

文章编号: 2095-2163(2019)01-0183-05

中图分类号: TP311

文献标志码: A

# 外辐射带波粒相互作用的观测分析与数值模拟

金宇玥, 宁芬

(广东科技学院 计算机学院, 广东 东莞 523083)

**摘要:** 本文利用 Van Allen Probes 卫星观测数据研究了 2013 年 3 月 17 日至 18 日强磁暴期间外辐射带高能电子通量 (1.8–2.6 MeV) 的演化。观测结果显示, 在磁暴恢复期间, 高能电子通量增涨约 50–100 倍。在  $L = 4.1$  的附近, Van Allen Probes 同步观测到高强度的合声波。本文基于高斯分布的哨声波谱密度分布和偶极子背景磁场模型, 计算了弹跳平均电子共振扩散系数, 并通过求解 Fokker-Planck 扩散方程对高能电子相空间密度的演化过程进行了估算。数值计算结果表明, 观测到的合声波能够与辐射带高能电子产生回旋共振作用, 有效地加速高能电子。本文的观测和模拟结果为合声波加速竞争机制引起的辐射带高能电子演化过程提供了一定依据。

**关键词:** 相对论电子; 辐射带; 哨声波合声模; 波粒相互作用

## Observation analysis and numerical simulation of wave-particle interaction in the outer radiation belt

JIN Yuyue, NING Fen

(School of Computing, Guangdong University of Science &amp; Technology, Dongguan Guangdong 523083, China)

**[Abstract]** The paper studies the evolution of relativistic electron fluxes (1.8–2.6 MeV) in the outer radiation belt during the strong geomagnetic storm on March 17 to 18, 2013 using Van Allen Probes observations. The relativistic electron flux increased by 50–100 times during the recovery phase, and Van Allen Probes simultaneously observed intensified chorus waves at  $L = 4.1$ . The research calculates the bounce-averaged resonant electron diffusion coefficients with Gaussian distributions and a dipole geomagnetic field model, then estimates the evolution of relativistic electron phase space density through Fokker-Planck diffusion equation solution. The numerical simulations indicate that the observed chorus waves could accelerate the high-energy electrons with gyro-resonance interaction. The present observation and modeling results provide a further evidence for the competing mechanisms of chorus-driven acceleration contributing to the relativistic electron evolution in the outer radiation belt.

**[Key words]** relativistic electrons; radiation belts; whistler mode chorus; wave-particle interaction

### 1 背景研究

在地磁活动期间, 地球外辐射带中的相对论性电子 ( $\geq 1$  MeV) 的通量和投掷角分布的变化范围比较广泛。如此剧烈的波动与多种物理机制密切相关, 其中包括电子加速、沉降以及输运的过程。目前主要存在以下 3 种典型粒子的投掷角分布: 常规型 (电子通量峰值分布在  $90^\circ$  左右)、平顶型 (大角度各向同性的) 以及蝴蝶型 (最小值分布在  $90^\circ$  左右)。波粒相互作用是一种可以在不同波模与地球辐射带间相互高效转换能量的机制, 其中以频率低于电子回旋频率  $f_{ce}$  的合声波最为显著, 这种合声波可以有效地加速电子, 将电子转移至高投掷角区域<sup>[1–8]</sup>, 而等离子层嘶声波和电磁离子回旋波可以将高能电子散射到低投掷角区域甚至是损失锥区域, 造成了电子的沉降损失。

最新的研究表明, 哨声波能有效影响地球辐射带区域高能电子动力学演化过程。合声模可以产生外辐射带区域高能电子的随机加速, 但这些都缺乏卫星观测数据的支持。而数据基本上在 NASA 的 Van Allen 探测器 2012 年升空后才能得到<sup>[9]</sup>。

