

# NWC 人工甚低频台站信号产生“条缕状” 准捕获电子能谱的模拟研究\*

刘阳希子 项正<sup>†</sup> 周晨<sup>‡</sup> 倪彬彬 董俊虎  
胡景乐 王建行 郭浩智

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

(2024 年 7 月 13 日收到; 2024 年 8 月 23 日收到修改稿)

遍布全球的人工甚低频台站发射的信号主要用于对潜通信, 在夜间, 这些信号可以泄漏进磁层与内辐射带中几十至几百 keV 电子发生回旋共振, 从而导致电子沉降. 这一过程是导致内辐射带电子损失的重要原因, 也是磁层-电离层耦合过程中能量和物质输运的重要环节. 被台站信号散射的电子呈现出能量随  $L$  增加而减小的“条缕状”能谱结构, 与台站信号和电子的一阶回旋共振能量曲线相符. 低轨卫星可以对“条缕状”能谱结构进行清晰地观测, 为研究近地空间波粒相互作用提供了重要契机. 本文基于 Drift-Diffusion-Source 模型, 再现了 DEMETER 卫星于 2009 年 3 月 19 日多个轨道测量的 NWC 台站信号导致的“条缕状”能谱, 量化了 NWC 台站信号对辐射带电子的散射作用, 明晰了 NWC 台站信号的幅度和传播角, 揭示了内辐射带电子漂移过程中的动态变化规律, 为开发人工影响辐射带技术提供了重要理论参考.

**关键词:** 地球辐射带, 波粒相互作用, 人工甚低频台站信号, 电子投掷角扩散

**PACS:** 94.30.Xy, 4.20.wj, 94.30.Ny

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240975

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20240975

## 1 引言

地球辐射带是指地球空间中被地磁场捕获的高能粒子聚集区域, 其高能粒子通量受太阳和地磁活动影响而处于高度动态变化中, 其中波粒相互作用是导致辐射带电子损失的重要机制之一<sup>[1-8]</sup>. 辐射带中的高能粒子会对穿越其中的航天器和宇航员造成不可逆转的伤害, 通过人工手段减少辐射带高能电子通量是近年来的研究热点, 深入理解辐射带波粒相互作用对于研究人工影响辐射带技术具有重要科学意义<sup>[9-11]</sup>. 不同于磁层中自然激发的等

离子体波动, 人工台站甚低频波是由人类活动产生的, 并能对地球辐射带的动态变化产生影响, 同时也为研究近地空间波粒相互作用提供了很好的机会<sup>[12-16]</sup>.

地基台站发射的用于与潜艇通信的甚低频 (VLF) 信号在沿着地球-低电离层波导传播的过程中, 部分电磁波能量穿越电离层并进入内磁层. 这些人工台站 VLF 信号在内磁层中以哨声模传播并与电子发生回旋共振, 引起内辐射带中几十至几百 keV 电子投掷角扩散并沉降至大气中, 进而导致内辐射带电子损失<sup>[17-22]</sup>. 磁层中的人工台站 VLF 信号主要分布于夜侧, 因为日侧电离层密度增大, 对

\* 国家自然科学基金 (批准号: 42025404, 42188101, 42174190)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0503700) 和中国科学院战略性先导科技计划 (B 类) (批准号: XDB41000000) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xiangzheng@whu.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: chenzhou@whu.edu.cn

波动的吸收更强. 在低轨卫星观测数据中, 泄漏进入磁层中的台站信号主要集中在台站附近, 呈现近圆形分布, 并从信号穿透位置沿着磁力线传播至共轭半球. 磁层中台站信号的强度和辐射范围与台站发射功率呈正相关<sup>[23,24]</sup>. 基于范阿伦卫星波动数据的统计分析显示, 源自位于澳大利亚的 NWC 台站 (21.82°S, 114.17°E, 发射功率为 1 MW) 的信号在内磁层中  $L < 2$  的区域相对较强, 对内辐射带数百 keV 电子的动态变化有较大影响<sup>[25–30]</sup>.

Sauvaud 等<sup>[31]</sup>分析 DEMETER 卫星电子通量数据发现, NWC 台站信号会导致  $L = 1.4$ — $1.7$  处漂移损失锥中 100—600 keV 电子通量增强, 增强的电子通量呈现能量与  $L$ -shell 的依赖性, 满足电子与 NWC 台站信号发生一阶回旋共振时能量与  $L$  的对应关系, 并根据这一特征将其命名为“条缕状”能谱. 这些被台站信号散射的电子会向东漂移至南大西洋异常 (SAA) 区, 在内辐射带中形成一条新的电子沉降带. Gamble 等<sup>[32]</sup>分析了 NWC 台站发射时间与卫星观测“条缕状”能谱之间的联系, 发现 NWC 台站以东观测到的“条缕状”能谱与 NWC 台站信号密切相关, 表明 NWC 台站信号可以导致内辐射带数百 keV 电子沉降. Li 等<sup>[33]</sup>基于 DEMETER 卫星观测的内带准捕获电子的统计工作也印证了这一结论, 并发现卫星观测到的增强的电子通量能级范围以及通量大小会随着经度增加而增大.

之前的大多数研究都是通过理论分析一阶回旋共振关系来证明台站信号与增强的准捕获电子通量之间的关系<sup>[21,31,34]</sup>. Selesnick 等<sup>[35]</sup>通过考虑了电子径向扩散、波动散射和电子漂移的随机模型, 模拟得到了与卫星观测基本吻合的“条缕状”能谱, 但未揭示被台站信号散射的电子沿经度的分布规律. Liu 等<sup>[36]</sup>基于 Drift-Diffusion-Source 模型, 模拟了 2009 年 3 月 19 日 NWC 台站分别位于日侧和夜侧时  $L = 1.7$  处 200 keV 电子通量沿经度的分布. 当假设波幅为 15 pT 时, 模拟结果与 DEMETER 卫星观测基本吻合, 表明 NWC 台站位于夜侧时, 卫星在  $L = 1.7$  处观测的准捕获电子的主要来源是被台站信号散射的捕获电子, 可以推测当天  $L = 1.7$  处台站信号幅值约为 15 pT. 从 Liu 等<sup>[36]</sup>的模拟结果可以发现, 台站信号散射导致的准捕获电子通量呈现沿经度增加的趋势, 但该工作没有模拟和评估除  $L = 1.7$  以外其他  $L$  处 NWC 台站信号对

电子的散射效应.

本文将基于准线性理论计算内辐射带中台站信号引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数, 然后通过 Drift-Diffusion-Source 模型模拟台站信号散射内辐射带电子形成“条缕状”能谱的过程, 并与卫星观测对比进行分析, 明晰内辐射带电子从被台站信号散射到漂移进入南大西洋异常区沉降的完整变化过程. 本文第 2 节将介绍使用的卫星数据以及“条缕状”能谱观测结果, 第 3 节介绍 Drift-Diffusion-Source 模型和波动参数的选取, 第 4 节将展示数值模拟结果, 第 5 节总结主要结论.

## 2 DEMETER 卫星数据介绍及“条缕状”能谱观测分析

DEMETER 卫星是由法国国家空间研究中心 (CNES) 于 2004 年 6 月底发射的太阳同步极轨卫星, 主要用于研究由地震和火山喷发等自然现象或人类活动导致的电离层扰动现象<sup>[37]</sup>. 卫星轨道高度约为 710 km, 提供约 10:30 LT (local time) 和约 22:30 LT 的观测. 卫星上搭载的粒子探测器 (IDP) 可以测量 70 keV—2.34 MeV 能量范围的电子通量, 探测的电子局地投掷角约为 90°. 卫星有巡查和详查两种工作模式, 这两种工作模式下测量的能量分辨率分别为 17.8 keV 和 8.9 keV<sup>[38]</sup>.

由于真实的地球磁场不是偶极子场, 地磁强度在经度分布上有强弱差异, 其中 SAA 区地磁强度最小. 电子在地磁场中沿磁力线做弹跳运动时保持第一绝热不变量守恒, 即  $\mu = p^2 \sin^2 \alpha / (2m_0 B) = \text{Const}$ , 其中  $p$  是电子动量,  $m_0$  是电子的静止质量,  $B$  是磁场强度,  $\alpha$  为电子投掷角 (电子运动方向与背景磁力线的夹角), 电子沿磁力线弹跳过程中投掷角随纬度增加逐渐增大, 当电子投掷角  $\alpha = 90^\circ$  时电子到达弹跳折返点即磁镜点. 电子漂移至磁场较弱的区域时, 由于  $\mu$  保持不变即磁镜点处磁场强度不变, 磁镜点高度会下降至更低的高度, 在 SAA 区域会降至最低. 当电子磁镜点高度下降至 100 km 高度时, 认为电子将与大气分子碰撞发生沉降, 这时电子的赤道投掷角 (电子在磁赤道处的投掷角) 大小被称为弹跳损失锥 (BLC). 由于地磁场随经度的强弱变化, 不同经度处的 BLC 大小也不相同, 其中最大的 BLC 被称为漂移损失锥 (DLC). 据此辐射带中的电子分为三种类型: 沉降电子、准

捕获电子、捕获电子<sup>[39,40]</sup>. 沉降电子是指赤道投掷角小于局地 BLC 的电子, 其将在一个弹跳周期内沉降在大气中; 准捕获电子是指赤道投掷角大于局地 BLC 但是小于 DLC 的电子, 可以存在数个弹跳周期, 直至漂移至某一区域后因赤道投掷角小于局地 BLC 而沉降, 准捕获电子会在一个漂移周期内损失; 捕获电子是赤道投掷角大于 DLC 被地磁场稳定捕获的电子. 捕获电子在无扰动的前提下生命周期很长, 而在有波动与电子发生共振引起电子投掷角扩散时, 会使得电子的赤道投掷角减小至 DLC 内, 导致电子发生损失. DEMETER 卫星由于其低轨道高度的特性, 可以观测到这三种不同类型的电子: 在 SAA 区域观测到的为捕获电子, 在 SAA 区域共轭的北半球观测到的为沉降电子, 在其他区域观测到的为准捕获电子<sup>[41–43]</sup>, 为研究台站信号散射电子的过程提供了很好的观测机会.

