

# 基于 CIMI 模型的高空核爆电子环向分布演化过程模拟研究\*

罗哲楷<sup>1)</sup> 孙强<sup>2)</sup> 谢伦<sup>1)</sup> 濮祖荫<sup>1)</sup> 宗秋刚<sup>1)</sup>  
刘鹰<sup>1)</sup> 周前红<sup>2)†</sup> 傅绥燕<sup>1)‡</sup>

1) (北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2024 年 9 月 8 日收到; 2025 年 1 月 4 日收到修改稿)

高空核爆过程会向内磁层注入大量相对论性电子, 形成人工辐射带, 这些高能电子可能对航天器造成显著影响。本文利用 CIMI 模型 (comprehensive inner magnetosphere-ionosphere model) 模拟研究了核爆注入的电子由局地集中分布向环向均匀分布演化的过程, 揭示了人工辐射带形成过程中电子团表现出的螺旋包围、环向膨胀与扩散均匀的行为特征。对初始时刻集中在  $L = 1.1\text{--}2.2$ 、环向覆盖 1 个时区左右的核爆电子进行的数值模拟表明, 核爆注入电子主要通过螺旋包围过程演化至环向均匀分布, 扩散作用的贡献相对较小。电子注入后, 在地球磁场的约束下做自西向东环绕地球的漂移运动。外侧电子漂移速度更快, 因此注入电子团会在环向上剪切拉伸, 以螺旋线结构包围地球。此外, 研究还发现螺旋结构的形成过程伴随有电子的环向膨胀, 主要由漂移过程中能量色散和投掷角散射机制驱动。不同能量和投掷角的电子漂移速度不同, 因此逐渐环向分离, 造成环向分布范围扩展, 填充螺旋结构的间隙。在通过形成螺旋结构与环向膨胀包围地球后, 核爆注入的高能电子进一步通过扩散作用演变为环向均匀分布的结构, 形成相对稳定的人工辐射带。

**关键词:** 高空核爆, 人工辐射带, Fokker-Planck 方程, 电子扩散

**PACS:** 94.30.Xy, 28.70.+y

**DOI:** [10.7498/aps.74.20241259](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241259)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20241259](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241259)

## 1 引言

辐射带是内磁层中相对论性高能带电粒子组成的环绕地球的结构, 在地球磁场的约束下, 带电粒子以回旋、弹跳、漂移的形式在内磁层做周期性运动, 从而被稳定捕获。辐射带主要包括内外两层可以长期稳定存在的结构。内辐射带大约处在距离地心  $1R_E\text{--}2R_E$  ( $R_E$  为地球半径) 范围内, 其中既含有高能电子也含有高能质子; 外辐射带大约处在

$3R_E\text{--}7R_E$  处, 该范围内高能质子的回旋半径较大, 难以被磁场稳定捕获, 因此外带粒子以高能电子为主。两层辐射带之间存在电子通量相对较低的槽区, 该区域的电子容易与哨声波发生波粒相互作用, 通过投掷角散射进入损失锥, 在弹跳过程中注入大气损失<sup>[1]</sup>。

地球的自然辐射带中富含高能电子, 它们主要来自地球外磁层, 能量可达百 keV 以上。这些高能电子可通过深层充电作用对人造航天器造成损害<sup>[2]</sup>, 也可能影响到宇航员的身体健康。为了研究

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12375246, 12305288, 41731068) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: [zhou\\_qianhong@qq.com](mailto:zhou_qianhong@qq.com)

‡ 通信作者. E-mail: [suiyanfu@pku.edu.cn](mailto:suiyanfu@pku.edu.cn)

辐射带的形成机制与物理性质, 美国和苏联在1958—1962年间曾进行了20余次高空核爆实验, 如 Argus(百眼巨人)系列实验<sup>[3]</sup>与 Starfish(海盘车)系列实验<sup>[4]</sup>. 观测结果表明, 人工注入内磁层的高能电子会在地球磁场的约束下沿磁力线运动、在靠近极区的镜点之间来回弹跳, 同时环绕地球持续自西向东漂移, 从而被地磁场稳定捕获. 这种通过人为注入的方式形成的高能电子结构被称为人工辐射带, 它的电子通量可以比自然辐射带高3—4个量级, 可能对运行在其中的航天器、宇航员造成比自然辐射带更为严重的损害. 因此, 研究人工辐射带的形成机制具有十分重要的科学意义.

目前已开展了许多利用数值模拟方法进行的人工辐射带研究. 西北核技术研究所结合了蒙特卡罗粒子抽样和带电粒子径迹运动模拟方法, 模拟了高空核爆炸裂变碎片、衰变 $\beta$ 电子注入人工辐射带过程, 计算得到爆后初期赤道面电子注量分布<sup>[5,6]</sup>. 武汉大学利用单粒子模拟方法计算了人工辐射带的分布特征, 分析了辐射带特征与爆点纬度、高度及当量的关系<sup>[7]</sup>. 美国洛斯阿拉莫斯(Los Alamos national laboratory, LANL)实验室开发了DREAM3D(dynamic radiation environment assimilation model three dimensional)模型<sup>[8]</sup>, 用以描述辐射带带电粒子在赤道面径向、能量、赤道投掷角等自由度上随时间的扩散过程. 美国戈达德太空飞行中心(Goddard space flight center)开发了CIMI模型(comprehensive inner magnetosphere-ionosphere model)<sup>[9]</sup>, 该模型为四维(4D)模型, 能够模拟粒子在径向与环向上的运动过程以及能量、投掷角等自由度上的扩散过程. 辐射带粒子的模拟研究能够解释人工辐射带演化的物理规律, 帮助人们进一步认识人工辐射带对人类活动的影响.

高空核爆后, 产生的高能电子最初仅分布在较小经度范围内的磁通管中, 随后逐渐演化至环向均匀分布. 目前, 关于人工辐射带的研究多集中在已达到环向均匀后的长期演化过程, 对电子从初始集中到均匀分布的演化研究得相对较少. 本文通过CIMI模型, 模拟了高能电子从环向集中分布到环向均匀分布的过程. 此过程中, 高能电子首先形成环绕地球的螺旋结构, 伴随着能量和投掷角色散造成的环向膨胀, 最终通过扩散作用达到环向均匀. 本研究揭示了人工辐射带的形成机制, 并展示了其物理性质和演化规律.

## 2 CIMI 模型

CIMI模型是一个用于模拟辐射带中带电粒子扩散过程的4D模型, 它结合了CRCM(the comprehensive ring current model)<sup>[10]</sup>与RBE(radiation belt environment)模型<sup>[11]</sup>, 能够有效地模拟出辐射带中电子、质子、O<sup>+</sup>和He<sup>+</sup>等带电粒子在径向、环向、能量、赤道投掷角等四个维度上的扩散过程. 该模型的核心原理是数值求解Fokker-Planck方程(1), 从而再现辐射带内的物理过程.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_s}{\partial t} + \langle \dot{\lambda}_i \rangle \frac{\partial f_s}{\partial \lambda_i} + \langle \dot{\phi}_i \rangle \frac{\partial f_s}{\partial \phi_i} \\ &= \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial \alpha_o} \left[ G \left( D_{\alpha_o \alpha_o} \frac{\partial f_s}{\partial \alpha_o} + D_{\alpha_o E} \frac{\partial f_s}{\partial E} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial E} \left[ G \left( D_{EE} \frac{\partial f_s}{\partial E} + D_{E\alpha_o} \frac{\partial f_s}{\partial \alpha_o} \right) \right] \\ &- v \sigma_{sH} \langle n_H \rangle f_s - \left( \frac{f_s}{0.5 \tau_b} \right)_{\text{loss-cone}}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$G = T(\alpha_o) \sin 2\alpha_o (E + E_0) \sqrt{E(E + 2E_0)}, \quad (2)$$

