

基于范艾伦卫星观测数据的地球辐射带 电子能谱分布的统计分析*

王建行 项正 马新 郭德宇
董俊虎 刘阳希子 胡景乐 倪彬彬

(武汉大学空间物理系 武汉 430072)

摘要 利用范艾伦卫星 2014 年至 2018 年观测的高精度电子能谱数据, 统计分析了不同辐射带高能电子能谱类型的时空分布特征. 结果表明, 辐射带电子能谱主要被分为三类: 指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱. 指数分布能谱通常在等离子体层以外占主导地位. 幂律分布能谱通常在磁暴的主相出现在高 L 处, 并逐渐转移到低 L 处. 在地磁活动平静时期, 幂律分布能谱在高 L 处存在时间更长, 占比更多. 反转能谱在等离子体层内 $L > 2.5$ 处占主导地位, 随着等离子体层层顶升高, 反转能谱增加, 指数分布能谱减少. 在长时间的地磁活动平静年份, 辐射带电子反转能谱局地峰值 (约 2 MeV) 附近的电子通量明显较低, 反转能谱占比较少. 辐射带电子能谱类型对等离子体层层顶和地磁活动依赖性的统计分析表明, 反转能谱发生率的峰值位置约位于 $L = (L_{pp} - 2)(L_{pp}$ 为等离子体层层顶位置), 指数分布能谱发生率的峰值约位于 $L = (L_{pp} + 1.5)$, 幂律分布能谱的出现与电子的注入密切相关. 磁暴越剧烈, 反转能谱被指数分布能谱取代的 L 范围越广泛. 在平静时期, 由于等离子体嘶声的散射作用, 等离子体层层顶内的指数分布能谱被反转能谱取代. 本文给出了辐射带电子能谱类型长期的时空分布特征, 可以为辐射带动态建模和高能电子通量预报提供理论参考.

关键词 辐射带, 电子能谱, 范艾伦探测器, 地磁活动, 等离子体层层顶

中图分类号 P353

Statistical Analysis of Distributions of Electron Energy Spectra in the Earth's Radiation Belts Based on Van Allen Probes Observations

WANG Jianhang XIANG Zheng MA Xin GUO Deyu
DONG Junhu LIU Yangxizi HU Jingle NI Binbin

(Department of Space Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

* 国家自然科学基金项目 (42025404, 42188101, 42174190), 国家重点研发计划基金项目 (2022 YFF0503700), 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB41000000) 和民用航天技术预先研究项目 (D020308, D020104) 共同资助

2023-06-26 收到原稿, 2023-09-12 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The characteristics of energy spectra distributions of radiation belt electrons can help reveal the dominant physical mechanism behind the dynamics of the radiation belt. In this study, the temporal and spatial distribution characteristics of energy spectra of energetic electrons are statistically analyzed using the measurements from Van Allen probes during 2014–2018. The results show that most of the electron spectra in the radiation belt can be classified into three types: exponential, power-law and reversed spectra. The exponential spectra dominate in the outer radiation belt outside the plasmapause. The power-law spectra usually occur at higher L values and move to lower L values during geomagnetic storms. During quiet geomagnetic activity periods, the power-law energy spectra stay at the high L with longer time and higher proportion. The reversed energy spectra dominate at $L > 2.5$ inside the plasmasphere. As the increase of plasmapause locations, more reversed energy spectra occur while the proportion of the exponential energy spectra decreases. During long-term quiet periods, electron fluxes near the peak of the reversed energy spectra (about 2 MeV) are relatively low to form obvious reversed spectral. The results also show that the peak location of reversed energy spectra is about 2 L inside the plasmapause while the peak location of exponential energy spectra is about 1.5 L outside the plasmapause. Appearances of power-law energy spectra are related to substorm injections of electrons. Stronger magnetic storms produce wider L ranges where reversed energy spectra are replaced by exponential spectra. During quiet times, exponential energy spectra inside the plasmapause are replaced by reversed energy spectra due to pitch angle scattering produced by plasmaspheric hiss waves.

