

YUE Jiaxu, ZHAO Hui, YANG Chang, ZHANG Sai. Rapid Evolution of the Relativistic Electron Pitch Angle Distributions Caused by Chorus in the Earth's Outer Radiation Belt (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(5): 1188–1196. CSTR:32142.14.cjss.2024-0187. DOI:10.11728/cjss2025.05.2024-0187

合声波引起的外辐射带相对论电子 投掷角分布快速演化*

岳佳旭 赵 晖 杨 昶 张 赛

(长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410004)

摘 要 投掷角是带电粒子运动方向与背景磁场的夹角, 研究电子投掷角分布对于理解地球辐射带动力学演化具有重要意义. 本文利用范艾伦探针数据, 对 2016 年 9 月 7 日 15:19–15:49 UT 期间发生的一次外辐射带相对论电子投掷角分布演化事例进行了详细分析. 卫星在此期间运行于远地点附近, 轨道速度较慢, 空间位置变化很小, 基本保持在 $L \approx 5.8$, $MLT \approx 2$, $Mlat \approx 1.7^\circ$ 附近, 因此可以忽略位置变化对观测结果的影响. 卫星数据显示相对论电子的投掷角分布在 30 min 内从蝴蝶型分布逐步转变为平顶型分布, 且该区域存在强的哨声模合声波. 数值模拟结果表明哨声模合声波对高能电子的扩散作用是导致该事件中电子投掷角分布转变的主要物理机制. 本文研究进一步证明了合声波对于辐射带演化的重要意义.

关键词 地球辐射带, 相对论电子, 哨声模合声波, 波粒相互作用, 投掷角分布

中图分类号 P354

Rapid Evolution of the Relativistic Electron Pitch Angle Distributions Caused by Chorus in the Earth's Outer Radiation Belt

YUE Jiaxu ZHAO Hui YANG Chang ZHANG Sai

(School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004)

Abstract The pitch angle, defined as the angle between a charged particle's velocity vector and the ambient magnetic field, is a key parameter that governs the particle's motion within the magnetic field. In Earth's outer radiation belt, energetic electrons display diverse Pitch Angle Distribution (PAD) patterns. These patterns are influenced by various factors and frequently undergo changes, typically occurring over timescales ranging from several hours to several days. Investigating electron PAD variations and uncovering the underlying physical mechanisms are of significant importance for understanding the dynamic evolution of the Earth's outer radiation belt. This paper utilizes Van Allen Probe-B data to

* 国家自然科学基金项目 (42374215) 和湖南省教育厅资助科研项目 (21A0212) 共同资助

2024-12-16 收到原稿, 2025-03-18 收到修定稿

conduct a detailed analysis of the evolution of relativistic electron PADs in the outer radiation belt during an event that occurred from 15:19 UT to 15:49 UT on 7 September 2016. During this period, the satellite was operating near its apogee, with a slow orbital speed and minimal changes in spatial position, remaining approximately at the location $L \approx 5.8$, $MLT \approx 2$ and $Mlat \approx 1.7^\circ$. As a result, the impact of positional changes on the observational results can be considered negligible. Satellite observations revealed that relativistic ($E_k \geq 1$ MeV) electron PADs transitioned from butterfly patterns to flat-top patterns during this period, within a timescale of only 30 minutes, which is significantly shorter than previously reported cases. Concurrently, intense whistler-mode chorus waves were detected in this region. Based on observational data, we calculated the chorus-driven diffusion coefficients of relativistic electrons. We then simulated the evolution of electron PADs by solving a Fokker-Planck equation. The simulation results indicate that the diffusion driven by whistler-mode chorus waves is the primary physical mechanism responsible for the transformation of the electron PADs during this event. The research presented in this paper further demonstrates the significant role of chorus waves in the evolution of the radiation belts.

Key words Earth's radiation belts, Relativistic electrons, Whistler-mode chorus waves, Wave-particle interactions, Pitch angle distributions

0 引言

范艾伦辐射带由被地球磁场捕获的高能带电粒子组成, 分为内外两个带, 中间被高能粒子通量很低的槽区所分隔. 内辐射带位于 $L \approx 1.1 \sim 2.0$ (L 为磁壳数) 的区域, 主要粒子成分为 $1 \sim 100$ MeV 的高能质子和高能电子, 其通量相对稳定. 外辐射带位于 $L \approx 3 \sim 8$ 的区域, 其主要成分是能量为数百 keV 至几 MeV 的高能电子^[1]. 与内辐射带相比, 外辐射带呈现出高度动态的特征, 受地磁活动等条件影响, 高能电子通量常发生快速变化, 其时间尺度一般为数小时至数天^[2-5].

投掷角为带电粒子运动方向与背景磁场的夹角, 是决定粒子动力学演化的一个重要参数. 地球磁层中的电子投掷角分布具有三种类型: 电子通量峰值位于投掷角 $\alpha=90^\circ$ 附近的高斯型分布, 一定投掷角范围内通量接近各向同性的平顶型分布, 通量在投掷角 $\alpha=90^\circ$ 附近有最小值的蝴蝶型分布^[6,7]. 对于电子投掷角分布演化的物理机制, 目前已提出的理论包括漂移壳分裂以及磁层顶阴影效应^[8,9]、径向扩散^[10,11]、地面对流^[12]、波粒相互作用等^[13-15].