本文主要通过磁暴期间范艾伦探测器 (Van Allen Probes) 对外辐射带高能电子通量的演化及合声波强度变化的观测, 将探测器记录的地球外辐射带的背景等离子体参数与合声波的活动表现对观测数据进行了初步数值模拟。最后, 根据探测器观测到的合声波活动数据进行对比和验证, 来论证其是否能够与高能粒子发生回旋共振作用, 并根据以上数据来进行分析, 得出在磁暴期间合声波的活动情况对地球辐射带区域高能电子通量的影响。

### 2 相关范艾伦卫星观测数据

范艾伦探测器的近地点高度在 500~675 km 范

**作者简介:** 金宇玥 (1991–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 场与物质的作用。

**收稿日期:** 2018-11-15

围内,远地点高度在 30 050~31 250 km 之间。本文主要是使用 EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) 仪器测量空间波动磁场数据。EMFISIS 仪器的宽带接收器 (WFR) 能提供范围在 10 Hz~12 KHz 之间的波动功率谱密度信息,通过奇异值分解而计算得出空间等离子体波的传播角和椭圆极化率;高频接收器 (HFR) 能提供 10 Hz~400 KHz 的波动电场数据,可

以分辨上混杂波频率的大小,从而可以通过计算得到探测器所在位置的电子密度。

图 1 给出了范艾伦探测器 B 观测到的 2013 年 3 月 17 日等离子体层合声的示例图。图中绘制出了 00:00~24:00 UT 时间段内 EMFISIS 装置探测到合声波磁场和电场的波谱强度、波传播角  $\theta$ 、以及椭圆极化率等相关信息。观测到的合声波传播角  $\theta \approx 20^\circ\text{--}60^\circ$ , 波动具有右旋偏振特征,其椭圆极化率  $\approx 1^{[10]}$ 。