Key words Radiation belts, Electron energy spectra, Van Allen Probes, Geomagnetic activity, Plasmapause

0 引言

地球辐射带是位于 L -shell 约为 1.1~7 的高能粒子聚集区域, 其中高能粒子的速度接近光速, 对航天器的正常运行和宇航员的生命安全具有严重威胁^[1-7]. 自 20 世纪 50 年代辐射带被发现以来, 辐射带电子能谱的分布规律引起广泛关注^[8,9]. Pizzella 等^[10] 在 1962 年研究了内辐射带 (以下简称内带) 中 40~110 keV 捕获电子的能谱分布, 发现内带电子能谱符合幂律分布. Imhof 和 Smith^[11] 分析了 1963 年 10 月至 11 月间 0.28~4.88 MeV 电子的能谱分布, 发现外辐射带 (以下简称外带) 电子能谱符合指数分布, 且在 $L > 3$ 处的电子能谱存在显著的时间变化, 在 $L = 3 \sim 5$ 处电子能谱总体上随着 L 的增加而变硬 (电子通量随能级的增加下降得比较缓慢), 在 $L > 5$ 处电子能谱总体上随着 L 的增加而变软 (电子通量随能级的增加下降得比较迅速). Galper 等^[12] 在 1999 年研究了 1991 年 3 月 24 日的高能电子能谱, 发现 10~50 MeV 的电子能谱很好地符合幂律分布. 这些早期研究表明, 辐射带电子能谱主要表现为通量随能量的升高而快速下降, 呈现出指数分布或幂律分布.

范艾伦探测器 (Van Allen Probes) 于 2012 年

8 月发射, 包含两颗专门针对地球辐射带的探测卫星, 其测量的辐射带电子通量能量覆盖范围广、能量分辨率高, 使得对辐射带电子能谱分布的系统研究成为可能. 对于内带和槽区, Fennell 等^[13] 在 2015 年研究了范艾伦探测器的 MagEIS (电子离子磁谱仪) 仪器观测到的 0.03~4 MeV 电子能谱, 结果表明, 在内带没有观察到通量超过仪器底噪的 MeV 以上的电子, 在低 L 区域电子通量在 0.4 MeV 以上急剧下降, 在 0.1 MeV 以下相对平坦. Li 等^[14] 在 2015 年利用范艾伦探测器的数据研究了内带中的 MeV 电子分布, 并推导出了内带中 MeV 电子上限的能谱, 该上限比模型预测的下降更急剧. Jaynes 等^[15] 在 2015 年利用范艾伦探测器的 MagEIS 和 REPT (相对论电子质子望远镜) 仪器的数据, 重点研究了 2014 年 9 月 13 日至 22 日的能谱演变. 结果表明当, 活跃的太阳风作用于磁层时, 电子能谱通常可以很好地被描述为指数分布, 而当电子通量增强时, 电子能谱具有从 0.1~1 MeV 几乎平坦的通量分布. Zhao 等^[16] 在 2019 年利用范艾伦探测器的数据, 发现了在 0.1~2 MeV 的能量范围内, 高能级电子通量更多、低能级电子通量较少的观测结果, 称之为反转能谱. 这种能谱类型的形成是由等离子层嘶声波散射引发的低能级电子损失所致^[16-18].

Zhao 等^[8]挑选 2016 年与 2017 年发生的两场磁暴进行了能谱的分类, 并进一步利用 2017 年的观测数据进行了能谱的统计分析, 发现在 $L>2.5$ 处的等离子体层内, 反转能谱是最常见的能谱类型.

以往对辐射带电子能谱分布的研究大都是短期分析, 目前尚未有针对辐射带电子能谱长期演化的统计研究, 缺乏对电子能谱的长期时空分布及其与地磁指数的依赖性分析. 因此, 本文使用 2014—2018 年范艾伦卫星提供的高精度电子能谱数据, 统计不同类型电子能谱出现的时空特征, 分析辐射带电子能谱对等离子体层层顶位置、地磁活跃程度的依赖性, 探究其背后主导的物理机制.