式中, 下标 $s$ 表示带电粒子种类;  $f_s = f_s(t, \lambda_i, \phi_i, M, K)$ 表示带电粒子在弹跳周期内的平均相空间密度;  $\lambda_i$ 表示带电粒子所在磁力线足点的磁纬, 表征与地球的径向距离, 其网格格点所对应的赤道面径向距离在内辐射带处分辨率约为0.1倍地球半径;  $\phi_i$ 表示磁地方时(magnetic local time, MLT), 网格分辨率为 $\Delta \text{MLT} = 0.5$ . 模拟过程中会先在 $(M, K)$ 空间中对方程进行求解, 然后将结果映射到 $(E, \alpha_o)$ 空间<sup>[11]</sup>, 其中 $M = p_\perp^2 / (2m_0 B)$ 为粒子的相对论磁矩,  $p_\perp$ 表示粒子的垂直动量,  $m_0$ 表示粒子的静质量;  $K = J / \sqrt{8m_0 M}$ ,  $J$ 为粒子弹跳运动对应的第二绝热不变量;  $E$ 为粒子能量;  $\alpha_o$ 为粒子弹跳至赤道面时速度与背景磁场的夹角, 即赤道投掷角;  $D_{\alpha_o \alpha_o}, D_{EE}, D_{\alpha_o E}, D_{E\alpha_o}$ 表示 $(E, \alpha_o)$ 空间中的扩散系数<sup>[12-14]</sup>. 方程(2)中 $T(\alpha_o) = \frac{1}{R_o} \int_0^{s_m} \frac{ds}{\cos(\alpha)}$ 为一项沿磁力线从赤道面到粒子弹跳镜点的积分项,  $R_o$ 为磁力线与赤道面交点到地心的距离,  $\alpha$ 为粒子在磁力线不同位置的投掷角,  $E_0$ 为粒子的静能量.

方程(1)左侧的 $\lambda_i$ 项与 $\phi_i$ 项对应着粒子在位置空间中弹跳平均后的漂移运动. 其中,  $\lambda_i$ 项表征粒子的径向漂移运动, 主要为对流电场主导的 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$

漂移;  $\phi_i$  项表征环向漂移运动, 包括  $E \times B$  漂移、梯度漂移、曲率漂移。空间中的电势参照 Weimer<sup>[15]</sup>的工作给出, 该模型会根据行星际磁场、太阳风速度、太阳风粒子数密度、地球磁倾角等参数计算出电离层中的电势分布, 进而给出内磁层电场分布。磁场模型可以设置为 T96 模型<sup>[16,17]</sup>或 TS04 模型<sup>[18,19]</sup>, 描绘受到太阳风影响的真实地球磁场。

方程(1)右侧的前两项表征了辐射带带电粒子的投掷角扩散与能量扩散, 此过程主要由内磁层中的哨声波与辐射带电子的回旋共振过程导致。哨声波是磁层中右旋圆极化的电磁波, 频率与电子的回旋频率接近, 容易与电子发生回旋共振。回旋共振的共振条件见为

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\Omega, \quad (3)$$

其中  $\omega$  为电磁波的频率,  $k_{\parallel}$  为电磁波的平行波矢,  $v_{\parallel}$  为电子的平行速度,  $\Omega$  为电子回旋频率,  $n$  为整数。满足共振条件时, 电子在回旋运动过程中会持续处在波动电场的特定相位上, 因此能与电场发生净能量交换, 相应地改变投掷角大小。给定能量与赤道投掷角的电子通过共振既可能获得能量也可能损失能量, 其方向取决于电子所处的相位, 因此当电子相空间密度在  $E-\alpha_0$  空间中分布不均匀时, 相空间密度会存在着由高密度区向低密度区的扩散。CIMI 模型采用 Albert 等<sup>[12-14]</sup>的方法计算扩散系数, 哨声波的强度参照 Meredith 等<sup>[20,21]</sup>的统计结果由地磁活动的  $K_p$  指数给出。方程(1)右侧第三项表示离子的电荷交换作用对应的损失项,  $v$  为离子速率,  $\sigma_{sH}$  为成分  $s$  与中性氢原子的碰撞截面,  $\langle n_H \rangle$  为中性氢原子的平均数密度, 由 Raider 等<sup>[22]</sup>的模型给出。方程(1)的最后一项表征损失锥中粒子寿命,  $\tau_b$  表示粒子的弹跳周期<sup>[1]</sup>。地球磁层磁力线上的磁场强度分布结构为高纬大、低纬小的磁瓶结构, 该结构对带电粒子的束缚能力有限, 当粒子的赤道投掷角过小时, 则会沿磁力线注入大气, 发生损失。粒子能被磁瓶结构稳定捕获的临界投掷角即为损失锥的角度大小, 损失锥内的粒子会在其弹跳周期的时间尺度上快速损失, 损失锥外的粒子也可能通过投掷角扩散逐渐进入损失锥, 然后发生损失。

### 3 模拟结果与讨论

本文采用模拟的方法研究高空核爆注入的高

能电子在地球辐射带内带区域由集中局地分布向环向均匀分布的演化过程。高空核爆后会产生碎片云, 裂变产物迅速衰变释放高能电子, 同时碎片云在几秒内迅速膨胀, 于内辐射带区域形成高能电子富集的抗磁腔。在几十秒的时间尺度后抗磁腔坍塌, 其内的高能粒子填充所在位置的磁通管, 在局地形成电子通量管。此时电子密度较低(约  $10^{11} \text{ m}^{-3}$  量级), 可以忽略粒子自身抗磁性对背景磁场的改变, 以及粒子碰撞对扩散的影响, 因而后续的运动扩散过程可用 Fokker-Planck 方程描述。本文利用 CIMI 模型模拟了抗磁腔完全坍塌后, 核爆形成的高能电子通量管在地球磁层背景磁场中的演化过程, 模拟使用了 2024 年 3 月 2 日至 3 月 6 日的地磁指数与太阳风参数, 背景磁场使用 TS04 模型计算。电子通量管初始分布的设置参考了 Gombosi 等<sup>[23]</sup>对 Starfish 高空核爆实验形成的人工辐射带的观测以及 Cowee 和 Winske<sup>[24]</sup>处理初始分布与环向均匀分布数量关系的方法。先给出人工辐射带电子通量随  $L$  的分布,  $L$  值表示磁通管所在磁力线与磁赤道面交点到地心的距离和地球半径的比值。然后通过磁地方时上的权重系数将其环向压缩, 得到电子通量的初始局地分布, 将其作为模拟的初始条件。之所以没有采用针对 Starfish 实验初始通量管的直接观测, 一方面是因为缺乏对通量管分布结构的精细观测, 另一方面是因为通量管的  $L$  尺度在 0.2 左右<sup>[25]</sup>, 相对模型的网格来说过小, 会引入计算误差, 也难以反映演化过程的结构特征。参考 Starfish 实验中人工辐射带在一天后的通量分布, 本文给出了一个  $L$  覆盖范围更宽的分布, 使得模拟结果能够更清晰地展示电子团在  $L$  方向上的形变特征。由于本文研究的过程中粒子对电磁场的影响与电子之间的相互影响可以忽略, 通量大小的差异不会影响粒子本身的运动特征, 因而我们的模拟可以反映不同初始条件下电子团演化的共性特征。图 1(a)展示了设置的注入电子形成人工辐射带后的总通量在  $L$  上的分布, 通量峰值在  $L \approx 1.6$ 。初始时刻电子在赤道面环向方向上集中分布, Starfish 实验中由抗磁腔在水平方向膨胀的最大宽度<sup>[26]</sup>可以估算通量管 MLT 跨度为 0.5 左右。本文假定初始时刻通量环向分布权重系数为

$$w(\phi) = w_0 \exp \left\{ - \left[ \frac{\cos(\phi + \pi/2) - 1}{0.01} \right]^2 \right\}, \quad (4)$$