哨声模合声波作为磁层中一种常见的等离子体波在电子投掷角分布演化中发挥了重要作用. 合声波是一种右旋圆偏振电磁波, 其典型频率在 $(0.1 \sim 0.8) f_{ce}$ 之间, f_{ce} 为赤道电子回旋频率. 通常以 $0.5 f_{ce}$ 为边界将其为上带合声波和下带合声波^[16], 也有研

究表明, 部分合声波频率可能低于 $0.1 f_{ce}$ ^[17]. 合声波一般被认为是亚暴期间由等离子体片注入内磁层的具有温度各向异性的能量电子 ($10 \sim 100$ keV) 通过回旋共振激发的. 在地磁扰动期间, 合声波主要出现在等离子体层顶以外, 其源区位于赤道附近^[18]. 统计研究表明, 夜侧合声波在 $3 < L < 7$ 范围较强, 且在午夜前到黎明侧达到峰值^[19], 而日侧合声波在 $7 < L < 8$ 范围较强, 且在黎明侧到午前侧达到峰值^[19]. 统计结果表明, 夜侧合声波大多出现在 $\lambda \leq \pm 15^\circ$ 的范围内, 而日侧合声波则可以传播到更高的纬度范围^[20-22]. 一方面, 合声波可以通过随机加速作用将能量为百 keV 级的电子加速至 1 MeV 以上, 这是辐射带高能电子产生的重要机制之一^[23,24]; 另一方面, 合声波可以通过投掷角扩散作用将电子散射至损失锥中, 使电子沉降到中高纬度大气而损失^[25].

合声波对于外辐射带高能电子投掷角分布有着复杂而深刻的影响. 合声波可通过加速大投掷角 (90° 附近) 的电子, 使投掷角分布由蝴蝶型转变为高斯型^[26], 也可能通过加速中等投掷角范围的电子, 使投掷角分布由高斯型逐渐转变为平顶型^[27] 或蝴蝶型^[28]. 合声波也可能与其他等离子体波同时存在并共同对电子分布产生影响, 例如合声波与磁声波的共同加速作用可以使电子投掷角分布由平顶型转变为蝴蝶型^[13].

在以往研究中, 合声波引起辐射带电子投掷角分布演化的时间尺度一般为数小时至数天, 本文利用范

艾伦卫星数据, 观察了一个辐射带相对论 ($E_k \geq 1$ MeV) 电子投掷角分布快速演化的事件, 其时间尺度为 30 min. 另外, 由于该事件中卫星运行于远地点附近, 其轨道速度较低, 在 30 min 内位置变化很小 ($L=5.82 \sim 5.75$, $MLT=2.0 \sim 2.3$, $Mlat=1.6^\circ \sim 1.8^\circ$), 可近似认为不变, 因此本文的观测可视为对固定空间位置电子投掷角分布演化的连续观测, 这是过去的研究未曾报道的. 除了利用卫星数据观测电子投掷角分布之外, 还观察到强的合声波存在于外辐射带区域. 数值模拟表明合声波是引起该事件中电子投掷角分布演化的主导机制.

1 观测结果

图 1 给出的是 2016 年 7 月 9 日 13:00–18:00 UT 的地磁指数 SYM- H 及范艾伦探针卫星观测的等离子波. 图 1(a) 显示这段时间 SYM- H 最小值为 -22 nT, 地磁活动较为平静. 由图 1 (b)(c) 可见这段时间范艾

伦探针电场和磁场仪器套件和集成科学套件 (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science, EMFISIS)^[29] 观察到强的合声波, 尤其在 15:10–15:40 UT 期间存在强的下带合声波, 位置在夜侧 ($MLT=1.8 \sim 2.2$) 磁赤道附近 ($1.4^\circ < Mlat < 1.9^\circ$) 的外辐射带区域 ($L \approx 5.8$).

图 2 显示 Probe-B 上搭载的磁电子粒子谱仪 (Magnetic Electron Ion Spectrometer, MagEIS)^[30] 和相对论电子质子望远镜 (Relativistic Electron Proton Telescope, REPT)^[31] 在 15:19–15:49 UT 时间段内观测的相对论 ($1.0 \sim 2.6$ MeV) 电子微分通量. 范艾伦探测器的轨道为椭圆轨道, 其轨道参数为: 近地点高度约为 600 km, 远地点高度约为 $5.8 R_e$ (R_e 为地球半径), 倾角为 10° ^[32]. 这段时间卫星运行于远地点附近, 其轨道速度较小, 位置变化慢, 在 30 min 内的位置变化量为 $L=5.82 \sim 5.75$, $MLT=2.0 \sim 2.3$, $Mlat=1.6^\circ \sim 1.8^\circ$.