1 辐射带电子能谱分类方法

1.1 数据来源

范艾伦探测器计划包含两颗卫星, RBSP(Radiation Belt Storm Probes)-A 与 RBSP-B 卫星. 卫星近地点位于 $1.1R_e$ (R_e 为地球半径) 左右, 远地点位于 $6R_e$ 左右, 轨道倾角 10° . 两颗卫星空间位置间隔一定的距离, 可以实现对辐射带粒子时间变化和空间变化的观测.

范艾伦探测器的两颗卫星携带着相同的仪器套件, 其中用来探测辐射带高能粒子的套件 ECT, 即高能粒子、成分以及热等离子体探测套件 (Energetic particle, Composition, and Thermal plasma suite), 提供了高质量的电子通量数据. ECT 的 MagEIS 以及 REPT 仪器, 分别测量了 $0.1\sim 4$ MeV 与 $1.8\sim 20$ MeV 的电子通量数据. 由于大于 10 MeV 电子的通量往往很低, 因此本文主要对 $0.1\sim 10$ MeV 的电子能谱进行分析与统计. 对于小于 2 MeV 的电子通量数据, 使用 MagEIS 测量的全向平均电子通量数据, 对于大于 2 MeV 的电子, 使用 REPT 测量的全向平均电子通量数据^[19,20].

范艾伦探测器粒子数据的时间分辨率为 11 s. 本文对通量数据进行 1 min 平均处理, 得到更加平滑的电子能谱, 方便进行类型判断^[8]. 值得注意的是, 大于 5 MeV 电子的通量有时会接近背景水平, 可能会受到银河宇宙射线的污染^[8], 这些数据可能会对分类结果造成干扰. 因此, 对于大于 5 MeV 的电子, 只使用通量大于 $10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$ (仪器底噪) 的数据.

1.2 电子能谱类型与分类方法

根据已有研究, 辐射带电子能谱类型可分为以下三种: 指数分布能谱^[11,15]、幂律分布能谱^[9,10,12]和反转能谱^[8,16]. 三种能谱类型如图 1 所示, 图中黑色十字符号和菱形符号分别表示来自 MagEIS 和 REPT 的数据, 灰色菱形也是来自 REPT 的数据, 但由于通量低于背景水平, 被视为无效数据.

指数分布能谱是指电子通量随着电子能级呈指数下降的趋势, 可表示为

$$j = j_0 e^{-\frac{E}{E_0}}. \quad (1)$$

其中, j 为电子通量, E 为电子能级, j_0 和 E_0 为自由参数. E_0 为指数分布能谱的特征值, E_0 越小能谱下降得越快, 能谱越软.

幂律分布能谱是指电子通量随着电子能级呈现出幂律函数下降的趋势, 可以表示为

$$j = j_0 E^{-\alpha}. \quad (2)$$

其中, j_0 和 α 为自由参数. α 为幂律分布能谱的特征值, α 越小能谱下降得越慢, 能谱越硬.

反转能谱是指电子通量随着电子能级升高呈现先下降然后上升再下降的趋势. 对于反转能谱使用幂律分布加上一个高斯分布来进行拟合, 可表示为

$$\lg(j) = \lg(j_0 E^{-\alpha}) + \lg(j_1) e^{-\frac{[\lg(E) - \lg(E_1)]^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

其中, j_0 , j_1 , α , σ 和 E_1 为自由参数. 对于反转能谱, 关注三个特征值: 能谱中极小值对应的电子能级 E_d , 能谱中极大值对应的电子能级 E_b 和极大值与极小值之间的比值 R . 值得注意的是, 能谱在 $R>3$ 时才被确定为反转能谱^[16], 可采用式 (3) 进行拟合.