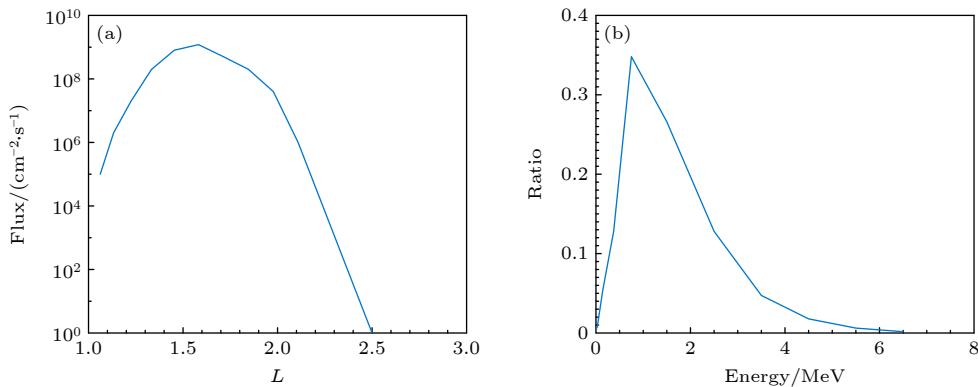
图 1 注入电子的初始分布 (a) 初始注入电子在不同  $L$  值上的总通量分布; (b) 初始注入电子中不同能量的占比

Fig. 1. Initial distribution of the injected electrons: (a) Total flux distribution of initially injected electrons at different  $L$  values; (b) proportions of different energies of the initially injected electrons.

其中  $\phi$  表示磁赤道面的方位角,  $w_0$  为归一化系数, 满足  $\int j_0(L)d\phi = \int j_0(L)w(\phi)d\phi$ ,  $j_0(L)$  为参照图 1(a) 给出的总通量, 初始总通量在磁赤道面上的分布为  $j(L, \phi) = j_0(L)w(\phi)$ . 该分布下, 初始时刻电子主要集中在以  $MLT = 6$  为中心的一个时区内. 图 1(b) 给出了电子通量在不同能量上的占比<sup>[26]</sup>. 由此给出不同能量电子通量的初始分布, 其中能量为 0.75 MeV 的电子占比最高. 电子初始投掷角分布设为各向同性分布. 初始通量管中处于损失锥内的电子已经损失, 但由于损失过程的时间尺度小于模拟的时间步长 (10 s), 因此采用各向同性初始分布对模拟的影响可以忽略.

以 0.761 MeV 电子为例, 图 2 展示了注入电子的全向通量在磁赤道面中的分布随时间的演化过程. 核爆电子在 3 月 3 日 00:00 时注入, 随时间逐渐演化. 核爆电子注入前的背景电子借助 AE8 模型<sup>[27]</sup> 和 CIMI 模型共同给出. 将 AE8 模型输出的自然辐射带电子分布作为初始条件输入给 CIMI 模型, 进行一天的演化, 得到较为稳定的自然辐射带分布, 该分布即为本模拟的初始背景分布. 相较于直接通过扩散作用在环向均匀填充, 注入电子更主要是通过“螺旋包围”的过程逐渐演化至环向均匀分布的状态. 电子注入后, 在地球磁场的约束下做自西向东环绕地球的漂移运动. 更靠外的电子漂移速度更快, 因此注入电子团会在环向上剪切拉伸, 以螺旋线的结构包围地球 (如图 2(f) 中红色虚线所示). 最终达到环向相对均匀分布的状态. 图 2(e) 中  $MLT \approx 9$ ,  $L \approx 1.6$  处通量结构表现出一定的断开趋势, 这种特征可能是该处  $M$  网格较大导致的.

由于  $M$  网格与  $L$  网格并非一一对应, 电子通量分布在从  $(M, K)$  空间向  $(E, \alpha_o)$  空间映射时所使用的  $M$  坐标存在一定程度的偏差, 导致结果中呈现出的电子环向漂移距离在该处随着  $L$  不是严格的线性增大, 出现阶跃趋势. 不过从电子团的整体演变趋势来看, 其依然满足环向剪切形成螺旋结构的特征. 图 3 进一步展示了电子通量环向分布随时间的演化规律. 图中三栏依次为由低到高不同  $L$  处 0.761 MeV 电子通量在  $MLT$  上的分布随时间的演化过程. 通量谱中出现了明显的斜条纹结构, 它反映了电子会自西向东漂移的性质. 高  $L$  处条纹的斜率更大, 说明远离地球的电子具有更快的漂移角速度. 在漂移一段时间后, 主条纹的间隙中还出现了新条纹, 这反映了电子的径向运动. 由于对流电场的存在, 电子可能通过径向漂移改变所处的  $L$  值. 不同  $L$  处的电子漂移相位不同, 在径向漂移的影响下会有其他  $L$  处的电子来到当前  $L$  上非通量峰值所在的  $MLT$  处, 形成额外的条纹. 经过足够长的时间后, 条纹间隙与条纹峰值的通量趋于一致, 表明注入电子逐渐达到了环向均匀分布. 电子通量分布的演化特征体现了内磁层电子漂移运动的性质. 对于能量处在 MeV 的电子, 其漂移运动的类型主要为梯度漂移与曲率漂移, Hamlin 等<sup>[28]</sup> 的研究指出, 偶极场中漂移角速度有如下近似表达式:

$$\omega_d = -\frac{6EL}{\gamma q B_E R_E^2} (0.35 + 0.15 \sin \alpha_o), \quad (5)$$

其中,  $E$  表示粒子能量,  $\gamma$  为粒子的洛伦兹因子,  $q$  为粒子电量,  $B_E$  为赤道处地球磁感应强度,  $R_E$  为地球半径. 由方程 (5) 可知, 对于给定能量的粒子, 其漂移角速度与  $L$  成正比, 因而电子分布在随时