图 1(I) 展示的是 2009 年 3 月 19 日 NWC 台站位于夜侧时, DEMETER 卫星轨道在地理经纬度地图上的路径, 轨道的颜色表示基于 IGRF 磁场模型计算得到的卫星测量的电子类型<sup>[42]</sup>. 蓝色表示沉降电子, 绿色表示准捕获电子, 红色表示捕获电子. 红色圆点标识的是 NWC 台站的位置, 黑色的实线表示  $L = 1.5$  和  $L = 1.9$  的等值线. 红色字母 a–f 表示卫星轨道沿经度的分布次序, 其中轨道 a 测量位置在 NWC 台站附近, 测量的主要是准捕获电子, 而轨道 f 位于 SAA 区域, 测量的主要是捕获电子.

图 1(a)–(f) 分别对应着图 1(I) 中轨道 a–f 在  $L = 1.5$ – $1.9$  处观测到的  $L$ - $E_k$  能谱. 横坐标是  $L$  值, 纵坐标是能量 ( $E_k$ ), 颜色表示的是电子通量的大小. 各个能谱相应的观测时间标在子图的顶部. 能谱中电子通量增强部分呈现出随着  $L$  增加能量减小的特征, 这是 NWC 台站信号与捕获电子发生回旋共振, 将捕获电子散射进漂移损失锥导致准捕获电子通量增强所致, 称为“条缕状”能谱<sup>[31]</sup>. 图中品红色五角星表示  $L = 1.7$ ,  $E_k = 220$  keV 的位置, 满足电子与传播角为  $60^\circ$  的台站信号在赤道处的一阶回旋共振关系<sup>[41]</sup>. 由于 DEMETER 卫星只能提供卫星高度处观测的磁场信息和密度信息, 计算回旋共振关系时采用了 IGRF 磁场模型和 Ozhogin 等<sup>[44]</sup> 的等离子体层密度模型得到赤道处背景磁场和密度值. 从图 1 中可以看到, 在不同轨道观测的“条缕状”能谱中, 五角星都位于“条缕状”

结构的中心位置. 对比不同轨道观测的“条缕状”能谱, 可以看出不同经度处观测的“条缕状”能谱通量大小以及能级范围会有所不同, 其中在台站附近观测最弱且能级范围最小 (轨道 a). 随着卫星观测位置靠近 SAA 区域, “条缕状”结构的电子能级范围逐渐增大, 通量逐渐增强. 文章后续章节中将对多个轨道观测的“条缕状”能谱进行模拟, 并分析“条缕状”能谱随经度变化呈现差异性的原因. 同时值得注意的是, 轨道 f 测量的是捕获电子, 但在能谱中也存在“条缕状”结构, 本文将在后文中对这一现象成因进行分析.

### 3 模型介绍及参数选取

#### 3.1 投掷角扩散系数的计算及参数选取

使用 Full Diffusion Code 计算准线性理论下 NWC 台站信号导致的电子弹跳平均投掷角扩散系数, 以量化台站信号对电子的散射效应<sup>[45,46]</sup>. 首先需要确定台站信号的径向分布模型, 一般认为台站信号与电子在赤道附近发生相互作用, 而 DEMETER 卫星无法观测到相应的赤道处的波动. 于是选用 Xiang 等<sup>[30]</sup> 使用范阿伦双星 6 年观测数据统计的冬季夜侧的 NWC 台站信号的径向分布模型进行计算. 因为对于  $>12$  kHz 电磁波动, 范阿伦卫星只提供单分量的电场功率谱数据, 无法确定磁层中的 NWC 台站信号传播角的大小. 前人的统计研究认为在  $L > 1.7$  的区域, 台站信号主要以导管波传播 (传播方向与地磁场磁力线夹角较小), 而  $L < 1.7$  台站信号主要以非导管波传播 (传播角较大)<sup>[23,25]</sup>. 而基于 DEMETER、范阿伦波动数据和射线追踪方法, Zhang 等<sup>[47]</sup> 表明台站信号主要是以非导管波传播. Gu 等<sup>[48]</sup> 通过对比范阿伦卫星观测的俄罗斯 Alpha 台站 (11.9 kHz) 坡印廷矢量与射线追踪结果, 也得出台站信号在磁层中主要以非导管方式传播的结论.

Ma 等<sup>[26]</sup> 通过射线追踪得到北半球发射的 20 kHz 左右台站信号传播至  $L < 2$  赤道处时, 波动传播角大小为  $50^\circ$ – $70^\circ$ . 据此, 本文计算投掷角扩散系数时, 假设赤道附近台站信号的波传播角分布模型为  $\theta_{\min} = 30^\circ$ ,  $\theta_{\max} = 80^\circ$ ,  $\theta_m = 60^\circ$ ,  $\theta_d = 20^\circ$ <sup>[13]</sup>, 采用偶极子磁场模型和 Ozhogin 等<sup>[44]</sup> 的等离子体层密度模型, 纬度范围取  $0^\circ$ – $25^\circ$ <sup>[25]</sup>. 因为内辐射带中  $L$ -shell 相同时, 由偶极子磁场模型和



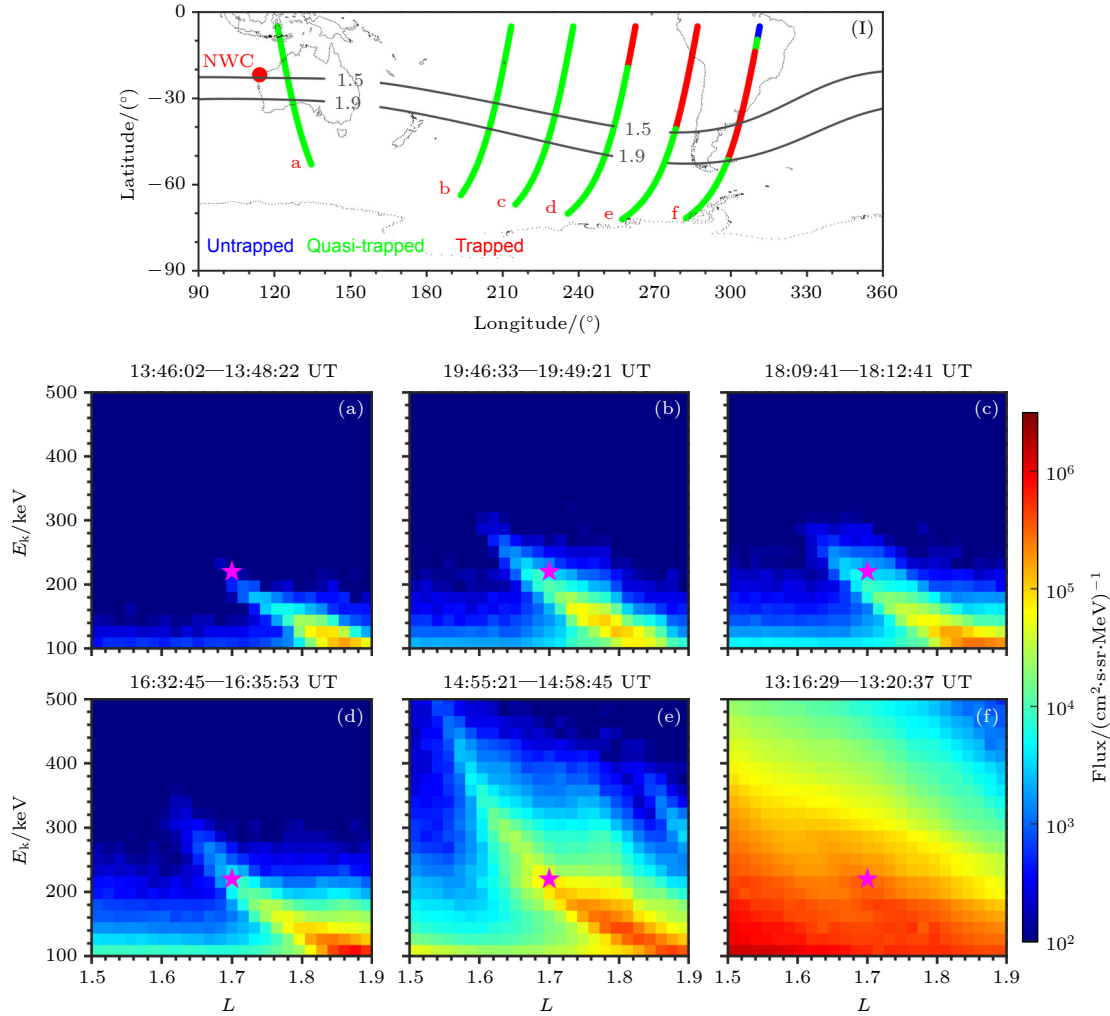


图 1 (I) 2009 年 3 月 19 日 NWC 台站位于夜侧时, DEMETER 卫星轨道在地理经纬度地图上的投影, 轨道的颜色表示卫星测量电子的类型. 蓝色表示沉降电子, 绿色表示准捕获电子, 红色表示捕获电子. 红色圆点标示出 NWC 台站的位置, 黑色实线表示  $L = 1.5$  和  $L = 1.9$  的等值线. 红色字母表示卫星轨道沿经度的分布次序; (a)–(f) (I) 中轨道 a–f 在  $L = 1.5$ – $1.9$  处观测到的  $L$ - $E_k$  能谱, 颜色表示通量的大小. 能谱中增强的电子通量源自被台站信号散射的捕获电子, 称为“条缕状”能谱. 品红色五角星表示  $L = 1.7$ ,  $E_k = 220$  keV, 满足电子与传播角为  $60^\circ$  的台站信号在赤道处的一阶回旋共振关系

Fig. 1. (I) Trajectories of the DEMETER satellite on geographic map when the NWC station was at the nightside on 19 March 2009. The trajectories are color-coded by the electron type. Blue, red, and green represent untrapped, quasi-trapped, and trapped electrons, respectively. The red dot marks the location of the NWC station, and the solid black lines indicate the contours of  $L = 1.5$  and  $L = 1.9$ , respectively. The red letters indicate the order of satellite orbits along longitude; (a)–(f) the electron spectra on  $L$ - $E_k$  plane observed by DEMETER in orbits a–f shown in (I), respectively. The enhanced electron fluxes in the spectrum source from trapped electrons scattered by the transmitter signals, which is called “wisp” spectrum. The magenta stars indicate  $L = 1.7$ ,  $E_k = 220$  keV, satisfying the first-order equatorial cyclotron resonance relationship between the electron and the transmitter signal with wave normal angle of  $60^\circ$ .