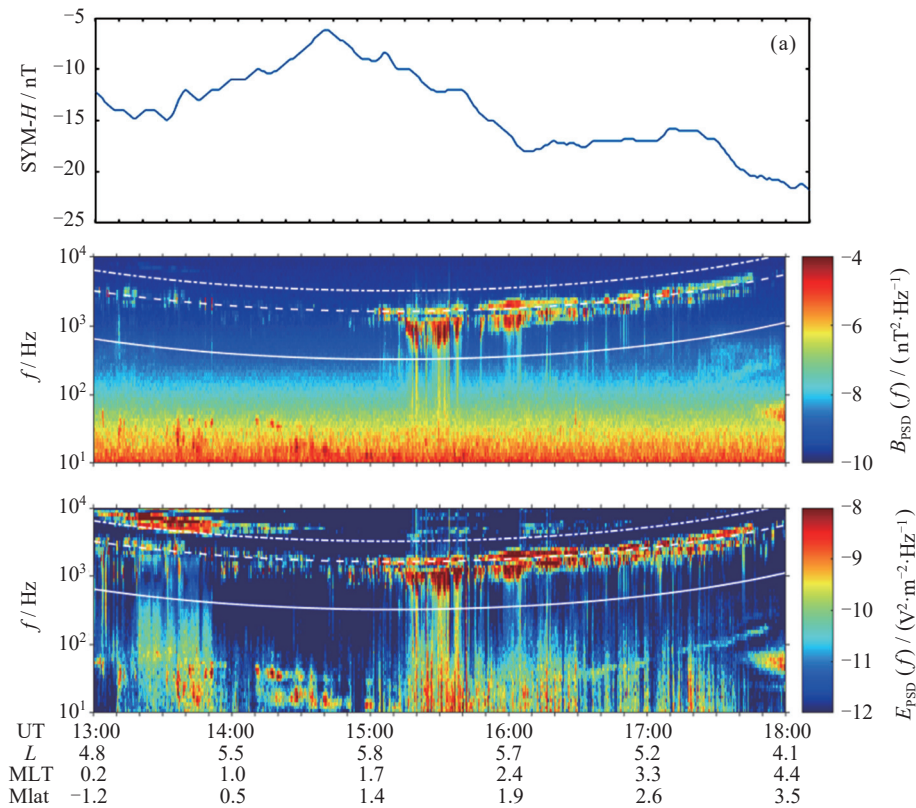


图 1 地磁活动指数 SYM- H (a), 2016 年 9 月 7 日由 Probe-B 上的 EMFISIS 测量的磁场谱 (b) 和电场谱 (c).

(b)(c) 中的点划线、虚线和白色实线分别表示电子回旋频率 $1.0 f_{ce}$, $0.5 f_{ce}$ 和 $0.1 f_{ce}$

Fig. 1 Geomagnetic activity index SYM- H (a). The magnetic field spectrum (b) and electric field spectrum (c), where the dot-dashed, dashed and solid white lines in both panels represent $1.0 f_{ce}$, $0.5 f_{ce}$ and $0.1 f_{ce}$ respectively

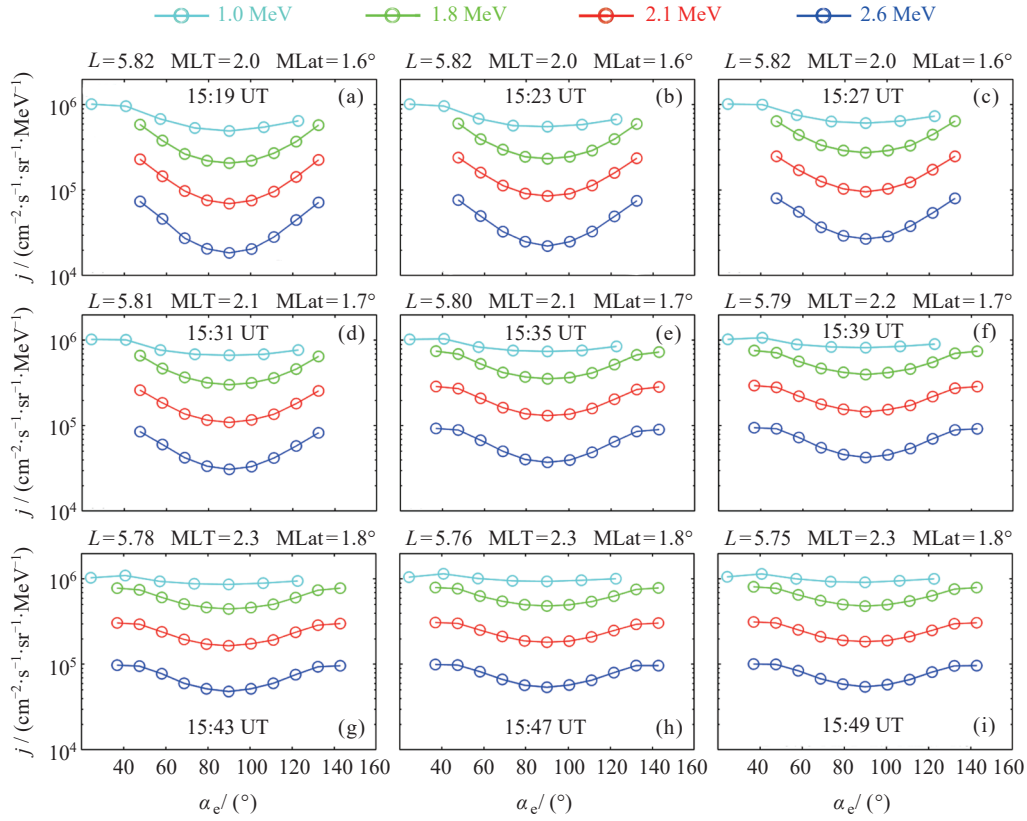


图 2 2016 年 9 月 7 日 15:19–15:49 UT 期间由 Probe-B 测量的 1.0~2.6 MeV 电子微分通量 (实验数据进行了时间尺度为 2 min 的滑动平均处理)