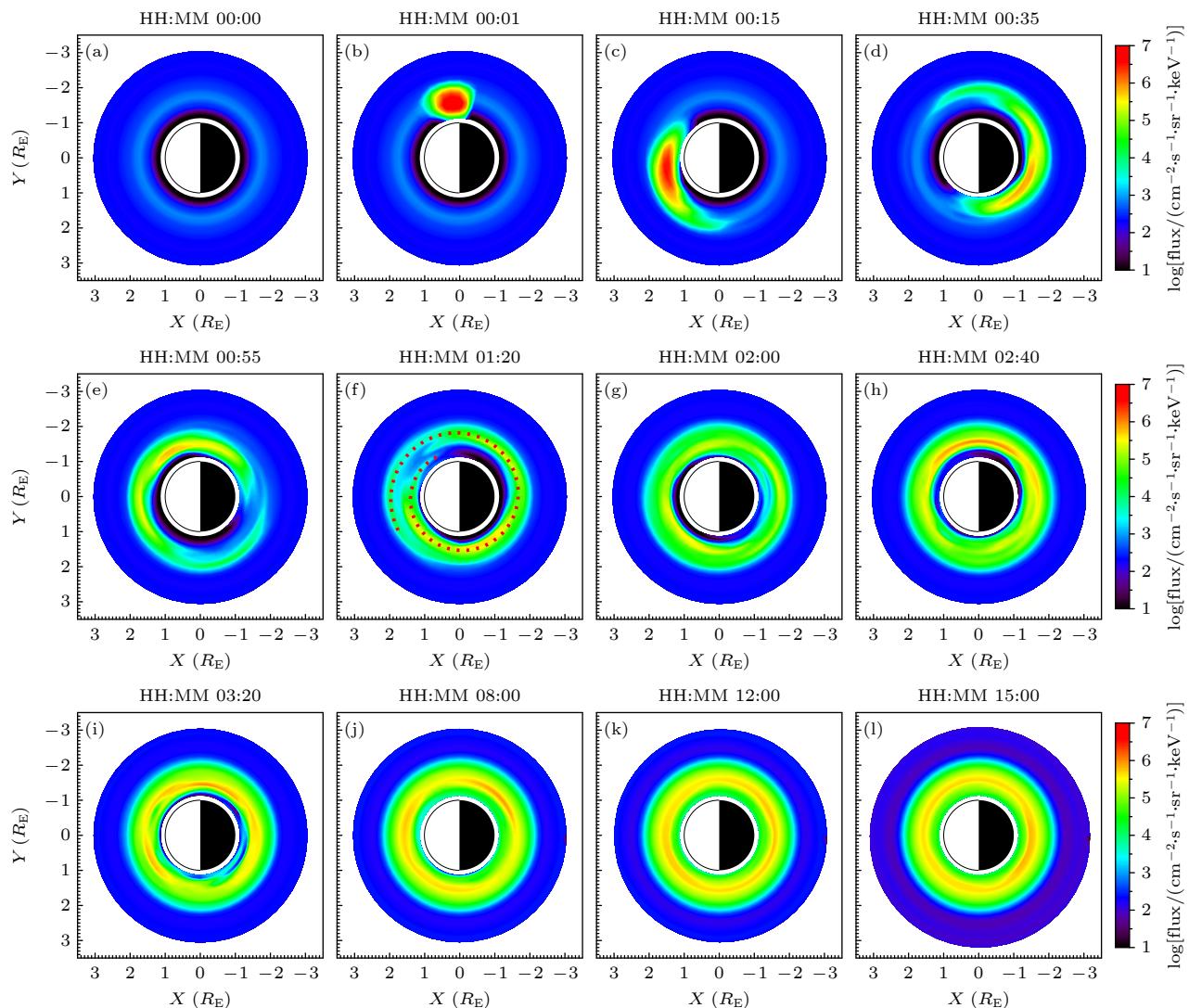


图 2 0.761 MeV 电子通量的空间分布随时间的演化过程 (a)–(l) 不同时刻电子微分通量在赤道面上的分布, 图中 XY 平面为从地球北侧看向磁赤道面的俯视图, 太阳位于图片左侧; 图 (f) 中红色虚线表示注入电子在漂移过程中形成的螺旋线结构

Fig. 2. Temporal evolution of the spatial distribution of 0.761 MeV electrons' flux: (a)–(l) The differential flux distribution of electrons in the equatorial plane at different times. The XY plane in the figures represents a top-down view of the magnetic equatorial plane from the Earth's northern side, with the Sun located to the left side. The red dashed line in panel (f) indicates the spiral structure formed by the injected electrons during their drift process.

间演化的过程中会表现出图 2 与图 3 所示的拉伸环绕的特征。随着时间的推移, 0.761 MeV 电子大约在 12 h 后达到均匀分布。此过程中低  $L$  处电子环绕地球漂移了 10 圈左右, 高  $L$  处则可漂移 20 圈左右。

其他能量的电子在演化过程中也表现出螺旋包围地球的结构特征。图 4 展示了 1.323 MeV 电子通量的演化过程, 电子团随着时间的推移环向剪切, 出现螺旋结构。不同能量电子演化的差异主要体现在达到环向均匀的时间上。由方程 (5) 可知, 电子的能量越高, 漂移角速度越大, 不同  $L$  处漂移

角速度的差异也更明显, 因而环向剪切的程度更剧烈。由图 4 可以看出, 1.323 MeV 电子在 8 h 后已基本达到环向均匀, 比 0.761 MeV 电子用时更短。低能电子用时则会更长。模拟结果表明, 能量大于 100 keV 的电子在 24 h 后均可达到环向均匀分布, 形成相对稳定的人工辐射带。

图 3 中的斜条纹还表现出了随时间逐渐变粗的特征, 表明相同能量的注入电子团在漂移过程中还会发生环向膨胀, 这种膨胀效应主要是通过投掷角散实现的。图 5 展示了 0.761 MeV 电子投掷角分布的各向异性指数的空间分布随时间的演化

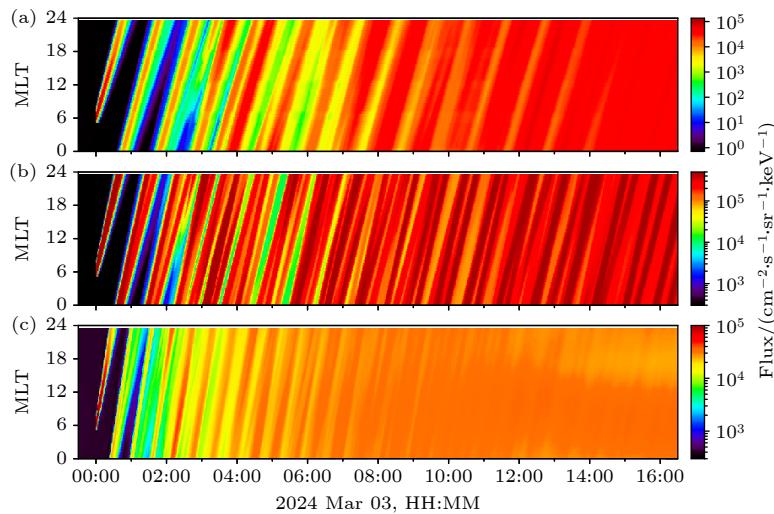


图 3 不同  $L$  处电子通量的 MLT 分布随时间的演化规律, 其中 (a)–(c) 依次为  $L = 1.23$ ,  $L = 1.45$ ,  $L = 1.98$  处 0.761 MeV 电子的通量环向分布

Fig. 3. Temporal evolution of the MLT distribution of electron flux at different  $L$  values. Panel (a)–(c) show the azimuthal distribution of 0.761 MeV electron flux at  $L = 1.23$ ,  $L = 1.45$ , and  $L = 1.98$ , respectively.