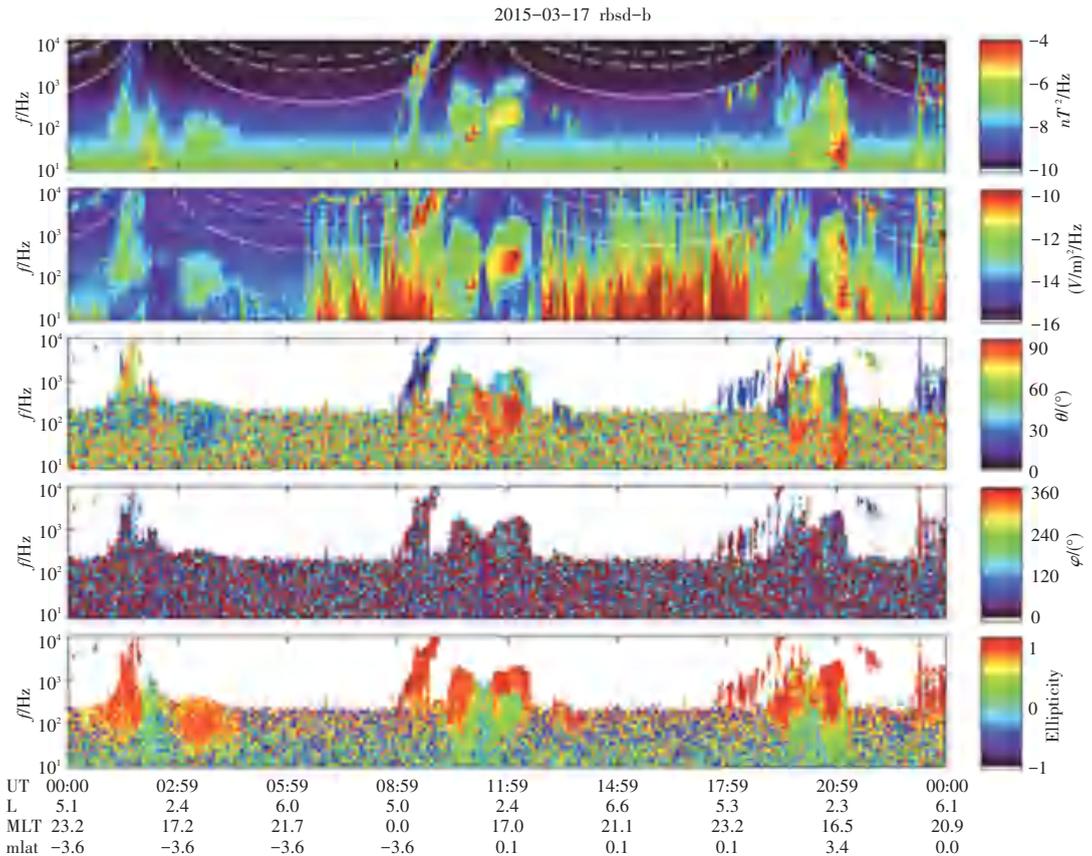


图 1 2013 年 3 月 17 日范艾伦探测器-B 观测到的合声相关波谱数据

Fig. 1 Van Allen Probe-B observation data, March 17, 2013

图 2 是范艾伦探测 B 观测 2013 年 3 月 17 日 21:55~3 月 18 日 03:50 这 6 h 电子通量的演化。可

以看到高能电子(1.8~3.4MeV)的通量增长了一到 2 个数量级。

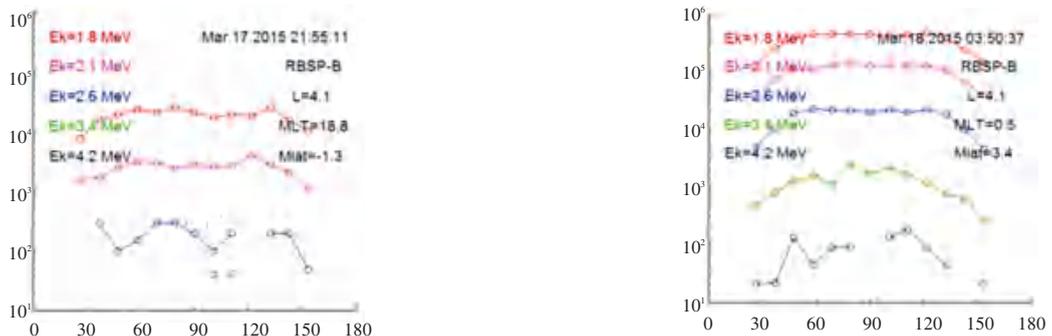


图 2 2013 年 3 月 17 日 21:55~3 月 18 日 03:50 这 6 h 电子通量的演化

Fig. 2 Observed evolution of the relativistic electron fluxes

### 3 数值模拟

等离子体波与静止质量电子相互作用, 然后产生回旋共振作用, 通过 Fokker-Planck 扩散方程, 其电子分布函数  $f_i$  的时间演化可以量化如下<sup>[7,11]</sup>:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{Gp} \frac{\partial}{\partial \alpha_e} \left\langle \frac{\partial}{\partial p} G_{\alpha\alpha} \right\rangle \frac{1}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_e} + \langle D_{\alpha p} \rangle \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial p} \left\langle \frac{\partial}{\partial \alpha_e} D_{p\alpha} \right\rangle \frac{1}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_e} + \langle D_{pp} \rangle \frac{\partial f}{\partial p} \quad (1)$$

其中,  $p$  表示电子相对论动量;  $G = p^2 T(\alpha_e) \sin \alpha_e \cos \alpha_e$ ;  $\alpha_e$  是赤道投掷角;  $T$  表示归一化的弹跳时间  $T = 1.30 - 0.56 \sin \alpha_e$ ;  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  表示投掷角弹跳平均扩散系数;  $\langle D_{pp} \rangle$  表示动量弹跳平均扩散系数;  $\langle D_{\alpha p} \rangle = \langle D_{p\alpha} \rangle$  是投掷角-动量交叉弹跳平均扩散系数。在偶极地磁场中, 可以由相应的局地扩散系数沿磁力线积分平均得到。