为了对辐射带电子能谱进行有效分类, 本文根据范艾伦卫星电子数据建立了一套分类方法: 首先, 判断电子能谱是否为反转能谱, 如果能谱通量存在局地极小值与局地极大值, 且极大值与极小值的比值大于 3, 则该能谱被确定为反转能谱; 如果不是反转能谱, 则对该能谱分别进行幂律分布拟合与指数分布拟合, 并计算拟合结果与实际能谱之间的均方根偏差 (RMSD) 大小, 将能谱类型归于具有最小的均方根偏差的能谱. 均方根误差为

$$E_{\text{RMSD}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\lg(F_i^{\text{obs}}) - \lg(F_i^{\text{fit}})]^2}. \quad (4)$$

其中, F_i^{obs} 为范艾伦卫星观测的通量值, F_i^{fit} 为拟合的

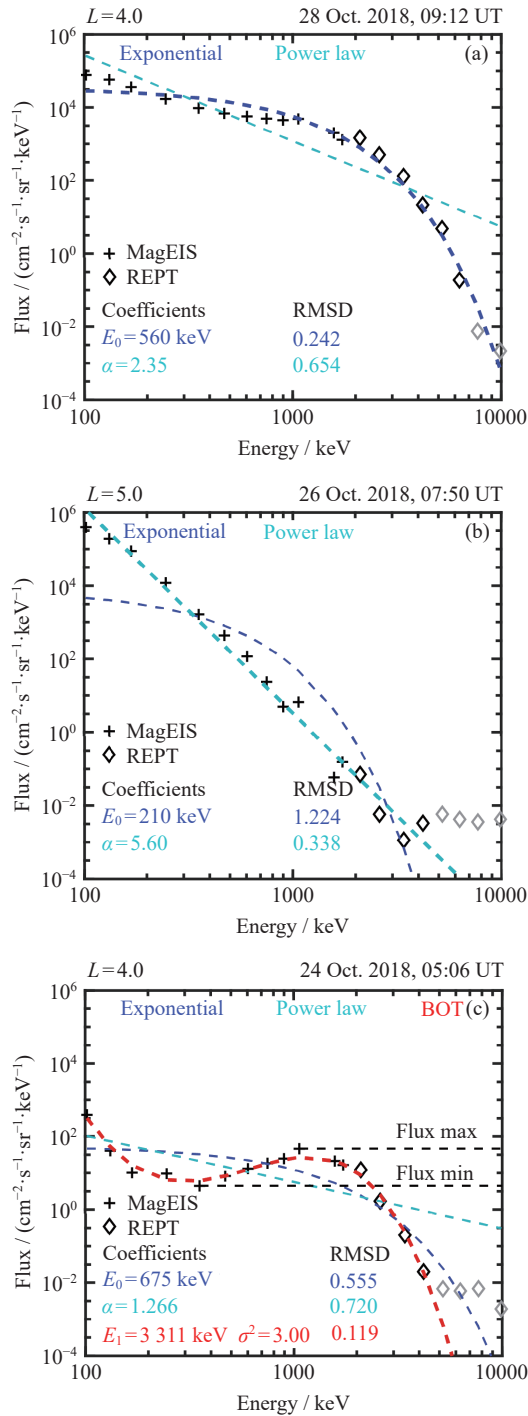


图1 指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱
Fig. 1 Diagrams of exponential energy spectrum, power law energy spectrum and Bump-on-Tail (BOT) energy spectrum

通量值, N 为电子能谱能量通道的个数. 如果两种分布拟合结果的均方根偏差均大于 0.5 个数量级, 则将该能谱分类为未定义能谱. 在图 1 中, 每个能谱都使

用指数分布 (紫色) 和幂律分布 (蓝色) 进行拟合, 拟合结果以虚线显示. 相应的系数和均方根偏差显示在每个面板的底部. 由图 1 可以看出, 指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱拟合的效果较好, 均方根误差较低. 这也表明式 (3) 可以很好地表示观测到的反转能谱.