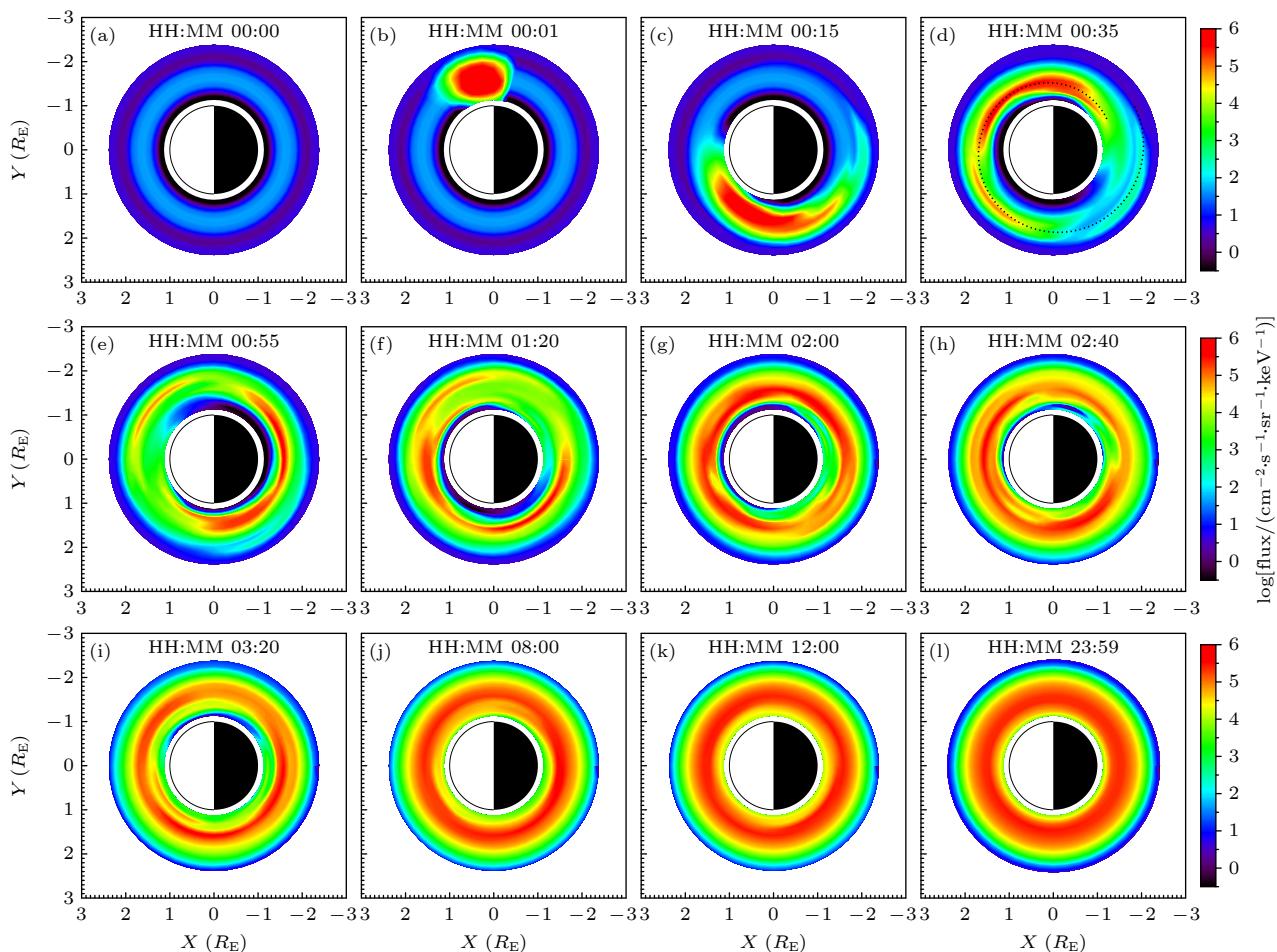


图 4 1.323 MeV 电子通量的空间分布随时间的演化过程, 其中 (a)–(l) 为不同时刻电子微分通量在赤道面上的分布; 图 (d) 中黑色虚线表示注入电子在漂移过程中形成的螺旋线结构

Fig. 4. Temporal evolution of the spatial distribution of 1.323 MeV electrons' flux. Panel (a)–(l) show the differential flux distribution of electrons in the equatorial plane at different times. The black dashed line in panel (d) indicates the spiral structure formed by the injected electrons during their drift process.

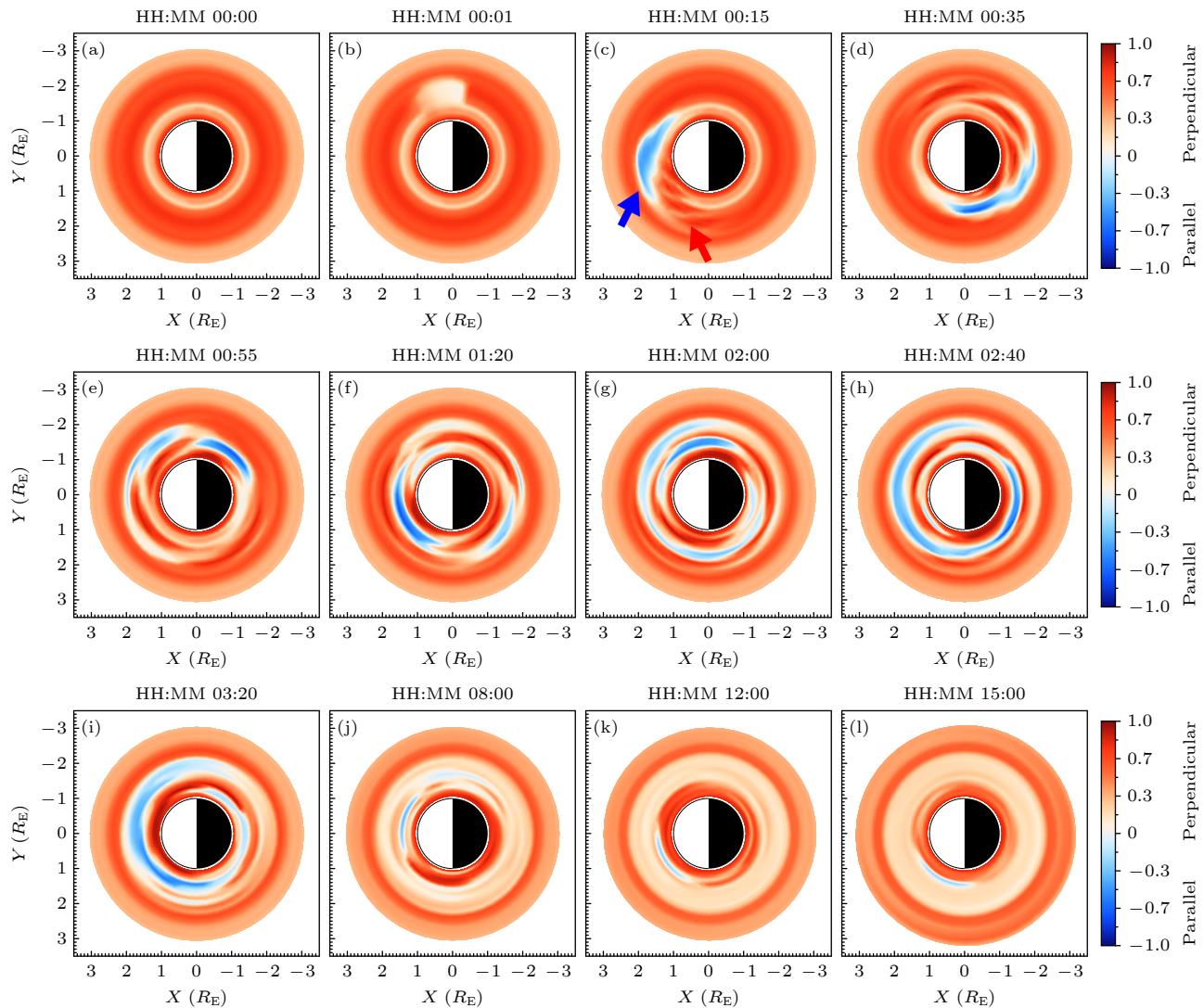


图 5 0.761 MeV 电子各向异性指数的空间分布随时间的演化过程, 其中 (a)–(l) 分别为不同时刻电子各向异性指数在磁赤道中的分布; 图 (c) 中红色箭头指示注入电子团前端各向异性指数升高的区域, 蓝色箭头指示后端各向异性指数降低的区域  
Fig. 5. Temporal evolution of the spatial distribution of the anisotropy index for 0.761 MeV electrons. Panel (a)–(l) show the distribution of the anisotropy index in the magnetic equatorial plane at different times. In panel (c), the red arrow indicates the region where the anisotropy index increases at the front of the injected electron cluster, while the blue arrow indicates the region where the anisotropy index decreases at the rear.

过程. 各向异性指数  $A_s$  的定义如下:

$$A_s = \frac{A_{s\perp} - A_{s//}}{A_{s\perp} + A_{s//}}, \quad (6)$$

$$A_{s\perp} = \int \frac{1}{2} f_s \sin^2 \alpha_o d\cos \alpha_o, \quad (7)$$

$$A_{s//} = \int f_s \cos^2 \alpha_o d\cos \alpha_o. \quad (8)$$

当  $A_s$  接近 1 时, 电子的投掷角分布以  $90^\circ$  分布为主; 当  $A_s$  接近 -1 时, 电子的投掷角分布以平行磁力线分布为主;  $A_s$  接近 0 时, 电子表现为各向同性分布. 由于损失锥内的电子会注入大气损失, 损失锥外强哨声波环境中的小投掷角电子经过长期

演化后也会通过投掷角扩散进入损失锥而减少, 因此在核爆电子注入前, 背景中的电子总体偏向于  $90^\circ$  分布. 核爆电子刚注入时, 只有初始处在损失锥内的电子发生损失, 通过哨声波损失的电子较少, 因而各向异性指数较低, 由于其密度远高于背景电子, 因此该处的整体速度分布与注入电子接近, 表现为趋于各向同性分布 (如图 5(b) 所示). 由方程 (5) 可知, 投掷角接近  $90^\circ$  的电子相较于小投掷角电子具有更高的漂移角速度, 具有不同投掷角的电子会因为漂移速度的不同而彼此分离. 从图 5(c)–(e) 可以看出, 随着时间的推移, 注入电子的前端各向异性指数升高 (如图 5(c) 中红色箭头所示), 后

端降低(如图 5(c) 中蓝色箭头所示), 表明漂移过程中  $90^\circ$  投掷角电子会领先于小投掷角电子. 这种投掷角不同造成的漂移速度的差异也会使注入电子在环向上膨胀, 促进电子的环向填充过程.