等离子体波的分布函数通常假定为高斯分布函数<sup>[12-15]</sup>:

$$B_f^2 = \frac{2B_t^2}{\sqrt{\pi} \delta f} \exp\left\{-\frac{(f - f_m)^2}{(\delta f)^2}\right\} + \text{erf}\left\{\frac{f - f_1}{\delta f}\right\} - \text{erf}\left\{\frac{f - f_2}{\delta f}\right\} \quad (2)$$

其中,  $B_f^2$  是合声波谱密度单位 (特斯拉); erf 是误差函数;  $f_m$  表示峰值频率;  $\delta f$  表示频谱半宽;  $f_1$  和  $f_2$  分别表示频率的下限和上限。根据观测数据, 通过进行高斯分布拟合选取的合声波分布参数与背景等离子体参数如图 3 所示。

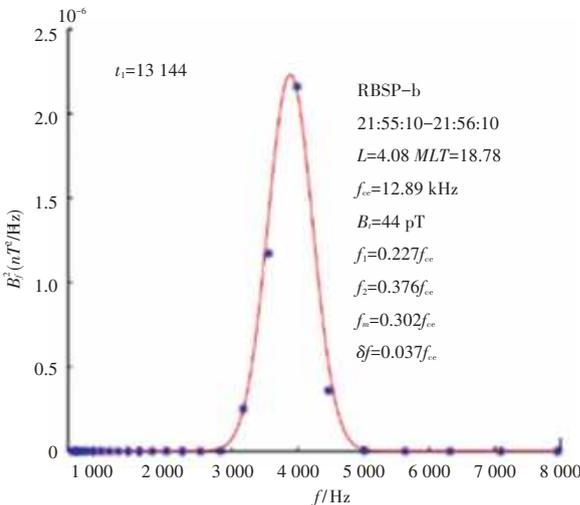


图 3 波谱高斯拟合

Fig. 3 The Gaussian distribution

同样, 波法向角分布也服从高斯分布函数, 如式 (3) 所示:

$$g(X) \propto \begin{cases} \exp[-(X - X_M)/X_\omega]^2, & X_1 < X < X_2; \\ 0 & \text{其它,} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $X = \tan \theta$  ( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ,  $X_{1,2} = \tan \theta_{1,2}$ );  $\theta$  是波矢与地球背景磁场的夹角;  $X_\omega$  为频谱半宽;  $X_M$  是峰值位置<sup>[7,11]</sup>。

夜侧合声波纬度分布为  $|\lambda| \leq 15^\circ$ , 根据图 3, 在外辐射带核心区  $L = 4.0$ ; 波谱参数为  $B_t = 44 \text{ pT}$ ;  $f_1 = 0.23 |\Omega e|$ ;  $f_2 = 0.38 |\Omega e|$ ;  $\delta f = 0.04 |\Omega e|$ ;  $f_m = 0.3 |\Omega e|$ ;  $X_M = 0$ ;  $X_\omega = 0.577$ ;  $X_1 = 0$ ;  $X_2 = 1$ , 谐波共振阶数取  $n = 0, \dots, \pm 5$ 。

假设辐射带电子的初始相空间密度满足 Kappa 类型的分布函数<sup>[16-18]</sup>:

$$f_i^0(\rho, \sin \alpha_\lambda) = C \frac{\rho \sin \alpha_\lambda}{\theta_k} \left[ \frac{\rho}{\kappa \theta_k} \right]^{-(\kappa+l+1)} \quad (4)$$

$$C = \frac{n_h \Gamma(\kappa + l + 1)}{\pi^{3/2} \theta_k^{3/2} \kappa^{(l+3/2)} \Gamma(l + 1) \Gamma(\kappa - 1/2)} \quad (5)$$