IGRF 磁场模型得到的赤道附近磁场强度近乎一致, 计算卫星电子类型时以及后文使用模型模拟时使用 IGRF 磁场模型, 是因为不同经度处局部的弹跳损失锥大小会发生变化, 故此处为了计算方便, 采用偶极子磁场模型. 将 Xiang 等<sup>[30]</sup>中统计的冬季夜侧 NWC 台站信号电场功率谱密度转换成相应的磁场强度, 用于计算台站信号导致的投掷角弹跳平均扩散系数<sup>[46,49]</sup>. 由于全球统计平均后的波幅

会低估这一天的台站信号强度, 故我们假设  $L = 1.7$  处的波幅为 15 pT<sup>[36]</sup>, 将上述基于 Xiang 等<sup>[30]</sup>统计结果计算得到的 NWC 台站信号的径向分布, 按照  $L = 1.7$  处放大到 15 pT 的比例整体进行放大, 得到的结果如图 2(a) 所示.

基于上述假设, 计算得到的部分扩散系数如图 2(b)–(f) 所示. 图 2(b)–(f) 中横坐标为电子的赤道投掷角, 纵坐标为电子能量, 颜色表示电子弹

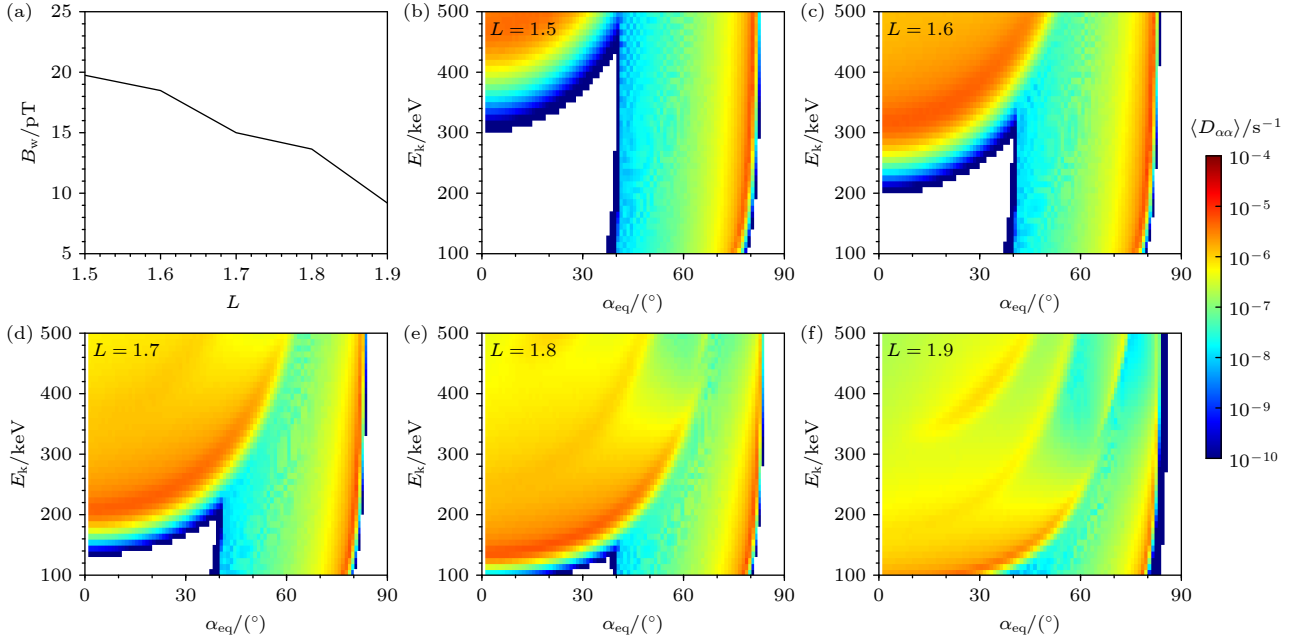


图 2 (a) 计算使用的 NWC 台站信号幅值随  $L$  的变化; (b)–(f) 中心传播角为  $60^\circ$  的台站信号在  $L = 1.5$ – $1.9$  引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ , 横轴为电子的赤道投掷角  $\alpha_{\text{eq}}$ , 纵轴为电子能量  $E_k$ , 颜色表示  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  的大小

Fig. 2. (a) The amplitudes of the NWC transmitter signals used for calculation; (b)–(f) the color-coded bounce-averaged pitch angle diffusion coefficients  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  as a function of equatorial pitch angle  $\alpha_{\text{eq}}$  and electron kinetic energy  $E_k$  induced by NWC transmitter signals with  $60^\circ$  central wave normal angle at  $L = 1.5$ – $1.9$ , respectively.

跳平均投掷角扩散系数的大小. 可以看到在  $L = 1.6$  处 (图 2(c)), 电子弹跳平均投掷角扩散系数分为两部分: 较低投掷角  $> 200$  keV 部分为回旋共振导致的投掷角扩散系数, 较高投掷角部分则是由朗道共振导致的投掷角扩散系数. 回旋共振部分投掷角扩散系数的峰值集中在约 300 keV, 随着投掷角的增大, 扩散系数峰值对应的能量也在增加, 扩散系数峰值约为  $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ . 随着  $L$  值增加, 扩散系数峰值对应的能量减小, 同时由于波幅的减小, 扩散系数的值也在减小. 在  $L = 1.9$  处, 扩散系数峰值约为  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . 其中图 2(e) 与图 2(f) 中存在多条扩散系数的峰值纹路, 从下至上分别对应着 1 阶、-1 阶、2 阶回旋共振.

### 3.2 Drift-Diffusion-Source 模型介绍

Xiang 等 [50] 提出了一种新的模型用以模拟内辐射带电子通量, 称为 Drift-Diffusion-Source 模型. 该模型考虑了辐射带中多种物理机制共同作用下, 电子通量的演化过程. 模型包含了电子在更接近真实磁场的 IGRF 磁场模型中的漂移过程、由库仑碰撞和波粒相互作用导致电子的扩散过程, 以及宇宙射线反照中子衰变 (CRAND) 过程. CRAND 是指源自超新星爆发的高能宇宙线与地球上层大

气相互作用生成反照中子, 反照中子又衰变生成质子、电子和反中微子的过程. CRAND 是平静时期内辐射带内缘的高能电子的主要来源机制 [42,51,52]. 基于该模型, Xiang 等 [53] 发现平静时期槽区电子通量是 CRAND 过程和波动散射达到动态平衡的结果, 表明平静时期 CRAND 过程生成电子通量的贡献不容忽视. 模型方程如下式所示:

$$\frac{\partial J}{\partial t} + w_d \frac{\partial J}{\partial \phi} = \frac{1}{G_0(\alpha_{\text{eq}}) \sin(2\alpha_{\text{eq}})} \frac{\partial}{\partial \alpha_{\text{eq}}} \left[ G_0(\alpha_{\text{eq}}) \sin(2\alpha_{\text{eq}}) \langle D_{\alpha\alpha} \rangle \frac{\partial J}{\partial \alpha_{\text{eq}}} \right] + S_e, \quad (1)$$

其中  $J$  是电子通量;  $w_d$  是弹跳平均的漂移频率;  $\phi$  是地磁经度;  $\alpha_{\text{eq}}$  是电子赤道投掷角;  $G_0(\alpha_{\text{eq}}) = \frac{v\tau_b}{2}$ ,  $\tau_b$  是弹跳周期,  $v$  是电子速度.  $S_e$  是指 CRAND 过程生成电子速率, 表达式如下:

$$S_e \cong \frac{q_0 L^2 \varphi(E) v}{\sin(\alpha_{\text{eq}})}, \quad (2)$$

其中  $q_0 = 1.0 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ ster}^{-1}$  [52];  $\varphi(E)$  是中子  $\beta$  衰变能谱 [54]. 相较于传统的考虑偶极子场的模型, Drift-Diffusion-Source 模型可以更直观地展示电子通量在漂移过程中的动态变化, 尤其是准捕获电子通量的变化.

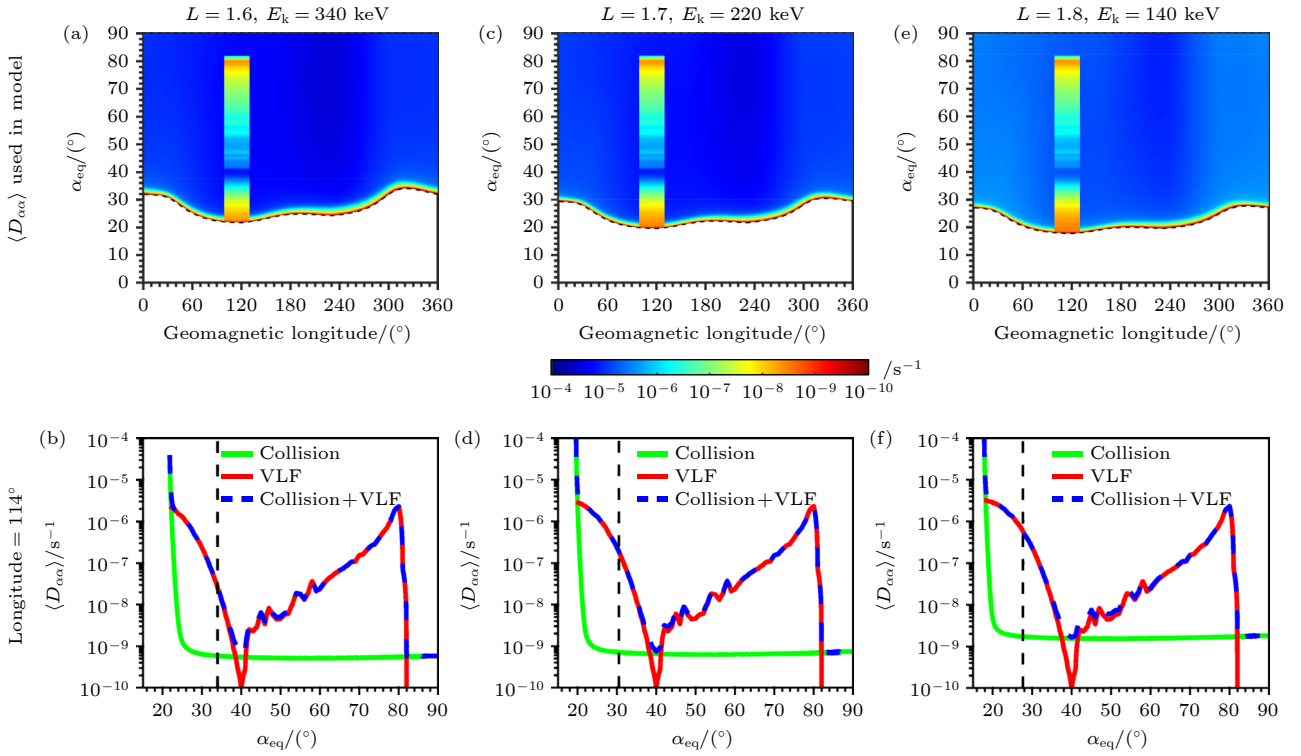


图 3 (第一行) 模型中采用的电子的弹跳平均投掷角扩散系数  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ , 从左至右分别为  $L = 1.6$  处 340 keV 电子、 $L = 1.7$  处 220 keV 电子、 $L = 1.8$  处 140 keV 电子的  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ , 横坐标表示地磁经度, 纵坐标表示赤道投掷角, 颜色表示扩散系数的大小, 黑色虚线表示使用 IGRF 磁场模型计算的局地弹跳损失锥大小, VLF 台站信号作用经度范围为  $[99^\circ, 129^\circ]$ ; (第二行) 经度  $114^\circ$  处, 不同机制导致的扩散系数随投掷角的变化, 黑色虚线表示相应  $L$  处的漂移损失锥的大小