除了“螺旋包围”与投掷角色散过程, 电子漂移的能量色散也会影响到电子的空间分布, 使得相同  $L$  处的电子发生环向分离, 促进环向填充的过程. 图 6 展示了  $L = 1.45$  处电子通量在能量-MLT 空间中的分布随时间的演化. 图中横轴表示磁地方时, 纵轴表示能量. 与位置空间类似, 电子在能量-MLT 空间中的演化也出现了沿 MLT 方向剪切的特征. 最终在投掷角色散的作用下, MLT 分布逐渐均匀. 由方程(5) 可知, 粒子能量越高, 漂移角速度越快. 因此, 在固定  $L$  位置处, 不同能量的电子

在漂移过程中会因为漂移速度的差异彼此分离, 使得注入电子团的空间分布在环向上膨胀, 覆盖更大的 MLT 范围.

本文模拟的时间范围内伴随有磁暴事件, 磁暴影响下人工辐射带电子的长时间演化过程如图 7 所示. 图 7(a) 展示了模拟期间的 Kp 指数与 Dst 指数, 磁暴在 3 月 3 日 18:00 时左右达到最强. 图 7(b) 至图 7(d) 展示了不同能量的电子在  $L$  上的分布随时间的演化, 颜色表示对应能量的电子通量在该  $L$  上的环向平均值. 核爆电子在 3 月 3 日 00:00 时注入到内辐射带, 经过 12 h 左右形成相对稳定的结构. 磁暴期间, 外辐射带受到显著影响, 电子通量迅速下降, 同时向低  $L$  处移动. 相比之下, 内带则保持相对稳定, 人工辐射带并未受到明显影响.

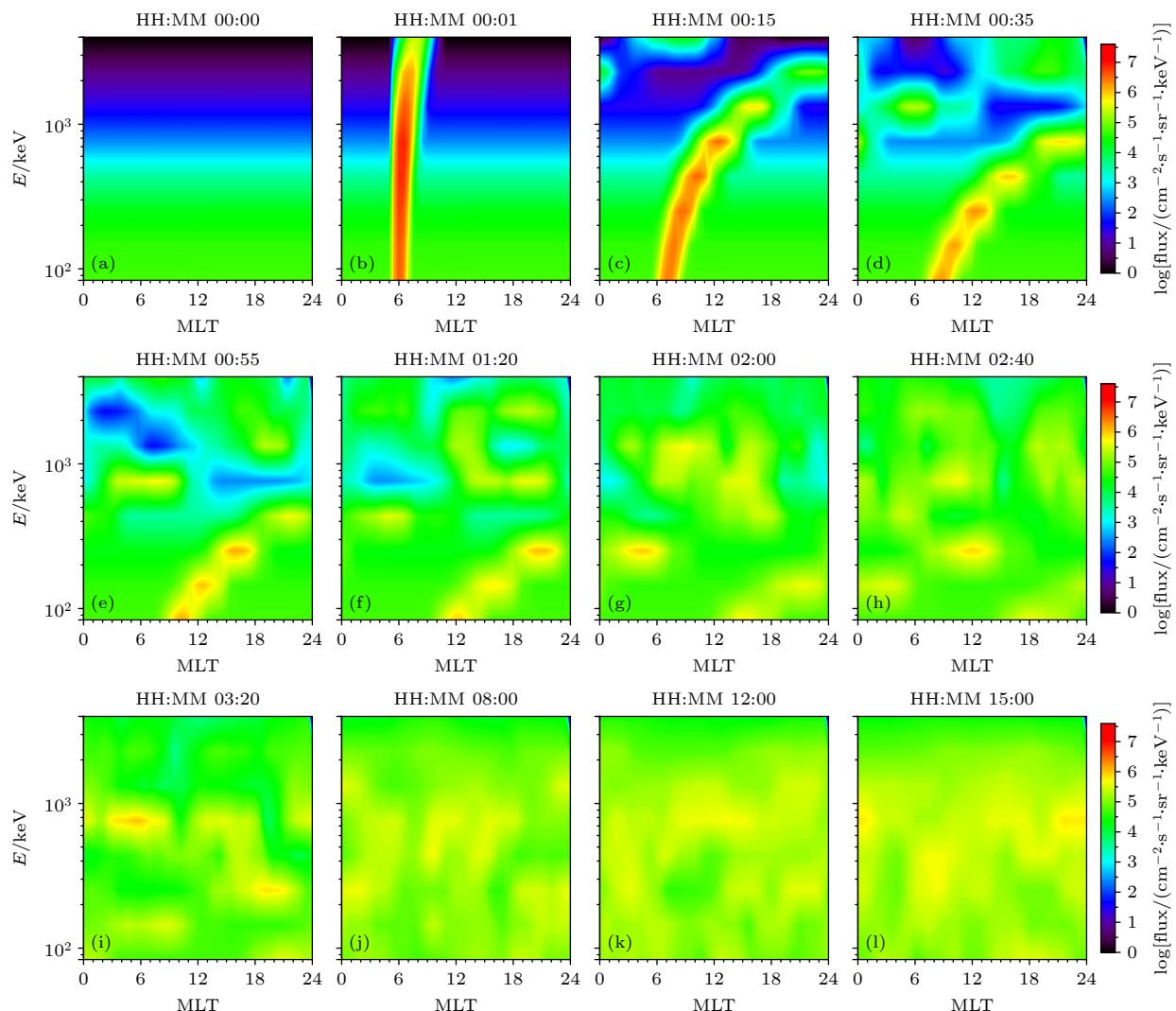


图 6  $L = 1.45$  处电子的能量-MLT 分布随时间的演化过程, 其中 (a)–(l) 分别为不同时刻电子通量在能量-MLT 空间中的分布  
Fig. 6. Temporal evolution of the energy-MLT distribution of electrons at  $L = 1.45$ . Panel (a)–(l) show the electron flux distribution in the energy-MLT space at different times.