Fig. 2 Differential flux of 1.0~2.6 MeV electrons measured by Probe-B during 15:19–15:49 UT on 7 September 2016 (The experimental data has been processed using a 2-minute moving average)

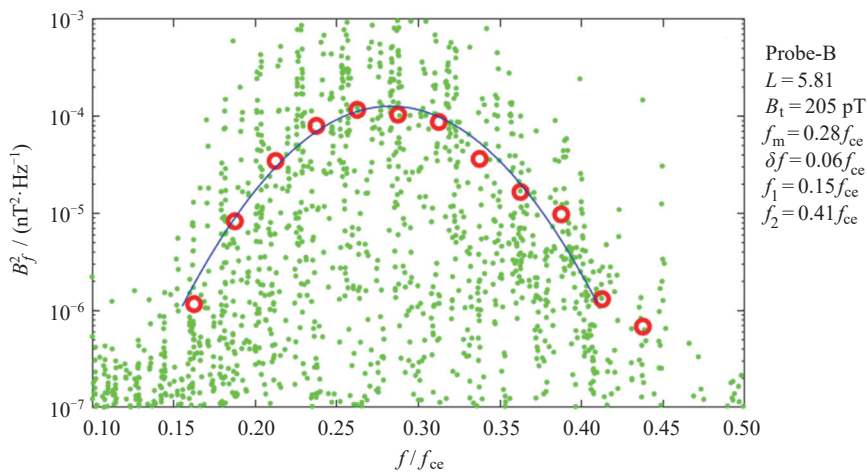


图 3 2016 年 9 月 7 日 15:19–15:49 UT 期间观测波磁场谱的高斯拟合 (绿色点表示观测到的波谱, 红色圆圈表示这个频率区间内波谱密度的平均值, 蓝线表示高斯拟合结果)

Fig. 3 Gaussian fitting of the magnetic field spectrum of the observed waves during 15:19–15:39 UT on 7 September 2016 (The green dots represent the observed wave spectra, the red circles denote the averaged spectra over each period and the blue lines show the fitting results)

图 2 以 4 min 为间隔给出了这段时间内相对论电子微分通量的连续变化. 其中, 小投掷角 ($\alpha=0^\circ$ 或 $\alpha=180^\circ$ 附近) 处电子通量变化缓慢, 而大投掷角处 ($\alpha=90^\circ$ 附近) 的电子通量发生了较快增长. 从 15:19—15:49 UT, 在 $\alpha=90^\circ$ 附近, 1.0, 1.8, 2.1, 2.6 MeV 电子通量分别提高到约原来的 1.9, 2.3, 2.7, 2.9 倍.

根据图 1 所示观测结果, 在上述时间段内, 强哨声模合声波持续存在. 合声波被认为可以通过共振作用加速辐射带电子, 使得相对论电子通量增加, 为验证合声波的作用是否为该事件中电子投掷角分布演化的主导机制, 这里进行了数值模拟研究.

2 数值模拟结果

为研究本事件中决定相对论电子演化的主要物理机制, 通过求解 Fokker-Planck 方程, 模拟合声波作用下电子微分通量的演化, 方程式如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{1}{Gp} \frac{\partial}{\partial \alpha_e} \left[G \left(\hat{D}_{\alpha\alpha} \frac{1}{p} \frac{\partial F}{\partial \alpha_e} + \hat{D}_{\alpha p} \frac{\partial F}{\partial p} \right) \right] + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial p} \left[G \left(\hat{D}_{p\alpha} \frac{1}{p} \frac{\partial F}{\partial \alpha_e} + \hat{D}_{pp} \frac{\partial F}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $T(\alpha_e) \approx (1.30 \sim 0.56) \sin \alpha_e$ 表示归一化的弹跳时间; $G=p^2 T(\alpha_e) \sin \alpha_e \cos \alpha_e$ 为赤道投掷角; $\hat{D}_{\alpha\alpha}$, $\hat{D}_{pp}$, $\hat{D}_{\alpha p} = \hat{D}_{p\alpha}$ 分别表示弹跳路径平均的投掷角、动量、交叉扩散系数, 这些扩散系数可以通过对局地扩散系数进行路径平均求出, 即

$$\hat{D}_{\alpha\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^{\lambda_m} D_{\alpha\alpha} \frac{\cos \alpha}{\cos^2 \alpha_e} \cos^7 \lambda d\lambda, \quad (2)$$

$$\hat{D}_{\alpha p} = \hat{D}_{p\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^{\lambda_m} D_{\alpha p} \frac{(1 + 3\sin^2 \lambda)^{1/4}}{\cos \alpha_e} \cos^4 \lambda d\lambda, \quad (3)$$

$$\hat{D}_{pp} = \frac{1}{T} \int_0^{\lambda_m} D_{pp} \frac{(1 + 3\sin^2 \lambda)^{1/2}}{\cos \alpha} \cos \lambda d\lambda, \quad (4)$$

其中, α 为局地投掷角, λ 和 λ_m 分别为波发生的局地纬度和最大纬度.