其中,  $n_h$  为能量电子的数密度;  $l$  表示损失锥指数;  $\Gamma$  为伽马函数;  $\kappa$  和  $\theta_k^2$  是通过电子静止质量  $m_e c^2$  ( $\sim 0.5 \text{ MeV}$ ) 能量量化的谱指数和有效热指数。根据观测数据, 对初始分布进行拟合, 本文取  $\theta_k^2 = 0.15$ ;  $l = 0.25$ ;  $\kappa = 7$ 。假设电子进入损失锥之后迅速沉降, 并沉降进入了大气层, 在投掷角处取边界条件  $f(\alpha = \alpha_L) = 0$  时, 其中  $\alpha_L$  为相应磁壳的损失锥角, 在  $\alpha = 90^\circ$  处, 取对称的边界条件,  $\partial f_i / \partial \alpha = 0$ 。

在  $(\alpha_e, E_k)$  空间内取计算区域  $[0, 90] \times [0.2 \text{ MeV}, 10.0 \text{ MeV}]$ , 在  $(\alpha_e, \zeta)$  空间内均匀划分  $101 \times 101$  网格, 取时间步长  $t = 1 \text{ s}$ 。绘图区域限制在  $[0, 90] \times [0.2 \text{ MeV}, 5.0 \text{ MeV}]$  能够更清晰地看到  $\sim \text{MeV}$  电子的演化特征。

计算得到的夜侧合声波驱动的扩散系数在  $(\alpha_e, \zeta)$  二维空间内的分布如图 4 所示。图 4(a) 为投掷角弹跳平均扩散系数、图 4(b) 为动量弹跳平均扩散系数、图 4(c) 为交叉弹跳平均扩散系数, 图 4(d) 为交叉弹跳平均扩散系数的符号。

夜侧合声波的纬度分布非常小 ( $\lambda \leq 15^\circ$ ), 但是却和高投掷角的电子共振作用明显, 对应的扩散系数的峰值也在高投掷角处, 扩散系数在小投掷角处几乎为零。

由于高能电子会周期性地通过各个波模的分布区域, 沿着近圆形的轨道环绕地球并同时旋转。所以, 假设夜侧合声波占 40% 的漂移轨道区域, 把漂

移平均之后的扩散系数代入到扩散方程(4)中,得到电子相空间密度 $f$ 和微分通量 $j = \rho^2 f$ 随时间的演化。又因为电子会沿着磁力线的方向在南北两半球的2个磁镜点之间做往返的弹跳运动,根据镜像的对称性,把结果扩展到 $90^\circ$ 到 $180^\circ$ 。通过完整地扩散方程求解,可以得到,夜侧合声波对电子具有显著的加速作用。如图5所示,在6 h内,1.8、2.1 MeV的电子通量与之前相比能够在高投掷角区域附近上升了大约1到2个数量级,2.6 MeV的电子通量则增大了大约1个数量级左右。