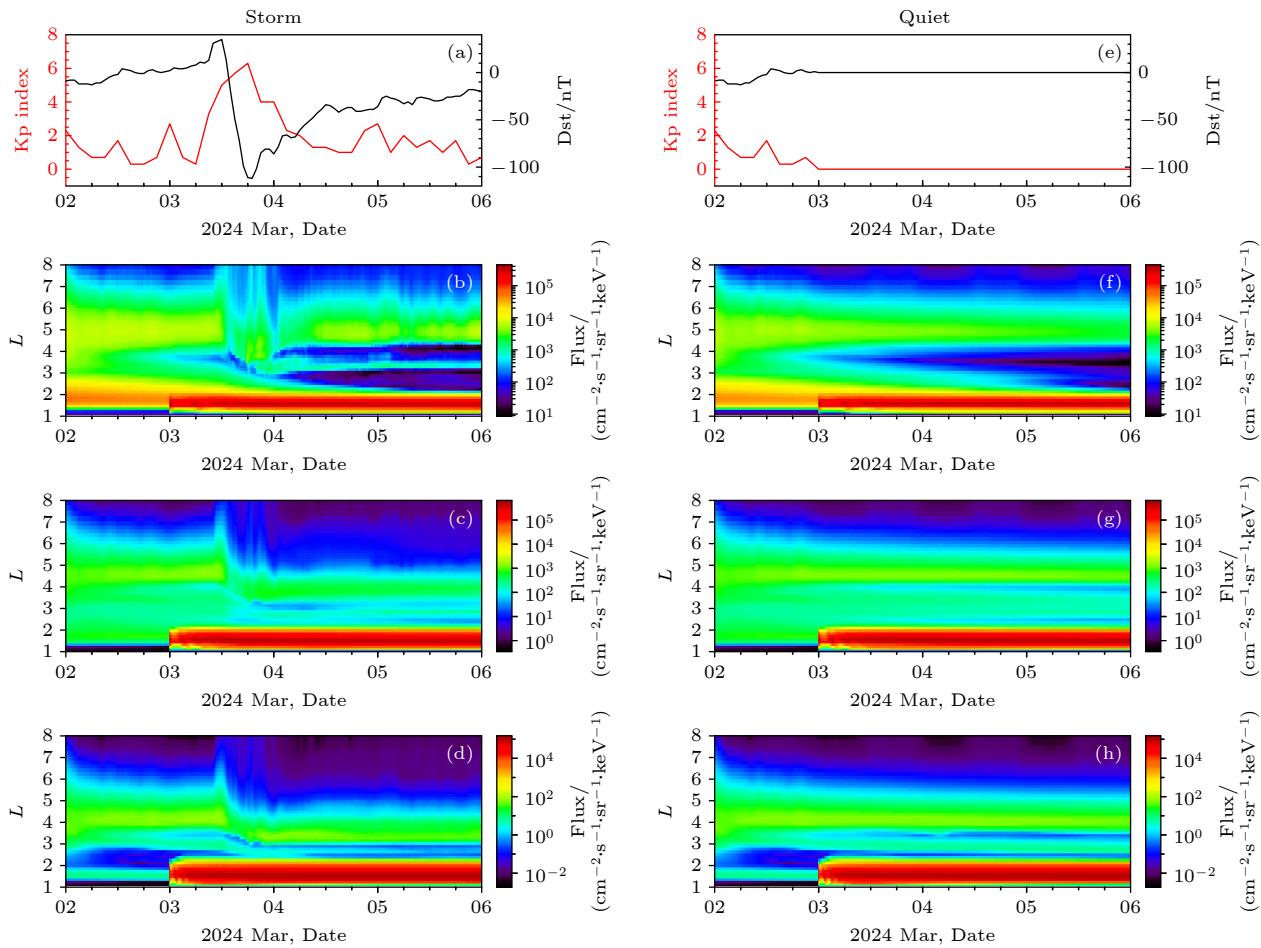


图 7 人工辐射带的长时间演化过程 (a) 模拟期间的地磁指数, 红线表示 Kp 指数, 黑线表示 Dst 指数; (b)–(d) 0.252 MeV, 0.761 MeV, 2.301 MeV 电子通量的  $L$  分布随时间的演化过程, 图中通量为对应  $L$  上的环向平均通量; (e)–(h) 地磁平静条件下左图相应内容

Fig. 7. Long-term evolution of the artificial radiation belt: (a) The geomagnetic indices during the simulation period, with the red line representing the Kp index and the black line representing the Dst index; (b)–(d) the temporal evolution of the  $L$  distribution of electron flux for 0.252 MeV, 0.761 MeV, and 2.301 MeV, respectively, where the flux represents the azimuthally averaged flux at the corresponding  $L$ ; (e)–(h) the corresponding content under geomagnetically quiet conditions.

对比磁暴条件下辐射带的演化过程, 图 7(e)–(h) 展示了地磁平静条件下的模拟结果。如图 7(e) 所示, 核爆电子注入后 Kp 指数与 Dst 指数均取为 0, 太阳风参数取为 3 月 2 日的平均值。图 7(f)–(h) 展示了对应能道的通量分布。地磁平静条件下, 外带的通量不再发生剧烈变化, 保持相对稳定。人工辐射带的演化规律与磁暴期间基本一致, 表明该磁暴对人工辐射带的影响可以忽略不计。

## 4 结 论

本文利用 CIMI 模型模拟研究了高空核爆产生的高能电子在内磁层环向填充形成人工辐射带的过程。在人工辐射带形成过程中, 不同  $L$  值处的

注入电子由于具有不同的漂移速度, 随着时间推移, 逐渐形成围绕地球的螺旋结构。螺旋结构的形成过程中伴随有电子的环向膨胀, 主要由漂移过程中能量色散和投掷角色散机制驱动。由于能量和投掷角的不同, 电子具有不同的漂移速度, 因此会在环向上逐渐分离, 导致粒子在环向上的分布范围扩大。在通过形成螺旋结构与环向膨胀包围地球后, 电子进一步通过扩散作用逐渐演变为环向均匀分布的结构。

针对人工辐射带演化过程的模拟研究还可进一步进行优化。一方面, 对于电子在位置空间中的演化机制, CIMI 模型目前仅考虑了电子在背景电磁场约束下的漂移运动, 并未引入相应的扩散项。与回旋共振类似, 磁层中的带电粒子可与超低频波

发生漂移弹跳共振<sup>[29,30]</sup>, 进而发生径向扩散<sup>[31]</sup>与环向扩散<sup>[32,33]</sup>. 磁暴期间, 磁层中超低频波的强度显著增强, 加剧电子的径向扩散过程<sup>[34]</sup>, 缩短人工辐射带的耗散时间. 引入径向扩散能更准确地模拟人工辐射带的演化过程. 另一方面, 本工作使用的引起扩散的哨声波的强度参照 Meredith 等<sup>[20,21]</sup>的统计结果由  $K_p$  指数给出, 对于扩散系数和空间状态的关系缺少更详细的物理描述. 近年来针对磁层哨声波的物理模型开展了许多研究, 结合 AE 指数、太阳风速度、行星际磁场、等离子体层参数可以更加细致地给出扩散系数的时空分布<sup>[35,36]</sup>. 引入更加准确的扩散系数可以更加精确地模拟出人工辐射带的演化规律.

感谢美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心 Meiching Fok 教授及团队在开发 CIMI 模型中做出的贡献.