合声波的传播角 θ 分布假定服从一个标准的高斯函数^[33], 有

$$g(X) \propto \begin{cases} \exp[-(X - X_m)/X_w]^2; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

式中, X 表示波传播角的正切值 ($X=\tan\theta$), X_m 和 X_w 为峰值和半宽值, X_1 和 X_2 分别为 X 的上限和下

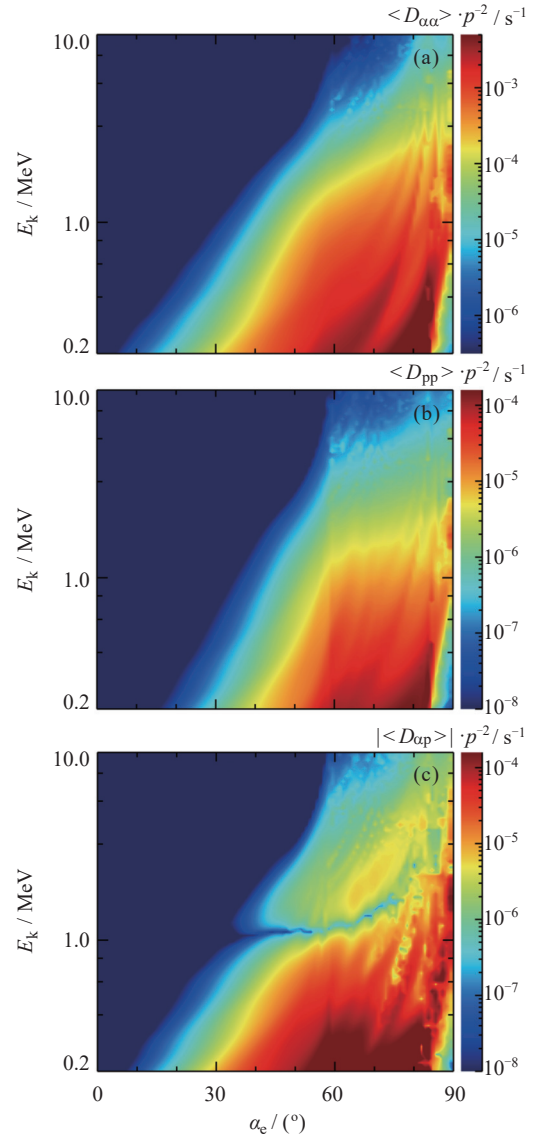


图 4 弹跳平均投掷角 (a)、动量 (b) 和交叉扩散系数 (c) 的计算结果

Fig. 4 Calculation results of the bounce-averaged pitch angle (a), momentum (b) and cross diffusion coefficients (c)

限. 参考已有研究中的设定^[31], 在此取 $X_1=0$, $X_2=1$, $X_m=0$ 和 $X_w=0.577$.

合声波的频率分布通常假定为高斯分布^[34], 即

$$B_f^2 = \begin{cases} A^2 \exp[-(f - f_m)^2 / (\delta f)^2], & f_1 \leq f \leq f_2; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (6)$$

$$A^2 = \frac{2B_t^2}{\pi^{1/2} \delta f} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{f_2 - f_m}{\delta f} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{f_m - f_1}{\delta f} \right) \right]^{-1}. \quad (7)$$