Fig. 3. (The first line) The color-coded  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  as a function of  $\alpha_{eq}$  and geomagnetic longitude used in the model, from left to right, is respectively 340 keV at  $L = 1.6$ , 220 keV at  $L = 1.7$  and 140 keV at  $L = 1.8$ . The black dashed lines represent the local bounce loss cone calculated based on IGRF model, and the longitude range of VLF transmitter signal is  $[99^\circ, 129^\circ]$ . (The second line)  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  as a function of  $\alpha_{eq}$  at longitude =  $114^\circ$ . The black dash lines represent the drift loss cone at the corresponding  $L$ .

图 3 的第一行是针对不同  $L$  处不同能级的电子, 模型采用的投掷角扩散系数, 横坐标为地磁经度, 纵坐标表示赤道投掷角, 颜色表示扩散系数的大小. 黑色虚线表示使用 IGRF 磁场模型计算的局地弹跳损失锥 (BLC), 最大值即为漂移损失锥 (DLC). 从左至右分别对应的是  $L = 1.6$  处 340 keV,  $L = 1.7$  处 220 keV,  $L = 1.8$  处 140 keV 电子的投掷角扩散系数,  $L$  与电子能级满足在赤道处与传播角为  $60^\circ$  台站信号的一阶回旋共振关系. 图 3 的第二行展示了第一行图中经度  $114^\circ$  处, 不同机制导致扩散系数大小随投掷角的分布, 绿色实线表示库伦碰撞导致的投掷角扩散系数, 红色的实线是 VLF 波动导致的投掷角扩散系数, 蓝色的虚线是二者之和, 黑色虚线表示相应  $L$  处 DLC 的大小.

以图 3(a) 为例, 扩散系数分为两个部分: 一部分是经度  $[99^\circ, 129^\circ]$  处投掷角扩散系数较大的区域, 即 NWC 台站经度  $\pm 15^\circ$  的范围, 表示的是 VLF 台站信号散射作用范围, 扩散系数的大小对应的是

台站信号在  $L = 1.6$  处引起的 340 keV 电子投掷角扩散系数; 另一部分是台站信号影响范围外电子与大气分子发生库仑碰撞引起的电子投掷角扩散系数<sup>[55]</sup>, 可以看出库仑碰撞导致的投掷角扩散系数在 BLC 边缘处的值很大, 随着投掷角增加扩散系数急剧减小. 由图 3(b) 可以看到 VLF 台站信号导致的扩散系数最大约为  $3 \times 10^{-6} s^{-1}$ , 随着投掷角的增加而减小. 在高投掷角处较大的扩散系数是朗道共振导致的. BLC 边缘处碰撞导致的投掷角扩散系数远大于台站信号散射引起的电子投掷角扩散系数, 而在其他投掷角处, 台站信号导致的投掷角扩散系数更大. 对比不同  $L$  处的电子投掷角扩散系数, 可以看到局地 BLC 附近扩散系数值相近, 且随着  $L$  的增加局地 BLC 减小, 但不同  $L$  的 DLC 处扩散系数值不同.

图 4 展示了模型模拟电子通量演化过程. 从上至下每一行分别为不同模拟步长时  $L = 1.6$  处 340 keV,  $L = 1.7$  处 220 keV,  $L = 1.8$  处 140 keV

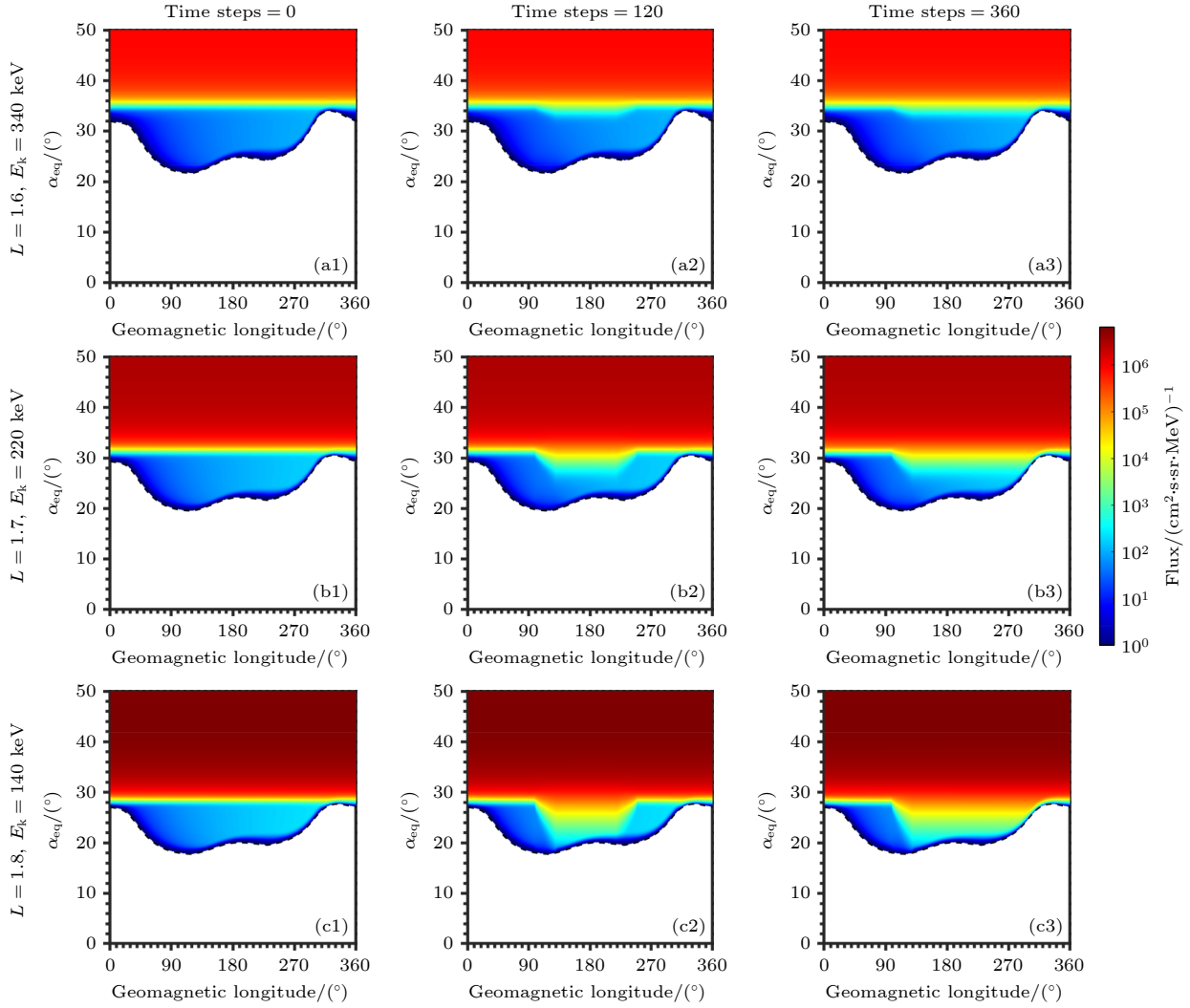


图4 (从上至下) 每一行分别为模型模拟  $L = 1.6$  处 340 keV,  $L = 1.7$  处 220 keV,  $L = 1.8$  处 140 keV 电子漂移过程中, 通量随经度和赤道投掷角的分布, 颜色表示电子通量的大小. (从左至右) 每一列分别为模型模拟步长为 0, 120, 360 时的结果, 1 步长表示电子漂移经度  $1^\circ$  所需的时间,  $L = 1.6$  处 340 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 16.8 s,  $L = 1.7$  处 220 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 23 s,  $L = 1.8$  处 140 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 32.5 s

Fig. 4. (From top to bottom) Each row is the color-coded simulated electron fluxes as function of longitude and  $\alpha_{eq}$  during the drift process. (From left to right) Each column represents simulated time step is 0, 120 and 360 respectively. 1 step represents the time required for electron drift  $1^\circ$  longitude. 1 step for 340 keV electron at  $L = 1.6$  is about 16.8 s, for 220 keV electron at  $L = 1.7$  is about 23 s, and for 140 keV electron at  $L = 1.8$  is about 32.5 s.

电子通量随经度和赤道投掷角的分布, 颜色表示电子通量的大小. 从左至右每一列模拟步长分别为 0, 120, 360. 模型模拟的 1 步长表示电子在经度上漂移  $1^\circ$  需要的时间 ( $L = 1.6$  处 340 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 16.8 s,  $L = 1.7$  处 220 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 23 s,  $L = 1.8$  处 140 keV 电子漂移经度  $1^\circ$  约为 32.5 s).