## 参考文献

- [1] Lyons L R 1973 *J. Geophys. Res.* **78** 6793
- [2] Zheng Y, Ganushkina N Y, Jiggens P, Jun I, Meier M, Minow J I, O'Brien T P, Pitchford D, Shprits Y, Tobiska W K, Xapsos M A, Guild T B, Mazur J E, Kuznetsova M M 2019 *Space Weather* **17** 1384
- [3] Christofilos N C 1959 *J. Geophys. Res.* **64** 869
- [4] Beall D S, Bostrom C O, Williams D J 1967 *J. Geophys. Res.* **72** 3403
- [5] Wang J G, Liu L, Niu S L, Zuo Y H, Gao Y J, Zhu J H, Zhang X H, Li Y, Li X Z 2023 *Modern Appl. Phys.* **14** 3 (in Chinese) [王建国, 刘利, 牛胜利, 左应红, 高银军, 朱金辉, 张相华, 李桠, 李夏至 2023 现代应用物理 **14** 3]
- [6] Zhu J H, Zuo Y H, Liu L, Niu S L, Shang P, Li X Z, Wang X D 2023 *Modern Appl. Phys.* **14** 44 (in Chinese) [朱金辉, 左应红, 刘利, 牛胜利, 商鹏, 李夏至, 王学栋 2023 现代应用物理 **14** 44]
- [7] Gu X D, Zhao Z Y, Ni B B, Wang F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5871 (in Chinese) [顾旭东, 赵正予, 倪彬彬, 汪枫 2009 物理学报 **58** 5871]
- [8] Tu W, Cunningham G S, Chen Y, Morley S K, Reeves G D, Blake J B, Baker D N, Spence H 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 1359
- [9] Fok M C, Buzulukova N Y, Chen S H, Glocer A, Nagai T, Valek P, Perez J D 2014 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 7522
- [10] Fok M C, Wolf R A, Spiro R W, Moore T E 2001 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **106** 8417
- [11] Fok M C, Kang S B, Ferradas C P, Buzulukova N Y, Glocer A, Komar C M 2021 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA028987
- [12] Albert J M 2005 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **110** A03218
- [13] Albert J M 2008 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **113** A06208
- [14] Albert J M, Meredith N P, Horne R B 2009 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **114** 1DD
- [15] Weimer D R 2001 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **106** 407
- [16] Tsygankenko N A 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **100** 5599
- [17] Tsygankenko N A, Stern D P 1996 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **101** 27187
- [18] Tsygankenko N A, Mukai T 2003 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **108** 1136
- [19] Tsygankenko N A, Sitnov M I 2005 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **110** A03208
- [20] Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, Summers D, Anderson R R 2004 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **109** A06209
- [21] Meredith N P, Horne R B, Sicard-Piet A, Boscher D, Yearby K H, Li W, Thorne R M 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A10225
- [22] Raiden R L, Frank L A, Craven J D 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **91** 13613
- [23] Gombosi T I, Baker D N, Balogh A, Erickson P J, Huba J D, Lanzerotti L J 2017 *Space Sci. Rev.* **212** 985
- [24] Cowee M, Winske D 2012 *Update on the Electron Source Model* (Los Alamos National Laboratory) DOI: 10.2172/1046529
- [25] Dyal P 2006 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **111** A12211
- [26] Wang J G, Niu S L, Zhang D H 2010 *The Parameter Manual Book of High-Altitude Nuclear Explosion Effect* (Beijing: Atomic Energy Press) pp259–260 [王建国, 牛胜利, 张殿辉 2010 高空核爆炸效应参数手册 (北京: 原子能出版社) 第 259—260 页]
- [27] Vette J I 1991 *The AE-8 Trapped Electron Model Environment Report Number: NSSDC/WDC-A-RS-91-24*
- [28] Hamlin D A, Karplus R, Vik R C, Watson K M 1961 *J. Geophys. Res.* **66** 1
- [29] Southwood D J, Kivelson M G 1981 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **86** 5643
- [30] Southwood D J, Kivelson M G 1982 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **87** 1707
- [31] Fei Y, Chan A A, Elkington S R, Wiltberger M J 2006 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **111** A12209
- [32] Lejosne S, Albert J M 2023 *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **10** 1200485
- [33] Lejosne S, Albert J M, Walton S D 2023 *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **10** 1232512
- [34] Sandhu J K, Rae I J, Wygant J R, Breneman A W, Tian S, Watt C E J, Horne R B, Ozeke L G, Georgiou M, Walach M T 2021 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA029024
- [35] Aryan H, Bortnik J, Meredith N P, Horne R B, Sibeck D G, Balikhin M A 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA028403
- [36] Malaspina D M, Zhu H, Drozdov A Y 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2019JA027415

# Simulation study on the azimuthal evolution of electrons from high-altitude nuclear explosions based on CIMI model\*

LUO Zhekai<sup>1)</sup> SUN Qiang<sup>2)</sup> XIE Lun<sup>1)</sup> PU Zuyin<sup>1)</sup> ZONG Qiugang<sup>1)</sup>  
LIU Ying<sup>1)</sup> ZHOU Qianhong<sup>2)†</sup> FU Suiyan<sup>1)‡</sup>

1) (*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

2) (*Institute Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

(Received 8 September 2024; revised manuscript received 4 January 2025)

## Abstract

High-altitude nuclear explosions can inject large amounts of relativistic electrons into the inner magnetosphere, resulting in the formation of artificial radiation belts. These high-energy electrons pose a potential threat to spacecraft due to their long-term stability and influence on space weather. The investigation of the formation and evolution of artificial radiation belts is of great significance for the safety of spacecraft and human space activities. In this study, the comprehensive inner magnetosphere-ionosphere (CIMI) model is used to simulate the transition of electrons from a locally concentrated distribution to an azimuthally uniform distribution, which reveals the spiral encircling, azimuthal expansion, and diffusion behaviors exhibited by the electron cloud during the formation of artificial radiation belts. The CIMI model is a four-dimensional model based on the Fokker-Planck equation. It simulates the evolution of particles across four degrees of freedom: radial, azimuthal, energy, and equatorial pitch angle. Unlike previous studies that mainly focus on the long-term evolution of artificial radiation belts already reaching azimuthal uniformity, this work specifically ascertains the azimuthal evolution process of the injected electrons and how they form the artificial radiation belts. Numerical simulations are conducted on the captured nuclear explosion electrons initially concentrated at  $L = 1.1\text{--}2.2$  and covering approximately one time zone azimuthally. The results show that the injected electrons primarily evolve into an azimuthally uniform distribution through a spiral encircling process, with diffusion playing a smaller role. In this process, the electrons undergo eastward drift, with those at higher altitudes exhibiting faster drift velocities. The velocity shear leads to the formation of a helical structure around the Earth. Additionally, the formation of this spiral structure is accompanied by azimuthal expansion, driven mainly by energy and pitch angle dispersion during the drift. Electrons with different energy values and equatorial pitch angles exhibit varying drift speeds, contributing to the azimuthal expansion of electron clusters during the drift. The expansion process can fill the gaps in the helical structure. Ultimately, the electron distribution achieves azimuthal uniformity through energy-pitch angle diffusion.

**Keywords:** high-altitude nuclear explosions, artificial radiation belt, Fokker-Planck equations, electrons diffusion

**PACS:** 94.30.Xy, 28.70.+y

**DOI:** [10.7498/aps.74.20241259](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241259)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20241259](https://cstr.ia.ac.cn/32037.14.aps.74.20241259)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375246, 12305288, 41731068).

† Corresponding author. E-mail: [zhou\\_qianhong@qq.com](mailto:zhou_qianhong@qq.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [suiyanfu@pku.edu.cn](mailto:suiyanfu@pku.edu.cn)



## 基于CIMI模型的高空核爆电子环向分布演化过程模拟研究

罗哲楷 孙强 谢伦 濮祖荫 宗秋刚 刘鹰 周前红 傅绥燕

**Simulation study on the azimuthal evolution of electrons from high-altitude nuclear explosions based on CIMI model**

LUO Zhekai SUN Qiang XIE Lun PU Zuyin ZONG Qiugang LIU Ying ZHOU Qianhong FU Suiyan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 74, 069401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241259

CSTR: 32037.14.aps.74.20241259

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241259>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于流体-磁流体-粒子混合方法的高空核爆炸碎片云模拟

Hydro-Magneto-PIC hybrid model for description of debris motion in high altitude nuclear explosions

物理学报. 2021, 70(18): 180703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210347>

高空核爆炸能量在大气层中的沉积规律

High-altitude nuclear explosion energy accumulation law in atmosphere

物理学报. 2022, 71(20): 200702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221112>

甚低频台站信号对地球内辐射带和槽区能量电子的散射效应分析

Scattering effect of very low frequency transmitter signals on energetic electrons in Earth's inner belt and slot region

物理学报. 2021, 70(14): 149401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202029>

基于Fokker-Planck-Landau碰撞模型的非均匀尘埃等离子体目标散射特性

Scattering characteristics of non-uniform dusty plasma targets based on Fokker-Planck-Landau collision model

物理学报. 2023, 72(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222113>

等离子体层嘶声波对辐射带电子投掷角散射系数的多维建模

Multi-dimensional modeling of radiation belt electron pitch-angle diffusion coefficients caused by plasmaspheric hiss

物理学报. 2022, 71(22): 229401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220655>

外加应力作用下  $\text{UO}_2$  中空洞演化过程的相场模拟

Phase-field simulation of void evolution in  $\text{UO}_2$  under applied stress

物理学报. 2022, 71(2): 026103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211440>