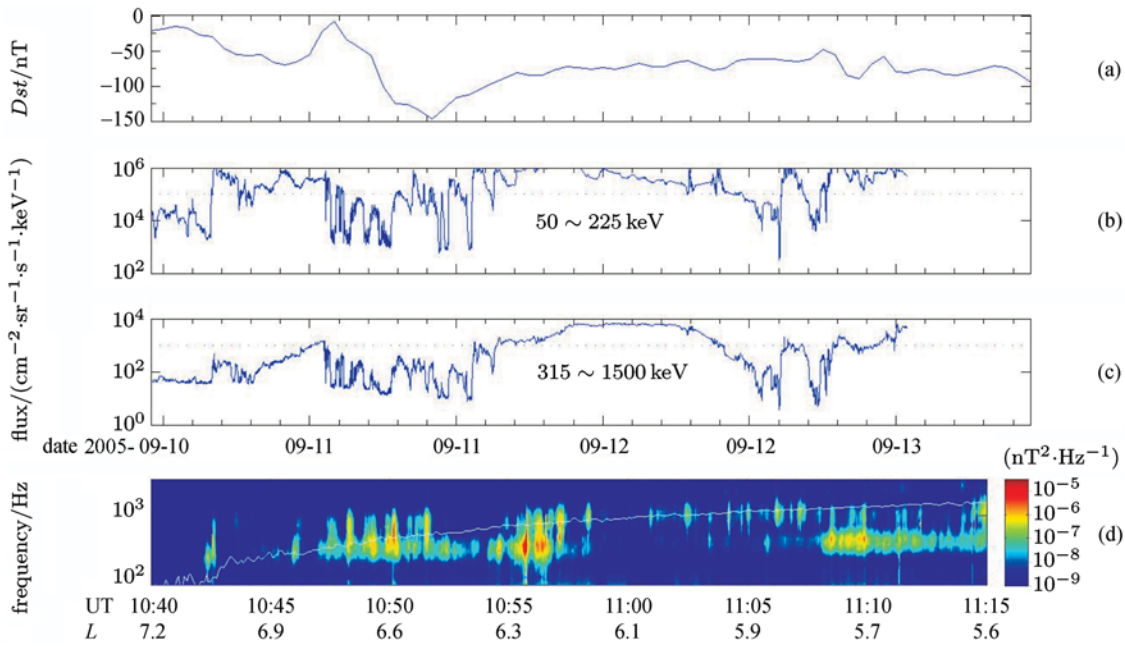


图 3 2005 年 9 月 11 日磁暴事例的 Dst 指数 (a), LANL 卫星 50~225 keV 和 315~1500 keV 电子通量 (b, c) 以及 Cluster 4 卫星观测到的哨声波 (d)

Fig. 3 Dst index (a), electron flux for 50~225 keV and 315~1500 keV on LANL (b, c) and whistler chorus waves observed by Cluster 4 (d) in September 11, 2005 magnetic storm event