首先看  $L = 1.6$  处, 340 keV 电子通量模拟结果 (图 4(a1)—(a3)). 图 4(a1) 即为模拟的初始条件. 图 4(a1) 中赤道投掷角大于 DLC 的为捕获电子, 赤道投掷角大于 BLC 小于 DLC 的为准捕获

电子. 显然捕获电子通量较大, 而准捕获电子通量较小. 在无台站信号散射时, 准捕获电子通量主要来源于 CRAND, 且准捕获电子的通量随着电子向东漂移逐渐累积, 直至漂移到 SAA 区域时损失到大气中. BLC 内的通量置零, 表示粒子弹跳到 100 km 高度处时会损失在大气中. 由于低轨卫星只能提供单个赤道投掷角对应的电子通量, 而模拟需要电子通量的全投掷角分布, 于是首先假设捕获电子通量的投掷角分布符合  $f = f_0 \sin \alpha_{eq}$ , 其中  $f_0$  是指赤道投掷角为  $90^\circ$  的电子通量. 在考虑长时间 CRAND 和大气碰撞模拟得到较为稳定的电子



投掷角分布后, 按照卫星观测捕获电子赤道投掷角处对应的通量与卫星观测的比值, 将电子通量的投掷角分布整体放大, 得到捕获电子通量的投掷角初始分布<sup>[53]</sup>. 初始分布中 (图 4(a1)) 所有经度上捕获电子通量分布是一样的, 而准捕获电子通量分布通过一个漂移周期内 CRAND 生成电子通量得到. 图 4(a2) 是模型模拟了 120 个时间步长后的电子通量分布, 可以看到在经过台站信号作用的区域后 (经度范围  $99^\circ$ — $129^\circ$ ), 准捕获电子通量增加. 由于投掷角扩散系数不够强, 准捕获电子通量并未被扩散到较低的赤道投掷角处. 值得注意的是, 台站信号只存在于经度  $[99^\circ, 129^\circ]$  范围, 在图 4(a3) 中可以看到被台站信号散射的电子, 会持续向东漂移直至损失在 SAA 区域.

对比不同  $L$  处的电子散射过程, 可以看到台站信号对  $L = 1.8$  处 140 keV 电子的散射更强, 电子被扩散到更低的投掷角. 从图 3 中可知三种情况下, BLC 附近的台站信号扩散系数是相近的, 图 4 中电子被扩散的程度各不相同: 台站信号对  $L = 1.6$  处 340 keV 电子扩散最弱, 对  $L = 1.8$  处 140 keV 电子扩散最强. 导致这种现象的原因有两个: 一是电子的初始通量大小不同,  $L = 1.6$  处 340 keV 电子初始通量最小, 而  $L = 1.8$  处 140 keV 电子初

始通量最大; 二是不同情况下 DLC 处扩散系数大小不同, 对比图 3 中右列中 DLC 附近扩散系数的大小, 可以看出  $L = 1.6$  处 340 keV 电子的扩散系数在 DLC 附近最小,  $L = 1.8$  处 140 keV 电子的扩散系数在 DLC 附近最大.

在下一节中, 将通过模型模拟台站信号对不同  $L$ 、不同能量电子的散射效应, 提取卫星观测经度和投掷角对应的模拟值得到模拟的能谱<sup>[36,50,52]</sup>, 并对不同经度处的能谱进行比较分析.

## 4 模拟结果及分析

### 4.1 中心传播角为 $60^\circ$ 的模拟结果

依照第 3 节中描述的方法, 模拟的多个轨道观测的“条缕状”能谱如图 5 所示. 图 5(a)—(f) 模拟结果与图 1(a)—(f) 的卫星观测能谱一一对应, 品红色的五角星标示出  $L = 1.7$ ,  $E_k = 220$  keV 位置, 与图 1 中相同. 对比图 5 和图 1, 可以看出模拟结果基本复现了观测的“条缕状”能谱特征: 散射电子能级随着  $L$  的增加而减小, 且随着卫星观测轨道与 SAA 区域距离减小, “条缕状”结构的能级范围逐渐增加、通量逐渐增强. 导致这一特征的原因是在不同经度处, 卫星观测的电子赤道投掷角发生

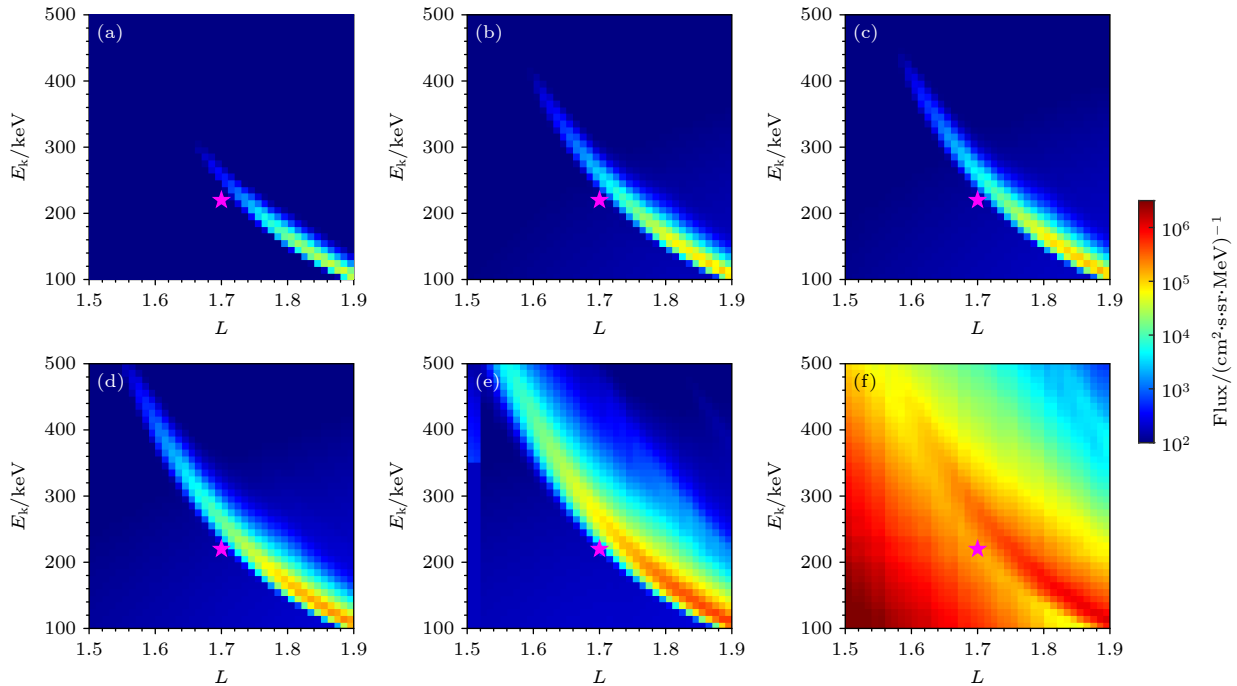


图 5 假设台站信号中心传播角为  $60^\circ$  时, 模拟得到的  $L$ - $E_k$  能谱, 颜色表示电子通量的大小, 与图 1(a)—(f) 的卫星观测能谱一一对应  
Fig. 5. Simulated  $L$ - $E_k$  spectra assuming the central wave normal angle of the NWC transmitter signal is  $60^\circ$ , which correspond one to one with Figure 1(a)—(f).



了变化. 图 6 展示了  $L = 1.7$  处卫星在不同经度观测的电子赤道投掷角大小, 次序与图 1 中展示的观测轨道一一对应. 黑色虚线表示使用 IGRF 磁场模型计算的局地弹跳损失锥 (BLC), 红色虚线表示最大局地弹跳损失锥, 即漂移损失锥 (DLC). 可以看出卫星轨道接近 SAA 区域的过程中, 卫星观测的电子赤道投掷角的大小逐渐接近 DLC. 结合图 4 可以看出, 台站信号不能将电子散射至较小的赤道投掷角时, 卫星在台站附近无法观测到相应增强的准捕获电子通量. 而靠近 SAA 区域, 卫星观测的赤道投掷角增大, 便能观测到被台站信号散射进 DLC 的准捕获电子.

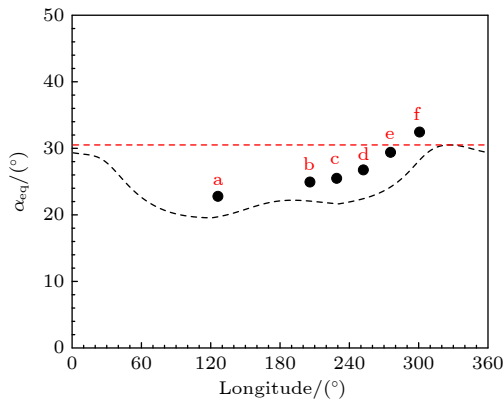


图 6 卫星不同轨道在  $L = 1.7$  处观测的电子赤道投掷角, 黑色虚线表示使用 IGRF 磁场模型计算的局地弹跳损失锥大小, 红色虚线表示漂移损失锥大小

Fig. 6. The  $\alpha_{eq}$  of electrons observed in different orbits of the satellite at  $L = 1.7$ , the black dashed line represents the local bounce loss cone calculated using the IGRF magnetic field model, and the red dashed line represents the drift loss cone.

值得注意的是轨道 a—e 观测的电子赤道投掷角在 DLC 内, 为准捕获电子, 而轨道 f 观测的电子赤道投掷角大于 DLC, 为捕获电子. 之所以捕获电子中可以观测到“条缕状”能谱, 是因为碰撞导致了 DLC 附近电子通量减小 (如图 4 第 1 列所示), 而轨道 f 观测电子投掷角在 DLC 外边缘, 台站信号将较高投掷角电子扩散至较低的投掷角后, 使得 DLC 附近电子通量增加, 故在捕获电子通量中也能观测到“条缕状”结构.

由于图 5 中品红色五角星位于模拟“条缕状”结构的下方, 表明目前采用的波动模型散射电子能级高于实际观测值. 如果改变计算参数减小电子的共振能量, 将可以使模拟结果与观测更加吻合. 根

据回旋共振公式, 电子共振能量与波动传播角、频率、背景密度等参数相关 [41], 而台站信号在磁层中是频率范围固定的窄带信号, 故在后文中只讨论传播角和背景密度对模拟结果的影响.

## 4.2 中心传播角为 $40^\circ$ 的模拟结果

首先分析波动传播角对模拟结果的影响, 保持其他参数不变. 因为波传播角减小时, 电子共振能量也会减小 [41], 故本节减小波动模型的中心传播角进行模拟. 图 7 为中心传播角为  $40^\circ$  时计算得到的电子弹跳平均投掷角扩散系数, 格式同图 3. 传播角模型相应更改为  $\theta_{\min} = 0^\circ$ ,  $\theta_{\max} = 80^\circ$ ,  $\theta_m = 40^\circ$ ,  $\theta_d = 20^\circ$  [13], 其他参数设置相同. 对比图 3 和图 7 可以看出, 当台站信号波幅相同时, 中心传播角减小, 不仅能导致共振能量减小, 计算的波动扩散系数也会增大. 图 8 展示了当波动中心传播角为  $40^\circ$  时模拟的结果, 品红色五角星位置与图 1 中一致. 从图 8 可以看到当波动中心传播角为  $40^\circ$  时, 模拟结果中品红色五角星位置位于“条缕状”结构中心位置, 但模拟的“条缕状”结构的能量范围和通量与观测相比偏大. 比如图 1(a) 的观测能谱中“条缕状”结构的尖端位置在  $L = 1.68$  处 240 keV, 而图 8(a) 的模拟能谱中“条缕状”结构的尖端位置在  $L = 1.58$  处 360 keV. 比较图 5 和图 8 可以看出, 相同  $L$  处波动中心传播角为  $40^\circ$  时模拟的“条缕状”结构能量范围和通量更大.