2 辐射带电子能谱的分类与统计结果

2.1 强地磁活动时期

对范艾伦卫星观测的 2015 年辐射带电子能谱进行分类与特征值的统计分析, 结果如图 2 所示. 2015 年是第 24 个太阳活动周期的活跃时期, 地磁活动比较剧烈, 发生了多场 Dst 指数低于 -100 nT 的大型磁暴, 如图 2(g) 所示. 图 2(d)~(f) 给出了 2015 年 RBSP-B 观测的 0.47, 2.1, 5.2 MeV 电子通量. 当磁暴发生时, 通常低能级电子通量先增强, 之后快速损失, 高能级电子通量延时增强^[6,21-24]. 如图 2(d) 所示, 在磁暴发生时, 低能级电子通量在一个较宽的 L 范围内显著增强. 之后低能级电子逐渐损失, 且在低 L 处的损失速度更快. 磁暴恢复时间越长, 损失越明显, 对应槽区上边界的 L 值也越高^[25-27]. 如图 2(e)~(f) 所示, 在 2015 年 3 月 16 日之前, 高能级电子通量处于较低的水平. 之后一次强磁暴的发生让高能级电子通量在一个较宽的 L 范围内 ($3 < L < 6$) 显著增强, 之后高能级电子不断从高 L 处到低 L 处扩散. 能级越高, 向内径向扩散的趋势越明显^[6].

使用 1.2 节中介绍的方法, 对 2015 年的辐射带电子能谱进行了分类. 由于卫星只能提供单点观测, 无法实现全球覆盖, 特别是卫星在远地点附近的观测时间要高于近地点附近, 因此需要注意卫星观测的能谱占比不代表辐射带中的真实占比. 图 2(a) 给出了 2015 年 RBSP-B 观测的辐射带电子能谱的时空分布, 在此次分类结果中, 94% 的能谱可以被确定为指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱三种类型之一, 其中 71% 为指数分布能谱, 8% 为幂律分布能谱, 15% 为反转能谱. 从图 2(a) 中可以清楚地观察到能谱的分布及其与等离子体层层顶位置 (L_{pp}) 的相关性. 等离子体层层顶的位置是利用 Liu 等^[28] 的模型计算得出的在所有 MLT 上的层顶最小值. 反转能谱与