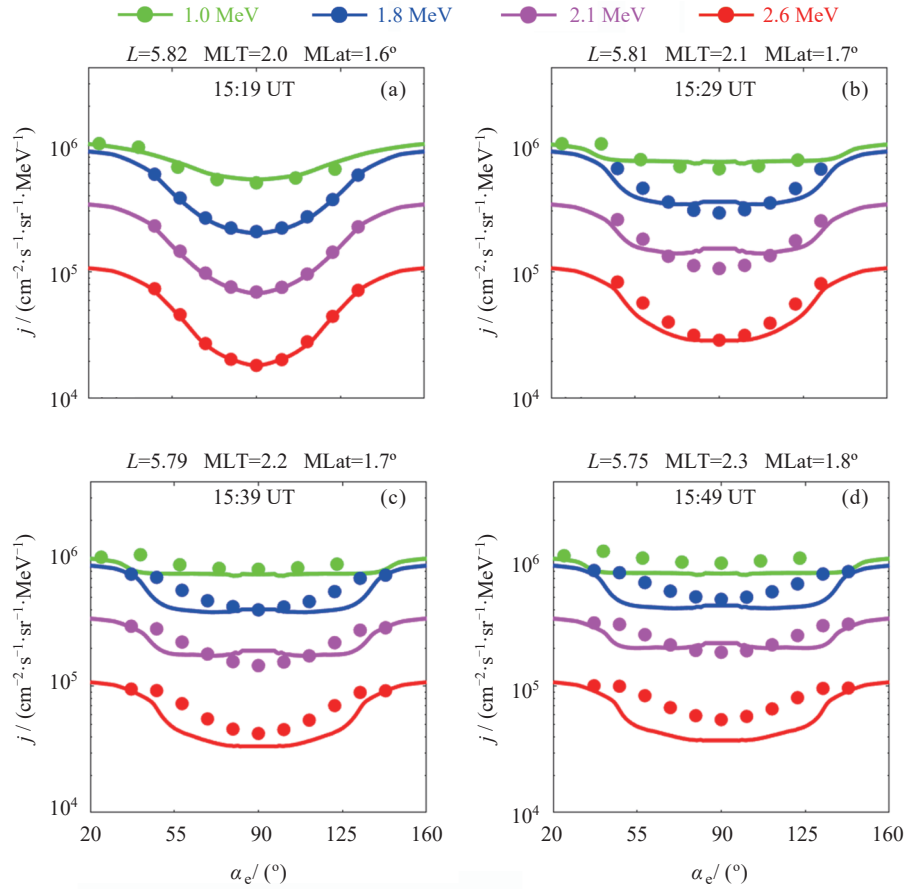


图 5 观测与模拟得到的微分通量 j 的比较. (a) 为初始状态, (b)~(d) 为每 10 min 后的观测结果 与模拟结果, 实线表示计算得到的演化结果 (实际观测数据已在 2 min 时间尺度内进行了滑动平均处理)

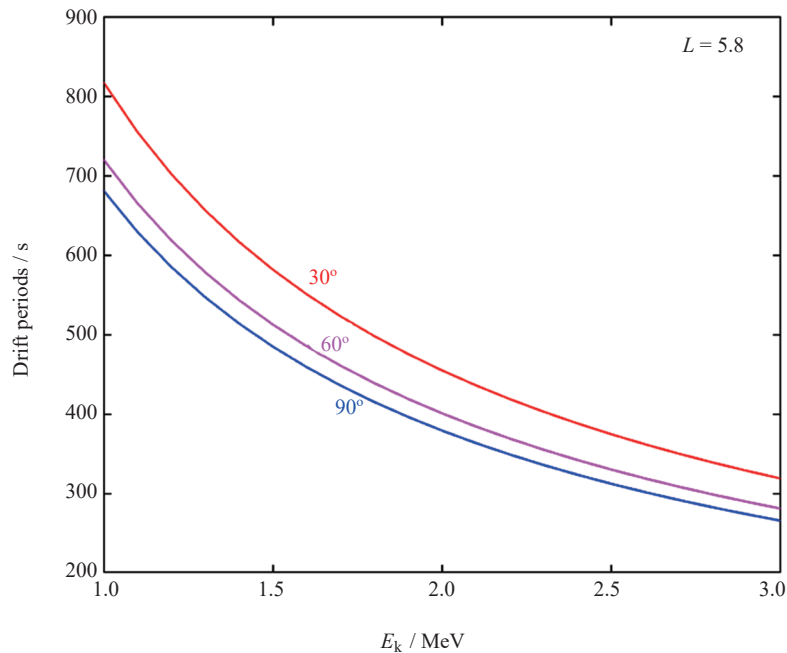
Fig. 5 Comparisons between the observed (dots) and simulated (lines) differential flux j . (a) Initial state, (b)~(d) comparison between the observed and simulated differential flux j at 10 min intervals. The green, blue, purple, and red circles represent the observed electron flux values at 1.0, 1.8, 2.1, and 2.6 MeV, respectively, while the solid lines show the calculated evolution results (The observed data have been smoothed using a 2-minute time window)

其中, $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数, A^2 为归一化参数, f_m 表示峰值频率, δf 为频谱半宽值, f_1 和 f_2 分别表示下截止频率和上截止频率.

利用上述高斯函数对 15:19–15:49 UT 卫星观测到的磁场波谱进行拟合, 如图 3 所示. 拟合得出波谱参数如下: 波幅 $B_t = 0.205$ nT, 下截止频率 $f_1 = 0.15 f_{ce}$, 上截止频率 $f_2 = 0.41 f_{ce}$, 峰值频率 $f_m = 0.28 f_{ce}$, 半宽值 $f = 0.06 f_{ce}$. 利用偶极子场模型计算得到 $L = 5.8$ 附近的赤道磁场强度 $B_e = 164$ nT, 利用经验公式^[35] 得到背景等离子体数密度 $N_e = 8.9 \text{ cm}^{-3}$. 由于合声波分布于午夜侧 ($\text{MLT} \approx 2$), 参考已有研究^[17], 假定其磁纬度范围为 $|\lambda| \leq 15^\circ$, 并取 50% 的漂移平均. 共振阶数取 $n=0, \dots, \pm 5$, 计算区域选择为 $E_k \in (0.2 \text{ MeV}, 10 \text{ MeV}) \times \alpha_e \in (0^\circ, 90^\circ)$.

利用上述各参数, 计算了合声波作用下的电子扩散系数, 如图 4 所示. 图 4 显示扩散系数在大投掷角处比在小投掷角处数值更大, 表明合声波的扩散作用在大投掷角处更高效. 图 4(b) 显示动量扩散系数在 1.0~3.0 MeV 的能量范围和 $60^\circ \sim 90^\circ$ 的投掷角范围内有较大数值 (约 10^{-5} s^{-1}), 表明合声波可以快速地加速这个范围的电子.