## 4.3 背景密度增大 1.3 倍模拟结果

接着分析背景密度对模拟结果的影响, 保持其他参数不变. 背景密度增加会导致电子共振能量减小 [56], 于是增大 Ozogin 等 [44] 的密度模型值进行模拟. 图 9 为将背景密度扩大 1.3 倍后计算得到的电子弹跳平均投掷角扩散系数. 对比图 3 和图 9 可以看出, 背景密度增加后, 相同的  $L$  处计算的扩散系数的最小共振能量减小. 图 10 为将背景模型密度扩大 1.3 倍时的模拟结果. 从图 10 可以看到密度增大为模型值的 1.3 倍时, 模拟结果中品红色五角星位于“条缕状”结构的中心, 与观测值基本一致. 对比图 5 和图 10 可以看出, 密度的改变不会导致模拟的“条缕状”结构的长度发生很明显的改变, 但密度增大后, 低能级处电子通量增加, 与观测值更为接近. 表明背景密度变大, 会导致台站信号对低能级电子扩散更强.

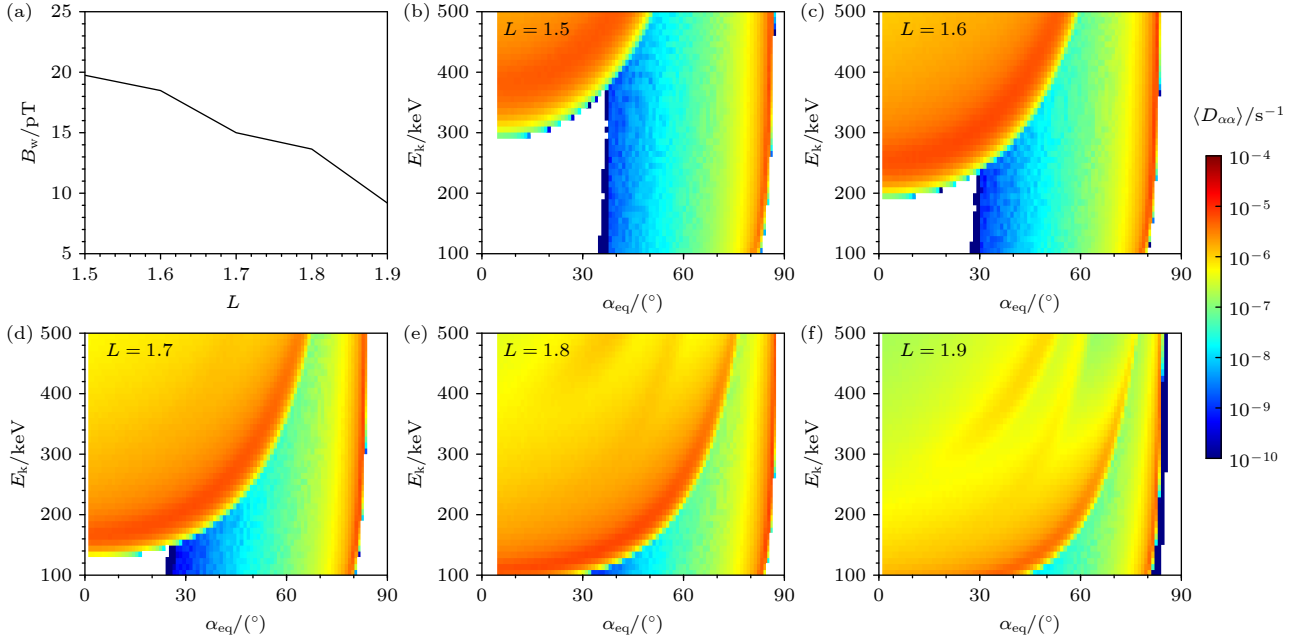


图 7 (a) 计算使用的 NWC 台站信号幅值; (b)–(f) 中心传播角为  $40^\circ$  的台站信号在  $L = 1.5\text{--}1.9$  引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ , 横轴为电子的赤道投掷角  $\alpha_{\text{eq}}$ , 纵轴为电子能量  $E_k$ , 颜色表示  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  的大小

Fig. 7. (a) The amplitude of the NWC transmitter signals used for calculation; (b)–(f) the color-coded bounce-averaged pitch angle diffusion coefficients  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ ; as a function of equatorial pitch angle  $\alpha_{\text{eq}}$  and electron kinetic energy  $E_k$  induced by NWC transmitter signals with  $40^\circ$  central wave normal angle at  $L = 1.5\text{--}1.9$ , respectively.

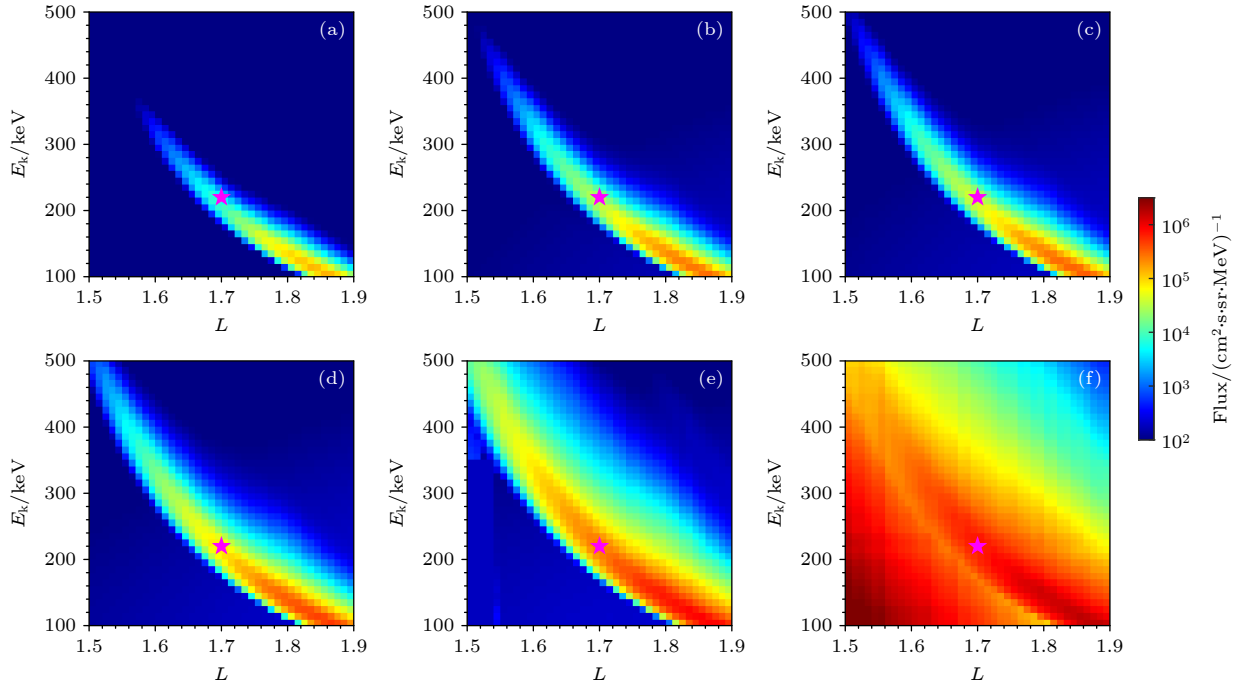


图 8 假设台站信号中心传播角为  $40^\circ$  时, 模拟得到的  $L\text{--}E_k$  能谱, 颜色表示电子通量的大小

Fig. 8. Simulated  $L\text{--}E_k$  spectra assuming the central wave normal angle of the NWC transmitter signal is  $40^\circ$ .

台站信号导致的电子能量扩散系数比投掷角扩散系数值小近 2 个数量级<sup>[26]</sup>, 作用较小, 且本文模拟的是准捕获电子通量, 这些电子在一个漂移周期内就会损失在南大西洋异常区, 能量散射作用在

这么短时间产生的效果十分微弱, 因此本文模拟中没有考虑. 由以上的模拟结果可以看出, 尽管模拟过程中各参数采取的是较为简单的模型假设, 但调整波动传播角或背景密度值后, 模拟能谱与卫星观

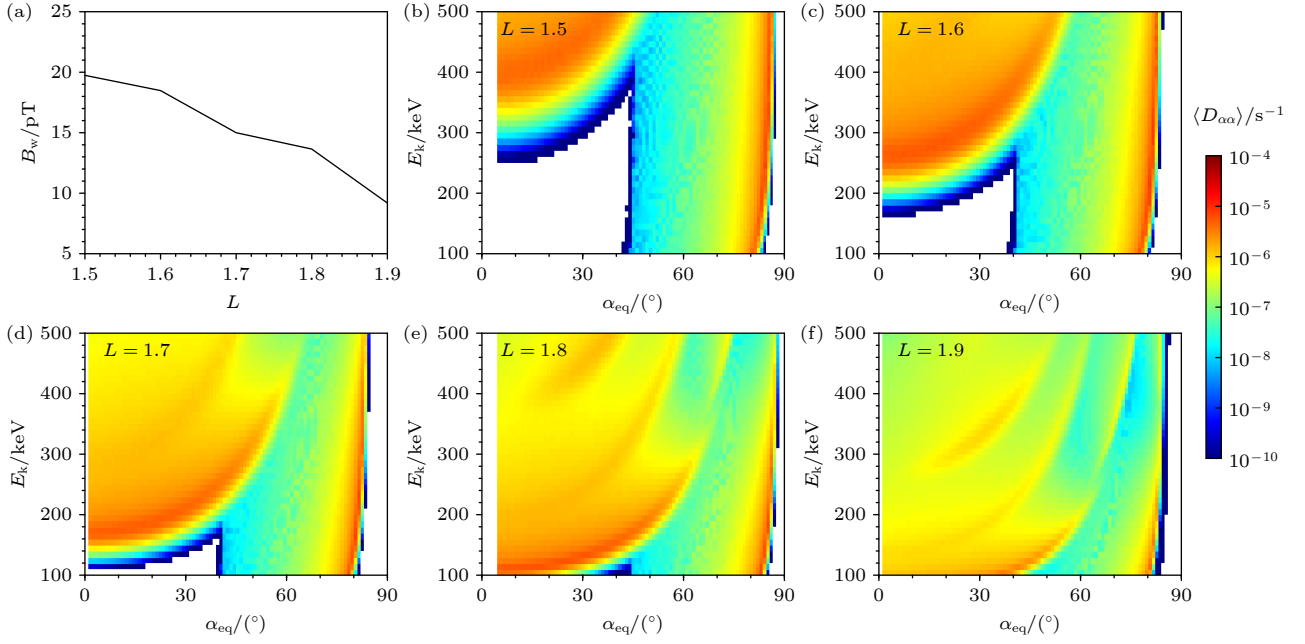


图 9 (a) 计算使用的 NWC 台站信号幅值; (b)–(f) 背景密度扩大 1.3 倍之后, 中心传播角为  $60^\circ$  的台站信号在  $L = 1.5$ – $1.9$  引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ , 横轴为电子的赤道投掷角  $\alpha_{eq}$ , 纵轴为电子能量  $E_k$ , 颜色表示  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  的大小