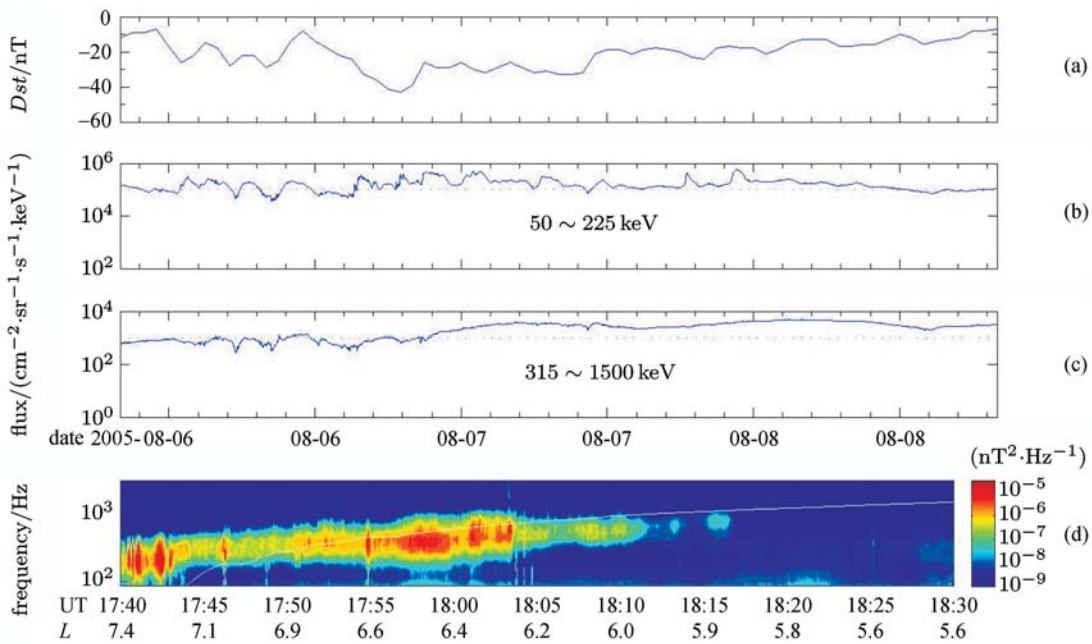


图 4 2005 年 8 月 6 日磁暴事件的 Dst 指数 (a), LANL 卫星 50~225 keV 和 315~1500 keV 电子通量 (b, c) 以及 Cluster 4 卫星观测到的哨声波 (d)

Fig. 4 Dst index (a), electron flux for 50~225 keV and 315~1500 keV on LANL (b, c) and whistler chorus waves observed by Cluster 4 (d) in August 6, 2005 magnetic storm event

表 1 三例事件的 Dst 指数最小值、种子电子通量、哨声波强度和 高能电子通量
 Table 1 Minimum Dst , seed electron flux, high energy electron flux and spectral density of whistler chorus wave for above three events

事例时间	最小 Dst	种子电子通量在磁暴日及后一日的对数平均值/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{keV}^{-1}$)	哨声波强度对数值/ ($\text{nT}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$)	高能电子通量在磁暴日 后两日内的对数平均值/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{keV}^{-1}$)
2005-10-31	-75	5.01	-6	2.55
2005-09-11	-147	5.62	-5	3.36
2005-08-06	-43	5.26	-4.5	3.52

长时间维持在 10^3 以上, 如图 4(c) 所示. Cluster 4 卫星在 8 月 6 日 17:40–18:30 UT 穿越地球同步轨道附近, 观测到了明显的磁层哨声波扰动 (见图 3d, 白线为 $0.5 f_{ce}$), 从图 3(d) 可以看出, 其穿越 GEO 轨道附近时 ($L = 6.6$), 哨声波强度最强约 $10^{-4.5} \text{nT}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$.

1.2.2 三例事件的对比分析

为研究哨声波在 高能电子通量增强事件中所起的作用, 对这三例事件进行了对比分析. 计算种子电子通量在磁暴日以及后一日的平均值和高能电子通量在磁暴日后两日的平均值, 并给出了 Cluster 4 卫星穿越 GEO 轨道时哨声波的最高强度以及磁暴事件对应的 Dst 指数最小值 (见表 1).

虽然上述计算较为粗略, 但通过对比三例事件图 2~4 的结果, 可以明显看出, 由于 10 月 31 日事件的种子电子通量与哨声波强度均较弱, 其高能电子通量也较弱. 9 月 11 日事件的种子电子通量与哨声波强度明显强于 10 月 31 日事件, 其高能电子通量也明显强于后者. 相比 9 月 11 日的事件, 8 月 6 日事件中, 其种子电子通量虽然较低, 但哨声波明显较强, 其高能电子通量也较强, 说明高能电子通量与哨声波强度具有正相关性. 上述对比在一定程度上验证了哨声模合声波对种子电子的回旋加速机制. 此外, 三例事件还表明, 高能电子通量增强事件是否发生与磁暴强弱 (Dst 指数) 没有关系.

2 结论

通过对 Pi1 地磁脉动持续时间和种子电子通量的相关性分析, 以及对 2005 年 10 月 31 日, 2005 年 9 月 11 日和 2005 年 8 月 6 日三个磁暴事件高能电子

通量和哨声模合声波变化情况的分析, 得出以下初步结论.