利用得到的扩散系数, 进一步计算了电子相空间密度随时间的演化, 并利用公式 $j = p^2 F$ 求得微分通量, 如图 5 所示. 电子初始分布来自卫星观测数据, 即 2016 年 9 月 7 日 15:19 UT 左右 (Probe-B, $L=5.8$, $\text{MLT}=2.1$, $\text{MLat}=1.7^\circ$) 的微分通量分布, 如图 5(a) 所示, 其中能量 1.8 MeV 以下和以上的电子通量观测数据分别来自 MagEIS 仪器及 REPT 仪器. 图中圆

图6 1~3 MeV 电子在 $L=5.8$ 处的漂移周期Fig. 6 Drift period of 1~3 MeV electrons at $L=5.8$

点表示卫星观测数据, 实线为插值得到的初始分布. 图 5(b)~(d) 中的实线分别表示模拟计算得到的 10, 20, 30 min 后的电子微分通量, 圆点表示对应时刻即 15:29 UT 附近 (Probe-B, $L=5.8$, $MLT=2.0$, $Mlat=1.6^\circ$), 15:39 UT 附近 (Probe-B, $L=5.8$, $MLT=2.2$, $Mlat=1.7^\circ$), 15:49 UT 附近 (Probe-B, $L=5.8$, $MLT=2.3$, $Mlat=1.8^\circ$) 的观测数据.

图 5 的模拟结果表明, 合声波可以高效地加速大投掷角区域的电子, 在约 30 min 的时间尺度内, 1.0, 1.8, 2.1, 2.6 MeV 电子通量的演化结果分别增强到约原来的 1.4, 2.1, 3.2, 2.0 倍; 而在小投掷角区域, 由于扩散系数数值很小, 电子通量几乎保持不变. 初始时刻 15:19 UT 大投掷角附近通量更低, 蝴蝶分布更明显, 对于能量较大粒子的电子通量加速更快; 同时演化结果表明, 初始时刻表现出明显的蝴蝶分布, 在 30 min 时间内大投掷角处粒子被持续加速, 由较深的蝴蝶型分布转化为较浅的蝴蝶型或接近平顶型分布.

由于本事例的时间尺度较短, 电子漂移运动的影响不可忽视. 计算了 $L=5.8$ 处 1~3 MeV 电子的漂移周期, 如图 6 所示. 对于 $E_k=1.0$ MeV、赤道投掷角 90° 的电子, 漂移周期约为 11 min, 60° 电子的漂移周期比 90° 多 39 s, 30° 比 90° 多约 2 min. 而对于 $E_k=2.6$ MeV、赤道投掷角 90° 的电子, 漂移周期约

为 5 min, 60° 电子的漂移周期比 90° 多 17 s, 30° 比 90° 多约 1 min.

由于通量增长主要发生在较大投掷角 ($>45^\circ$) 区域, 不同投掷角电子漂移周期的差异对研究的问题影响不大. 考虑到漂移所需时间, 合声波加速电子所用的实际时间比观测时间更短, 其中 1 MeV 电子加速时间约 20 min, 1.8~2.6 MeV 电子加速时间约 25 min.

3 结论

利用卫星观测和数值模拟, 研究了合声波造成的高能电子投掷角分布快速演化过程. 首次报道在同一空间位置对电子投掷角分布演化持续观测的事例, 提供了对电子投掷角分布演化的直观认识; 卫星观测证明外辐射带相对论电子投掷角分布可以在 30 min 的时间尺度内发生显著改变. 数值研究表明, 在合声波的作用下, 明显的蝴蝶型电子投掷角分布在 30 min 内会快速向平顶型电子投掷角分布转化.

参考文献

- [1] LI L Y, YANG S S, CAO J B, *et al.* Effects of solar wind plasma flow and interplanetary magnetic field on the spa-