Fig. 9. (a) The amplitude of the NWC transmitter signals used for calculation; (b)–(f) the color-coded bounce-averaged pitch angle diffusion coefficients  $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$  as a function of equatorial pitch angle  $\alpha_{eq}$  and electron kinetic energy  $E_k$  induced by NWC transmitter signals with  $60^\circ$  central wave normal angle at  $L = 1.5$ – $1.9$ , respectively, when the background density is enlarged by a factor of 1.3.

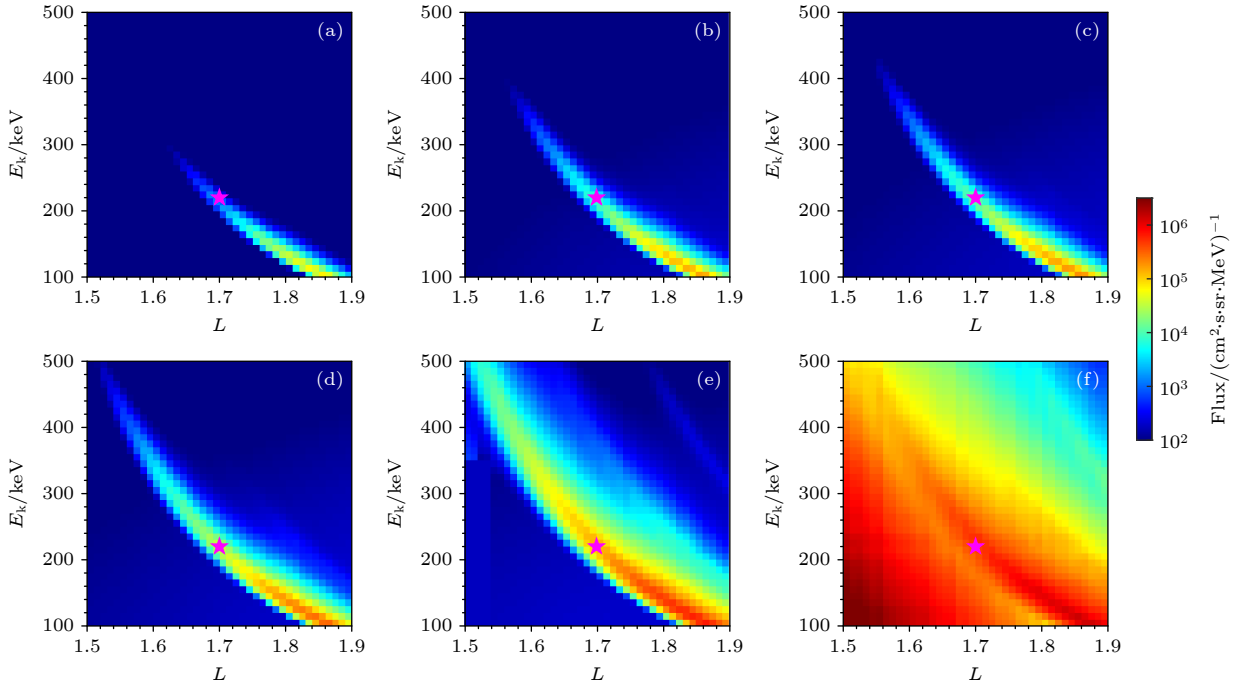


图 10 假设背景密度扩大 1.3 倍及台站信号中心传播角为  $60^\circ$  时, 模拟得到的  $L$ - $E_k$  能谱, 颜色表示电子通量的大小

Fig. 10. Simulated  $L$ - $E_k$  spectra assuming the background density is enlarged by a factor of 1.3 and the central wave normal angle of the NWC transmitter signal is  $60^\circ$ .

测能谱十分接近, 不仅复现出了观测中“条缕状”能谱随经度分布的差异性, 也模拟出了捕获电子中的“条缕状”能谱, 表明目前采用的模型假设是合理

的. 若要真实评估台站信号的散射效应, 还需要更确切台站信号传播角和背景密度等参数数据. 该研究表明准线性理论和 Drift-Diffusion-Source 模型

适用于分析内辐射带中人工台站信号散射电子过程,同时也可以基于该方法评估台站信号对内辐射带电子损失的贡献.

## 5 结 论

本文基于 Drift-Diffusion-Source 模型,模拟了 DEMETER 卫星于 2009 年 3 月 19 日多个轨道观测到的 NWC 台站信号散射电子形成的“条缕状”能谱,并进行了参数化分析,模拟结果较好地复现了不同经度处观测的“条缕状”能谱的特征,得到的主要结论如下:

1) 低轨卫星观测的电子赤道投掷角会随经度发生变化,导致卫星在不同经度处观测能谱中的“条缕状”结构的能级范围及通量大小存在差异;

2) 库仑碰撞会导致漂移损失锥附近电子通量减小,台站信号的扩散作用使得损失锥附近电子通量增加,导致捕获电子中也能观测到“条缕状”能谱;

3) 对于 2009 年 3 月 19 日这天的卫星观测,假设传播角为  $60^\circ$  时,模拟“条缕状”能谱的能级高于观测值,但将传播角更改为  $40^\circ$  或将背景密度扩大为模型值的 1.3 倍时,模拟结果与观测更为接近.

本文的研究结果表明 Drift-Diffusion-Source 模型可以直观清晰地复现内辐射带电子通量的动态变化过程,揭示准捕获电子通量随经度的分布特征.结合低轨卫星观测数据,可系统研究辐射带中的波粒相互作用过程.通过定量分析台站信号对电子的散射效应和“条缕状”能谱的形成过程,可以加深对近地空间波粒相互作用的理解,为发展人工影响辐射带技术提供重要依据.

## 参考文献

- [1] Baker D N, Kanekal S G, Hoxie V C, Henderson M G, Li X, Spence H E, Elkington S R, Friedel R H W, Goldstein J, Hudson M K, Reeves G D, Thorne R M, Kletzing C A, Claudepierre S G 2013 *Science* **340** 186
- [2] Dong J, Xiang Z, Ni B, Liu Y 2023 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **128** e2023JA031869
- [3] Guo D, Xiang Z, Ni B, Cao X, Fu S, Zhou R, Gu X, Yi J, Guo Y, Jiao L 2021 *Geophys. Res. Lett.* **48** e2021GL095714
- [4] Guo D, Xiang Z, Ni B, Jin T, Zhou R, Yi J, Liu Y, Dong J 2023 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **128** e2023JA031407
- [5] Tang C L, Xie X J, Ni B, Su Z P, Reeves G D, Zhang J C, Baker D N, Spence H E, Funsten H O, Blake J B, Wygant J R, Dai G Y 2018 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **123** 4895
- [6] Yang X, Ni B, Yu J, Zhang Y, Zhang X, Sun Y 2017 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122** 6255
- [7] Zhu Q, Cao X, Gu X, Ni B, Xiang Z, Fu S, Summers D, Hua

- M, Lou Y, Ma X, Guo Y, Guo D, Zhang W 2021 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA029057
- [8] Cao X, Lu P, Zhu Q, Ma X, Ni B B 2023 *Chin. J. Geophys.* **66** 1796 (in Chinese) [曹兴, 陆鹏, 朱琪, 马新, 倪彬彬 2023 地球物理学报 **66** 1796]
- [9] Carlsten B E, Colestock P L, Cunningham G S, Delzanno G L, Dors E E, Holloway M A, Jeffery C A, Lewellen J W, Marksteiner Q R, Nguyen D C, Reeves G D, Shipman K A 2019 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 2045
- [10] Golkowski M, Harid V, Hosseini P 2019 *Front. Astron. Space Sci.* **6** 2
- [11] Johnston W R, Ginet G P, Starks M J, McCollough J P, Sanchez J C, Song P, Galkin I A, Inan U S, Lauben D S, Tu J, Reinisch B W, Linscott I R, Roche K, Stelmash S, Allgeier S, Lambour R, Schoenberg J, Gillespie W, Farrell W M, Xapsos M A, Roddy P A, Lindstrom C D, Pedinotti G F, Huston S L, Albert J M, Sinclair A J, Davis L D, Carilli J A, Cooke D L, Parker C W 2023 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **128** e2022JA030771
- [12] Claudepierre S G, Ma Q, Bortnik J, O'Brien T P, Fennell J F, Blake J B 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2019GL086056
- [13] Hua M, Li W, Ni B, Ma, Q., Green, A., Shen, X., Claudepierre S G, Bortnik J, Gu X, Fu S, Xiang Z, Reeves G D 2020 *Nat. Commun.* **11** 4847
- [14] Hua M, Bortnik J, Ma Q, Bernhardt P A 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** e2022GL099258
- [15] Ni B, Hua M, Gu X, Fu S, Xiang Z, Cao X, Ma X 2022 *Sci. China, Ser. D Earth Sci.* **65** 391
- [16] Ni B, Summers D, Xiang Z, Dou, X, Tsurutani B T, Meredith N P, Dong J, Chen L, Reeves G D, Liu X, Tao X, Gu X, Ma X, Yi J, Fu S, Xu W 2023 *J. Geophys. Res. Space Physics* **128** e2023JA031325
- [17] Abel B, Thorne R M 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 2385
- [18] Albert J M, Starks M J, Selesnick R S, Ling A G, O'Malley S, Quinn R A 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2019JA027030
- [19] Graf K L, Inan U S, Piddychiy D, Kulkarni P, Parrot M, Sauvaud J A 2009 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **114** A07205
- [20] Imhof W L, Reagan J B, Voss H D, Gaines E E, Datlowe D W, Mobilia J, Helliwell R A, Inan U S, Katsufakis J, Joiner R G 1983 *Geophys. Res. Lett.* **10** 361
- [21] Koons H C, Edgar B C, Vampola A L 1981 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **86** 640
- [22] Li L Y, Wang Z Y, Yu J, Cao J B 2021 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA028879
- [23] Clilverd M A, Rodger C J, Gamble R, Meredith N P, Parrot M, Berthelier J J, Thomson N R 2008 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **113** A04211
- [24] Wang Y L, Xiang Z, Zeren Z M, Ni B B, Liu Y X Z, Zhang X M, Ouyang X Y, Wu Y Y, Shen X H 2023 *Chin. J. Geophys.* **66** 4451 (in Chinese) [王亚璐, 项正, 泽仁志玛, 倪彬彬, 刘阳希子, 张学民, 欧阳新艳, 吴迎燕, 申旭辉 2023 地球物理学报 **66** 4451]
- [25] Ma Q, Mourenas D, Li W, Artemyev A, Thorne R M 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 6483
- [26] Ma Q, Gu W, Claudepierre S G, Li W, Bortnik J, Hua M, Shen X C 2022 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **127** e2022JA030349
- [27] Meredith N P, Horne R B, Clilverd M A, Ross J P J 2019 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **124** 5246
- [28] Ross J P J, Meredith N P, Glauret S A, Horne R B, Clilverd M A 2019 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **124** 5260
- [29] Wang Y L, Zhang X M, Shen X H 2018 *Earth Planet. Phys.* **2** 538