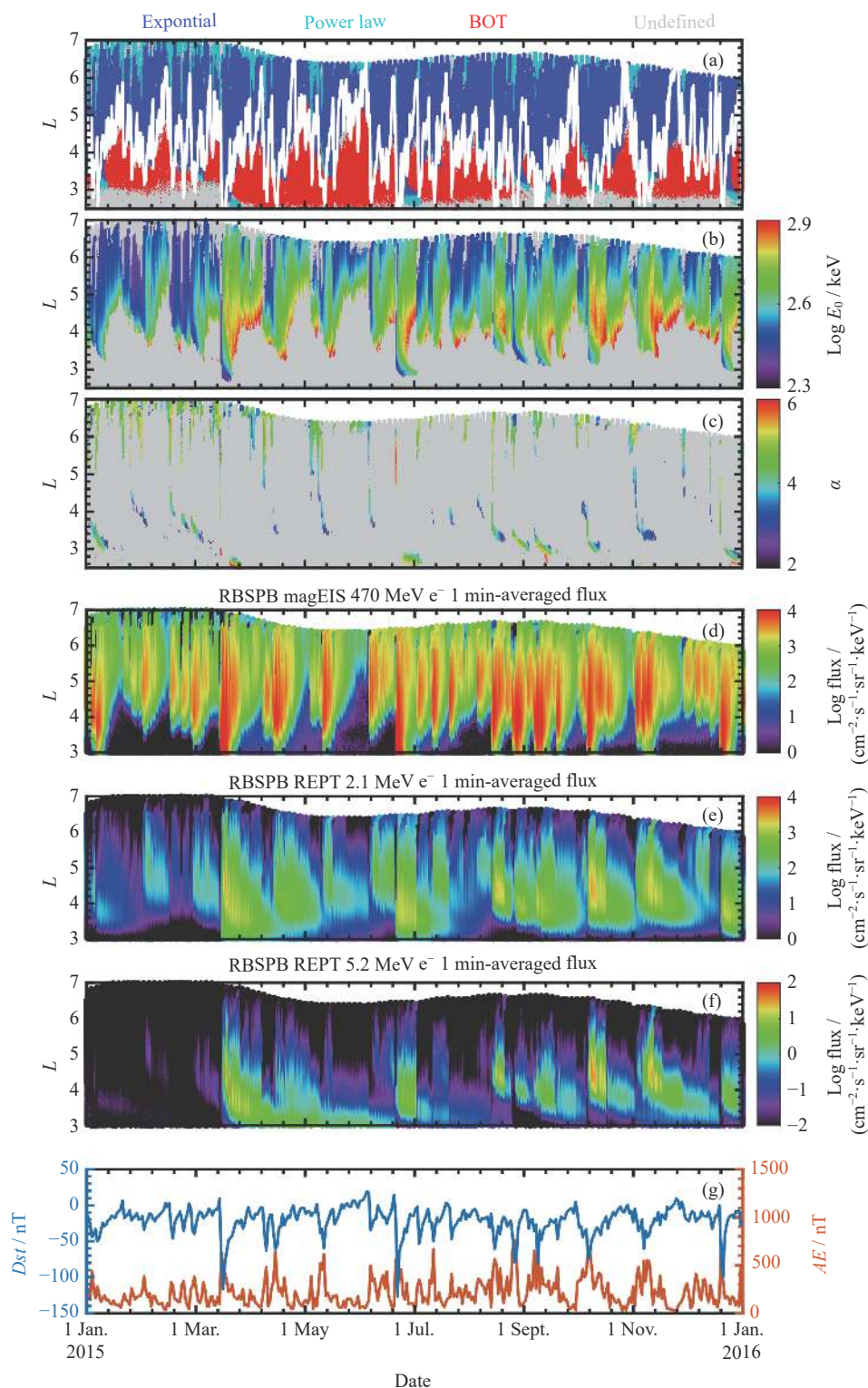


图2 范艾伦卫星观测的2015年辐射带电子能谱分类与特征值

Fig. 2 Categorization and characteristic values of the radiation belt electron energy spectrum observed by the Van Allen satellite in 2015

指数分布能谱分别是等离子体层顶内外主要能谱类型。当磁暴发生时, 等离子体层顶向内压缩, 指数分

布能谱开始取代反转能谱。大型磁暴发生时, 反转能谱完全消失, 指数分布能谱成为外带最主要的能谱类

型. 中小型磁暴发生时, 低 L 处的反转能谱并没有完全消失. 这主要是由于数百 keV 电子通量增强不足. 在磁暴的恢复相, 等离子体层顶向外移动, 反转能谱不断增多. 幂律分布能谱在磁暴发生时出现在高 L 处, 并随着时间的推移不断向低 L 处转移, 这可能是低能级电子注入导致.

在等离子体层层顶以外的位置, 能谱以指数分布能谱为主. 图 2(b) 给出了能谱的特征值 E_0 , E_0 主要在 400~800 keV 之间, E_0 往往随着 L 的增加而降低, 表明在等离子体层顶以外, 高能级电子通量往往随着 L 的增加而降低. 随着磁暴的发生, E_0 通常呈现突然减小然后逐渐增大的趋势. 这表明, 当磁暴发生时, 由于低能级电子通量的快速增强, 外带的能谱通常首先变软. 之后, 由于低能级电子的快速损失和高能级电子的延迟增强, 能谱逐渐硬化.

在磁暴发生的主相, 幂律分布能谱通常出现在高 L 区域, 之后随着时间的推移向低 L 处转移. 图 2(c) 给出了幂律分布能谱的特征值 α , 可以看出 α 在 2~6 之间, 且随着 L 的降低而减小, 表明幂律分布能谱的产生可能是数百 keV 电子的注入导致.