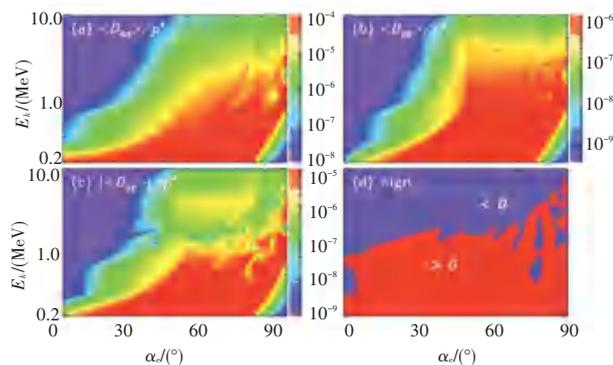


图4 二维扩散系数

Fig. 4 The diffusion coefficient

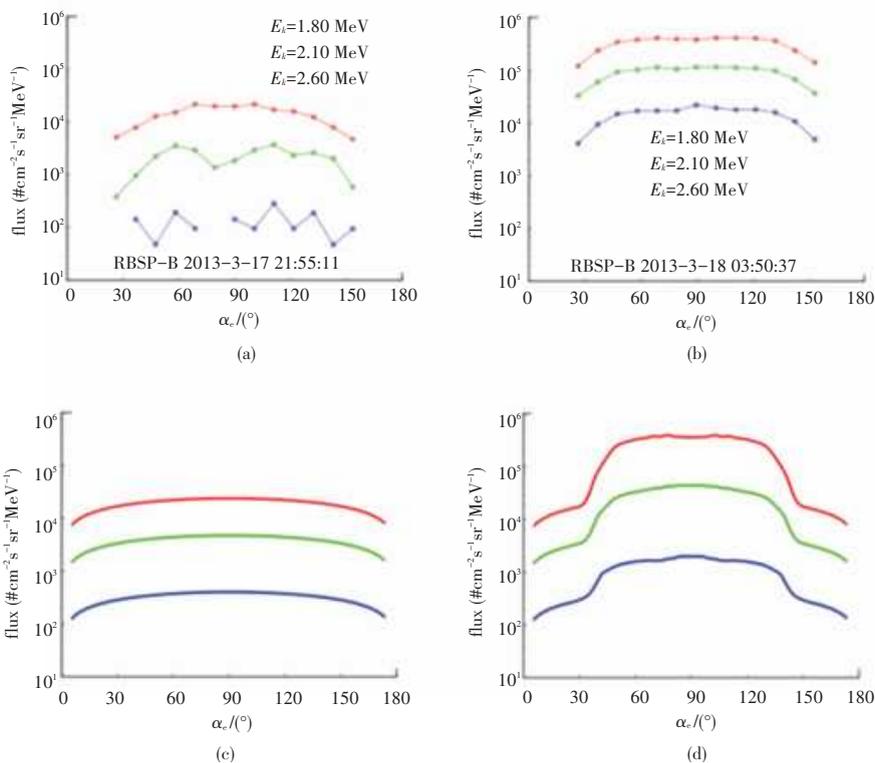


图5 模拟与观测的对比

Fig. 5 Comparison of simulation results with observations

## 4 结束语

辐射带演变的重要机制被广泛认为是由高能电子与合声波所产生的回旋共振作用。本文基于有着高斯分布特性的哨声波谱密度分布和偶极子背景磁场模型,对路径平均共振扩散系数进行计算,基于求解Fokker-Planck扩散方程的结果,对高能电子相空间密度的演化过程进行估算,然后根据观测和模拟的对比,得到如下结论:

(1)在磁暴发生后, $L = 3.8-6$ 附近,夜侧合声

波能够有效地加速特别是在大投掷角区域的辐射带电子,捕获在磁赤道附近1.8 MeV、2.1 MeV电子通量与之前相比能够在6 h内增长1到2个数量级,2.6 MeV电子通量大约增长了1个数量级。

(2)夜侧合声波主要集中于低纬度区,与低投掷角的电子共振作用相对较小,与高投掷角的电子共振作用较大,其驱动扩散系数的最大值位于高投掷角处,在接近 $90^\circ$ 附近呈正态分布。

(3)在投掷角大于 $45^\circ$ 范围内,夜侧合声波驱动的高能电子的电子通量呈现最显著的增长。通过数

值模拟得到的计算结果证明, 观测到的夜侧合声波可以和辐射带高能电子产生回旋共振作用, 夜侧合声波对高投掷角区域的高能电子的加速作用明显, 高能电子通量增加幅度和分布函数形状也与观测数据相吻合。本文的观测结果和模拟分析结果为合声波加速这种竞争机制所引起的辐射带高能电子演化提供了进一步证据。