(1) 种子电子通量与高能电子通量具有良好的相关性, 其是高能电子通量增加的主要因素, 因此可以种子电子作为输入, 建立高能电子通量的预报模型.

(2) Pi1 地磁脉动持续时间与种子电子通量也具有 良好的相关性, 且延迟时间可以忽略, 这更加明确指出了 Pi1 地磁脉动的持续时间可以较好地作为种子电子数量的指示剂.

(3) 在 高能电子通量较强的事件中, 观测到了较高的种子电子通量和较强的哨声模合声波, 一定程度上验证了哨声模合声波对种子电子的回旋加速机制, 且合声波强度与高能电子通量具有正相关性.

参考文献

- [1] O'Brien TP, Lorentzen KR, Mann I R, *et al.* Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual ULF and VLF acceleration [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **108**(8), DOI: 10.1029/2002JA009784
- [2] Ukhorskiy A Y, Takahashi K, Anderson B J, *et al.* Impact of toroidal ULF waves on the outer radiation belt electrons [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2005, **110**:19 782 012
- [3] Li Liuyuan, Cao Jinbin, Zhou Guocheng, *et al.* Electron acceleration by compressional ULF turbulence in the geomagnetosphere [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(1):1-5. In Chinese (李柳元, 曹晋滨, 周国成, 等. 磁层压缩 ULF 湍流对电子的加速 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(1):1-5)
- [4] He T, Liu S Q, Xue B S, *et al.* Study on a forecasting method of the relativistic electron flux at geostationary orbit using geomagnetic pulsation data [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2009, **52**(10):2419-2427. In Chinese (何甜, 刘四

- 清, 薛炳森, 等. 利用地磁脉动预报地球同步轨道相对论电子通量方法的研究 [J]. *地球物理学报*, 2009, **52**(10):2419-2427
- [5] Degtyarev V I, Kharchenko I P, Potapov A S, *et al.* Qualitative estimation of magnetic storm efficiency in producing relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt using geomagnetic pulsations data [J]. *J. Adv. Space Res.*, 2009, **43**(5):829-836
- [6] Degtyarev V I, Kharchenko I P, Potapov A S, *et al.* The relation between geomagnetic pulsations and an increase in the fluxes of geosynchronous relativistic electrons during geomagnetic storms [J]. *Geomag. Aeron.*, 2010, **50**(7):885-893
- [7] Li Liuyuan, Cao Jinbin, Zhou Guocheng. Acceleration of "Seed Electrons" by whistler turbulence near the geosynchronous orbit [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(5):756-761. In Chinese (李柳元, 曹晋滨, 周国成. 地球同步轨道附近哨声湍流对“种子电子”的加速 [J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(5):756-761)
- [8] Meredith N P, Horne R B, Iles R H A, *et al.* Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:1-29
- [9] Meredith N P, Horne R B, Summers D, *et al.* Evidence for acceleration of outer zone electrons to relativistic energies by whistler mode chorus [J]. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:967-979
- [10] Xiao Fuliang, Su Zhenpeng, Zheng Huinan, *et al.* Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**:19782012
- [11] Ni B B, Zhao Z Y, Gu X D, *et al.* Resonant diffusion of radiation belt energetic electrons by field-aligned propagation whistler-mode chorus waves [J]. *J. Acta Phys. Sin.*, 2008, **57**(12):7937-7949. In Chinese (倪彬彬, 赵正予, 顾旭东, 等. 场向传播的内磁场哨声波对辐射带高能电子的共振扩散 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(12):7937-7949)
- [12] Paulikas G, Blake J. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: energetic electrons at the synchronous orbit, in Quantitative Modeling of the Magnetospheric Processes [J]. *Geophys. Monog.*, 1979, **21**:180-202
- [13] Baker D N, McPherron R L, Cayton T E, *et al.* Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 R_e [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:15133-15140
- [14] Li Xinlin, Baker D N, Temerin M D, *et al.* Are energetic electrons in the solar wind the source of the outer radiation belt [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(8):923-926