- tial structure of earth's radiation belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(12): 10332-10344
- [2] LI L Y, CAO J B, ZHOU G C, *et al.* Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A12): A12214
- [3] YU J, LI L Y, CAO J B, *et al.* Multiple loss processes of relativistic electrons outside the heart of outer radiation belt during a storm sudden commencement[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(12): 10275-10288
- [4] SU Z P, GAO Z L, ZHU H, *et al.* Nonstorm time dropout of radiation belt electron fluxes on 24 September 2013[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 6400-6416
- [5] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al.* Ultra-low-frequency wave-driven diffusion of radiation belt relativistic electrons[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 10096
- [6] OZEKE L G, MANN I R, OLIVER L, *et al.* Statistical characteristics of energetic electron pitch angle distributions in the Van Allen Probe era: 1. Butterfly distributions with flux peaks at preferred pitch angles[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA029907
- [7] LUO Qiong, NI Binbin, CAO Xing, *et al.* An optimized identification method for radiation belt electron butterfly pitch angle distributions based on the chi-square distribution function[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, **65**(3): 809-818 (罗琼, 倪彬彬, 曹兴, 等. 基于卡方分布函数的辐射带电子蝴蝶状投掷角分布的优化判别方法 [J]. *地球物理学报*, 2022, **65**(3): 809-818)
- [8] YU J, LI L Y, CAO J B, *et al.* The influences of solar wind pressure and interplanetary magnetic field on global magnetic field and outer radiation belt electrons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(14): 7319-7327
- [9] SIBECK D G, MCENTIRE R W, LUI A T Y, *et al.* Magnetic field drift shell splitting: cause of unusual dayside particle pitch angle distributions during storms and substorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, **92**(A12): 13485-13497
- [10] LI L Y, YU J, CAO J B, *et al.* Effects of ULF waves on local and global energetic particles: particle energy and species dependences[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(11): 11007-11020
- [11] BRAUTIGAM D H, ALBERT J M. Radial diffusion analysis of outer radiation belt electrons during the October 9, 1990, magnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A1): 291-309
- [12] YUAN H C, LI L Y, YANG L, *et al.* Competing influences of earthward convection and azimuthal drift loss on the pitch angle distribution of energetic electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(7): e2024JA032534
- [13] XIAO F L, YANG C, SU Z P, *et al.* Wave-driven butterfly distribution of Van Allen belt relativistic electrons[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 8590
- [14] LI L Y, YU J, CAO J B, *et al.* Roles of whistler mode waves and magnetosonic waves in changing the outer radiation belt and the slot region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(5): 5431-5448
- [15] LI L Y, YU J, CAO J B, *et al.* Competitive influences of different plasma waves on the pitch angle distribution of energetic electrons inside and outside plasmasphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(1): e2021GL096062
- [16] YANG Lixian, LIU Si, GAO Zhonglei, *et al.* Statistical study on propagation characteristics of chorus in the earth's magnetosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 998-1005 (杨立贤, 刘斯, 高中磊, 等. 地球磁层中合声波的频率与传播角分布特征 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(6): 998-1005)
- [17] XIAO F L, LIU S, TAO X, *et al.* Generation of extremely low frequency chorus in Van Allen radiation belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(3): 3201-3211
- [18] SANTOLÍK O, GURNETT D A, PICKETT J S, *et al.* Spatio-temporal structure of storm-time chorus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A7): 1278
- [19] LI W, THORNE R M, ANGELOPOULOS V, *et al.* Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(9): L09104
- [20] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al.* Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(12): 10023-10040
- [21] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al.* Intense duskside lower band chorus waves observed by Van Allen Probes: generation and potential acceleration effect on radiation belt electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4266-4273
- [22] HU Xiong, ZHANG Xunxue. Interaction between whistler mode wave and the electrons in the magnetosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1992, **12**(4): 279-286 (胡雄, 张训械. 磁层中哨声波与电子的相互作用 [J]. *空间科学学报*, 1992, **12**(4): 279-286)
- [23] HE Tian, LIU Siqing, ZHENG Jinlei, *et al.* Study on high energy electron flux enhancement events and whistler chorus wave[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(2): 170-175 (何甜, 刘四清, 郑金磊, 等. 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[J]. *空间科学学报*, 2013, **33**(2): 170-175)
- [24] XIAO F L, SU Z P, ZHENG H N, *et al.* Three-dimensional simulations of outer radiation belt electron dynamics including cross-diffusion terms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A5): A05216
- [25] HE J B, JIN Y Y, XIAO F L, *et al.* The influence of various frequency chorus waves on electron dynamics in radiation belts[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, **64**(4): 890-897
- [26] YANG C, SU Z P, XIAO F L, *et al.* Rapid flattening of butterfly pitch angle distributions of radiation belt electrons by whistler-mode chorus[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(16): 8339-8347
- [27] YANG C, XIAO F L, HE Y H, *et al.* Storm time evolution of outer radiation belt relativistic electrons by a nearly continuous distribution of chorus[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(5): 2159-2167
- [28] JIN Y Y, YANG C, HE Y H, *et al.* Butterfly distribution of Earth's radiation belt relativistic electrons induced by dayside chorus[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(2): 212-218
- [29] KLETZING C A, BORTNIK J, HOSPODARSKY G, *et al.* The Electric and Magnetic Fields Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS): science, data, and usage best practices[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(4): 28
- [30] BLAKE J B, CARRANZA P A, CLAUDEPIERRE S G, *et al.* The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) instruments aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft[J]. *Space Science Reviews* 2013, **179**(1): 383-421
- [31] BAKER D N, KANEKAL S G, HOXIE V, *et al.* The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) investigation: design, operational properties, and science highlights[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(5): 68
- [32] MAUK B H, FOX N J, KANEKAL S G, *et al.* Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1): 3-27
- [33] XIAO F L, SU Z P, ZHENG H N, *et al.* Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A3): A03201
- [34] SUMMERS D. Quasi-linear diffusion coefficients for field-aligned electromagnetic waves with applications to the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A8): A08213
- [35] KURTH W S, DE PASCUALE S, FADEN J B, *et al.* Electron densities inferred from plasma wave spectra obtained by the waves instrument on Van Allen Probes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(2): 904-914

作者简介



岳佳旭 男, 2001年1月出生于河北省秦皇岛市, 现为长沙理工大学物理与电子科学学院硕士研究生, 主要研究方向为辐射带波-粒相互作用等。

E-mail: yuejx170514@163.com



杨昶 (通信作者) 男, 1977年7月出生于湖南省永州市, 现为长沙理工大学特聘教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地球磁层带电粒子的分布和演化、辐射带波-粒相互作用等。

E-mail: yangchang@163.com