## 参考文献

- [1] LI Liuyuan, CAO Jinbin, ZHOU Guocheng. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110; A03203.
- [2] SUMMERS D, THORNE R M, XIAO Fuliang. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere[J]. *J. Geophys. Res.* 1998, 103 (A9): 20487-20500.
- [3] SUMMERS D, MA C, MEREDITH N P, et al. Model of the energization of outer-zone electrons by whistler-mode chorus during the October 9, 1990 geomagnetic storm[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(24): 2174-2197.
- [4] HORNE R B, THORNE R M, GLAUERT S A, et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110; A03225.
- [5] TAO Xin, CHAN A A, ALBERT J M, et al. Stochastic modeling of multi-dimensional diffusion in the radiation belts [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113; A07212.
- [6] THORNE R M, LI W, NN B B. et al. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus[J]. *Nature*, 2013, 504, : 411-414.
- [7] XIAO Fuliang, SU Zhenpeng, ZHENG Huinan, et al. 2009. Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114; A03201.
- [8] XIAO Fuliang, SU Zhenpeng, ZHENG Huinan, et al. Three-

- dimensional simulations of outer radiation belt electron dynamics including cross-diffusion terms[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115; A05216.
- [9] MAUK B H, FOX N J, KANEKAL S G. et al. Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Sci. Rev.*, 2012, 179(1/2/34): 3-27.
- [10] TSURUTANI B T, VERKHOGLYADOVA O P, LAKHINA G S, et al. Properties of dayside outer zone chorus during HILDCAA events: Loss of energetic electrons[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114; A03207.
- [11] 苏振鹏. 电子辐射带形成和演化的全球动力学模型[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [12] LYONS L R, THORNE R M, KENNEL C F. Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77(19): 3455-3474.
- [13] SU Zhenpeng, ZHENG Huinan, WANG Shui. Dynamic evolution of energetic outer zone electrons due to whistler-mode chorus based on a realistic density model[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114; A07201.
- [14] THORNE R M, O' BRIEN T P, SHPRITS Y Y, et al. Timescale for MeV electron microburst loss during geomagnetic storms[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110; A09202.
- [15] GLAUERT S A, HORNE R B. Calculation of pitch angle and energy diffusion coefficients with the PADIE code[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110; A04206.
- [16] VASYLIUNAS V M. A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with ogo 1 and ogo 3[J]. *J. Geophys. Res.* 1968, 73(9): 2839-2884.
- [17] VIÑAS A F, MACE R L, BENSON R F. Dispersion characteristics for plasma resonances of Maxwellian and kappa distribution plasmas and their comparisons to the IMAGE/RPI observations[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110; A06202.
- [18] XIAO Fuliang, SHEN Chenglong, WANG Yuming, et al. Energetic electron distributions fitted with a relativistic kappa-type function at geosynchronous orbit[J]. *J. Geophys. Res.* 2008, 113; A05203.

(上接第 182 页)

## 参考文献

- [1] 杨创华. 对即时通讯软件业的现状和发展探究[J]. *科研*, 2016 (4): 00307.
- [2] 苏日娜. WEB2.0 背景下政府对微博客舆论的应对与应用策略研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [3] 彭建芬, 周亚建, 王枬, 等. TCP 流量早期识别方法[J]. *应用科学学报*, 2011, 29(1): 73-77.
- [4] 周荫清. 信息理论基础[M]. 4 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [5] GAIKWAD D P, THOOL R C. Intrusion detection system using

- bagging ensemble method of machine learning[C]// International Conference on Computing Communication Control and Automation. Pune, India; IEEE, 2015: 291-295.
- [6] ZHU Ji, ROSSET S, ZOU Hui, et al. Multi-class AdaBoost[J]. *Statistics & Its Interface*, 2009, 2(3): 349-360.
- [7] 郭山清, 高丛, 姚建, 等. 基于改进的随机森林算法的入侵检测模型(英文)[J]. *软件学报*, 2005, 16(8): 1490-1498.
- [8] CHEUNG T Y. Petri nets for protocol engineering[J]. *Computer Communications*, 1996, 19(14): 1250-1257.
- [9] 刘进锋, 郭雷. CPU 与 GPU 上几种矩阵乘法的比较与分析[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(19): 9-11, 23.