- [30] Xiang Z, Lin X H, Chen W, Wang Y, Lu P, Gong W Y, Ma W C, Hua M, Liu Y X Z 2021 *Chin. J. Geophys.* **64** 3860 (in Chinese) [项正, 林显浩, 陈薇, 王勇, 陆鹏, 龚文颖, 马文琛, 花漫, 刘阳希子 2021 *地球物理学报* **64** 3860]
- [31] Sauvaud J-A, Maggiolo R, Jacquey C, Parrot M, Berthelier J-J, Gamble R J, Rodger C J 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L09101
- [32] Gamble R J, Rodger C J, Clilverd M A, Sauvaud J-A, Thomson N R, Stewart S L, McCormick R J, Parrot M, Berthelier J-J 2008 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **113** A10211
- [33] Li X, Ma Y, Wang P, Wang H, Lu H, Zhang X, Huang J, Shi F, Yu X, Xu Y, Meng X, Wang H, Zhao X, Parrot M 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A04201
- [34] Vampola A L, Kuck G A 1978 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **83** 2543
- [35] Selesnick R S, Albert J M, Starks M J 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 628
- [36] Liu Y, Xiang Z, Ni B, Li X, Zhang K, Fu S, Gu X, Liu J, Cao X 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** e2021GL097443
- [37] Parrot M 2006 *Planet. Space Sci.* **54** 411
- [38] Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, Treilhou J P, Jacquey C, Cros A, Coutelier J, Rouzaud J, Penou E, Gangloff M 2006 *Planet. Space Sci.* **54** 502
- [39] Li X, Schiller Q, Blum L, Califf S, Zhao H, Tu W, Turner D L, Gerhardt D, Palo S, Kanekal S, Baker D N, Fennell J, Blake J B, Looper M, Reeves G D, Spence H 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 6489
- [40] Tu W, Selesnick R, Li X, Looper M 2010 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **115** A07210
- [41] Hu J, Xiang Z, Ma X, Liu Y, Dong J, Guo D, Ni B 2024 *Space Weather* **22** e2023SW003827
- [42] Zhang K, Li X, Xiang Z, Khoo L Y, Zhao H, Looper M D, Schiller Q, Temerin M A, Sauvaud J A 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2020JA028086
- [43] Hu L F, Xiang Z, Gu X D, Ni B B, Zhang X X, Guo J G, Zhang X G, Zhu C B, Guo D Y, Fu S, Liu Y X Z, Dong J H, Zhao Y W 2023 *Chin. J. Geophys.* **66** 2252 (in Chinese) [胡立凡, 项正, 顾旭东, 倪彬彬, 张效信, 郭建广, 张贤国, 朱昌波, 郭德宇, 付松, 刘阳希子, 董俊虎, 赵怡雯 2023 *地球物理学报* **66** 2252]
- [44] Ozhogin P, Tu J, Song P, Reinisch B W 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A06225
- [45] Ni B, Thorne R M, Shprits Y Y, Bortnik J 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L11106
- [46] Ni B, Thorne R M, Meredith N P, Shprits Y Y, Horne R B 2011 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **116** A10207
- [47] Zhang Z, Chen L, Li X, Xia Z, Heelis R A, Horne R B 2018 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **123** 5528
- [48] Gu W, Chen L, Xia Z, Horne R B 2021 *Geophys. Res. Lett.* **48** e2021GL093987
- [49] Liu Y X Z, Xiang Z, Guo J G, Gu X D, Fu S, Zhou R X, Hua M, Zhu Q, Yi J, Ni B B 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 149401 [刘阳希子, 项正, 郭建广, 顾旭东, 付松, 周若贤, 花漫, 朱琪, 易娟, 倪彬彬 2021 *物理学报* **70** 149401]
- [50] Xiang Z, Li X, Temerin M A, Ni B, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2020 *a J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2019JA027678
- [51] Li X, Selesnick R, Schiller Q, Zhang K, Zhao H, Baker D N, Temerin M A 2017 *Nature* **552** 382
- [52] Xiang Z, Li X, Selesnick R, Temerin M A, Ni B, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 1919
- [53] Xiang Z, Li X, Ni B, Temerin M A, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2020 *b J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2020JA028042
- [54] Selesnick R S 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 2912
- [55] Selesnick R S 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A08218
- [56] Reidy J A, Horne R B, Glauert S A, Clilverd M A, Meredith N P, Rodger C J, Ross J P, Wong J 2024 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **129** e2023JA031641

# Simulation study on “Wisp” electron spectra generated by NWC very low frequency transmitter signals\*

Liu Yang-Xi-Zi    Xiang Zheng<sup>†</sup>    Zhou Chen<sup>‡</sup>    Ni Bin-Bin    Dong Jun-Hu  
Hu Jing-Le    Wang Jian-Hang    Guo Hao-Zhi

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 13 July 2024; revised manuscript received 23 August 2024)

## Abstract

Very low frequency (VLF) signals emitted by worldwide spread ground-based man-made transmitters mainly propagate in Earth-ionospheric waveguides and are used for submarine communication. A portion of these signals penetrate the ionosphere and leak into the magnetosphere when the ionospheric electron density decreases on the nightside due to the attenuated sunlight. The VLF transmitter signals in the magnetosphere can scatter electrons with energy of several hundred keV in the inner radiation belt into the drift loss cone through cyclotron resonance. This is an important loss mechanism for electrons in the inner radiation belt and plays an important role in transferring energy and mass from magnetosphere to ionosphere. Electrons scattered by transmitter signals exhibit a “wisp” characteristic in  $L$ - $E_k$  spectrum, satisfying the first-order cyclotron resonance relationship between the electrons and the transmitter signals. The “wisp” spectrum can be clearly observed by low earth orbit satellites, presenting opportunities to study wave-particle interactions in near-Earth space. In this study, using the Drift-Diffusion-Source model, we reproduce the “wisp” spectrum formed by scattering effects of NWC transmitter signals observed by DEMETER satellite on March 19, 2009. Our simulation results suggest that the equatorial pitch angle of electrons, observed by DEMETER, varies with the longitude, resulting in distinctions in the observed “wisp” spectrum along different longitudes. Specifically, as the satellite approaches South Atlantic Anomaly (SAA) region, both the energy range and flux level of the observed “wisp” spectrum gradually increase. When the previously studied wave normal angle model (with a central wave normal angle of  $60^\circ$ ) and the background electron density model are used, the energy range of the simulated “wisp” spectra is higher than the observed value. Adjusting the central wave normal angle to  $40^\circ$  or increasing the background density by a factor of 1.3, the simulated results accord well with the observations. Our results elucidate the scattering effect of NWC transmitter signals on electrons in the radiation belt, and emphasize the importance of analyzing the formation of “wisp” spectrum for understanding wave-particle interactions in near-earth space. Additionally, the Drift-Diffusion-Source model can be used to study wave-particle interactions in the inner radiation belt, helping to develop radiation belt remediation technology.

**Keywords:** Earth’s radiation belts, wave-particle interactions, artificial very low frequency transmitter signals, electron pitch angle diffusion

**PACS:** 94.30.Xy, 4.20.wj, 94.30.Ny

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240975

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20240975

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42025404, 42188101, 42174190), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0503700), and the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB41000000).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xiangzheng@whu.edu.cn](mailto:xiangzheng@whu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [chenzhou@whu.edu.cn](mailto:chenzhou@whu.edu.cn)

NWC人工甚低频台站信号产生“条缕状”准捕获电子能谱的模拟研究

刘阳希子 项正 周晨 倪彬彬 董俊虎 胡景乐 王建行 郭浩智

Simulation study on “Wisp” electron spectra generated by NWC very low frequency transmitter signals

Liu Yang-Xi-Zi Xiang Zheng Zhou Chen Ni Bin-Bin Dong Jun-Hu Hu Jing-Le Wang Jian-Hang  
Guo Hao-Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 209401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240975

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240975>

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

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>

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>

基于驻极体材料的机械天线式低频/甚低频通信磁场传播模型

Magnetic field propagation model of low frequency/very low communication based on mechanical antenna of electret

物理学报. 2020, 69(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200314>

阵列结构下的低频信号合成方法研究

On method of composing low frequency signals based on array structures

物理学报. 2020, 69(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200501>

重离子辐射对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管低频噪声特性的影响

Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报. 2024, 73(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20221360>

等离子体对电子间相互作用的屏蔽效应研究

Plasma screening effect on electron-electron interactions

物理学报. 2023, 72(7): 073102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222339>