在 $L > 2.5$ 处, 反转能谱是等离子体层内部最普遍的能谱. 为了更详细给出反转能谱的特征, 图 3(a)~(c) 给出了反转能谱的观测特征值. 根据观测结果, E_u 通常在 0.6~2.6 MeV 之间, 大多数时间位于 1~2 MeV. 一般在低 L 时, E_u 和 E_d 较高. 通量极大值和极小值之间的比值一般在 1~2 个数量级之间. 图 3(d)~(f) 给出了反转能谱的拟合特征值, 由于能谱的电子能级间隔在大于 1 MeV 时比较大, 观测的 E_u 和 E_d 不是连续变化, 因此使用拟合的特征值有助于更好地分析特征值的变化. 可以观察到, 拟合的 E_u 和 E_d 随 L 的减小而增大. R 在反转能谱分布区域的中心位置比较高. 这些结果也与 Zhao 等^[16] 在 2019 年观测到的反转能谱特征一致, Ni 等^[17] 通过数值模拟证明了这是由等离子体层嘶声散射引起的, 本文的统计结果进一步证实了等离子体层嘶声在反转能谱的形成和演化中的关键作用.

2.2 弱地磁活动时期

对 2014 年的辐射带电子能谱进行分类与特征值的统计分析. 如图 4(g) 所示, 总体上 2014 年地磁活动比较平静, 磁暴数量较少, 也没有发生 Dst 指数低于 -100 nT 的大型磁暴. 图 4(d)~(f) 给出了 2014 年

RBSP-B 观测的 0.47, 2.1, 5.2 MeV 的 1 min 平均电子通量. 相比于 2015 年, 整体上电子通量比较低, 槽区的上边界位置略高. 如图 4(d) 所示, 在磁暴发生时, 低能级电子通量在一个较宽的 L 范围内少量增强. 之后, 低能级电子逐渐损失, 由于这一年地磁活动比较平静, 在低 L 处可以观察到非常明显的损失. 如图 4(e)~(f) 所示, 高能级电子通量一直处于比较低的水平, 尤其是大于 5.2 MeV 电子的通量. 在磁暴发生时, 高能级电子通量也能表现出少量增强. 之后, 高能级电子快速损失, 可以明显观察到高能级电子损失耗尽的现象^[18].

同样使用第 1.2 节中描述的分类方法, 对 2014 年的辐射带电子能谱进行分类研究. 图 4(a) 给出了 2014 年 RBSP-B 观测的辐射带电子能谱的时空分布, 在此次分类结果中, 82% 的能谱可以被确定为指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱三种类型之一. 其中 57% 为指数分布能谱, 15% 为幂律分布能谱, 10% 为反转能谱. 相比于 2015 年, 指数分布能谱与反转能谱占比更少, 幂律分布能谱占比更高. 在图 4(a) 中, 除未定义能谱外, 反转能谱与指数分布能谱仍分别是离子体层层顶内外最常见的能谱类型. 与 2015 年不同的是, 由于地磁活动比较平静, 等离子体层层顶的位置较高^[29], 因此, 指数分布能谱占比减少. 值得注意的是, 在等离子体层层顶以内, 反转能谱在低 L 处较难形成, 被未定义能谱取代. 这是由于此年地磁活动比较平静, 亚暴的活跃程度较低, 高能级电子较少^[3,30], 图 4 中可见 2014 年观测到的各个能量电子通量都相对较弱, 尤其在典型的辐射带电子反转能谱峰值 (约 2 MeV) 附近的电子通量明显少于 2015 年, 因此反转能谱难以形成, 占比减少. 幂律分布能谱在磁暴发生时出现在高 L 处, 且在高 L 处并随着时间的推移不断向低 L 处转移. 与 2015 年相比, 幂律分布能谱在高 L 处存在的时间更久, 推测是由于在地磁活动比较平静的时期, 数百 keV 电子加速较慢, 幂律分布能谱演化成指数分布能谱的时间较长. 因此, 幂律分布能谱存在的时间更久, 占比更多.

图 4(b) 给出了能谱的特征值 E_0 , E_0 主要在 200~600 keV 之间. 相比于 2015 年, E_0 明显减小. 这说明 2014 年能谱更软, 高能级电子通量更低. 图 4(c) 给出了幂律分布能谱的特征值 α , 可以看出 α 在 2~6 之间, 且随着 L 的降低而减小. 相比于 2015 年, α 整体

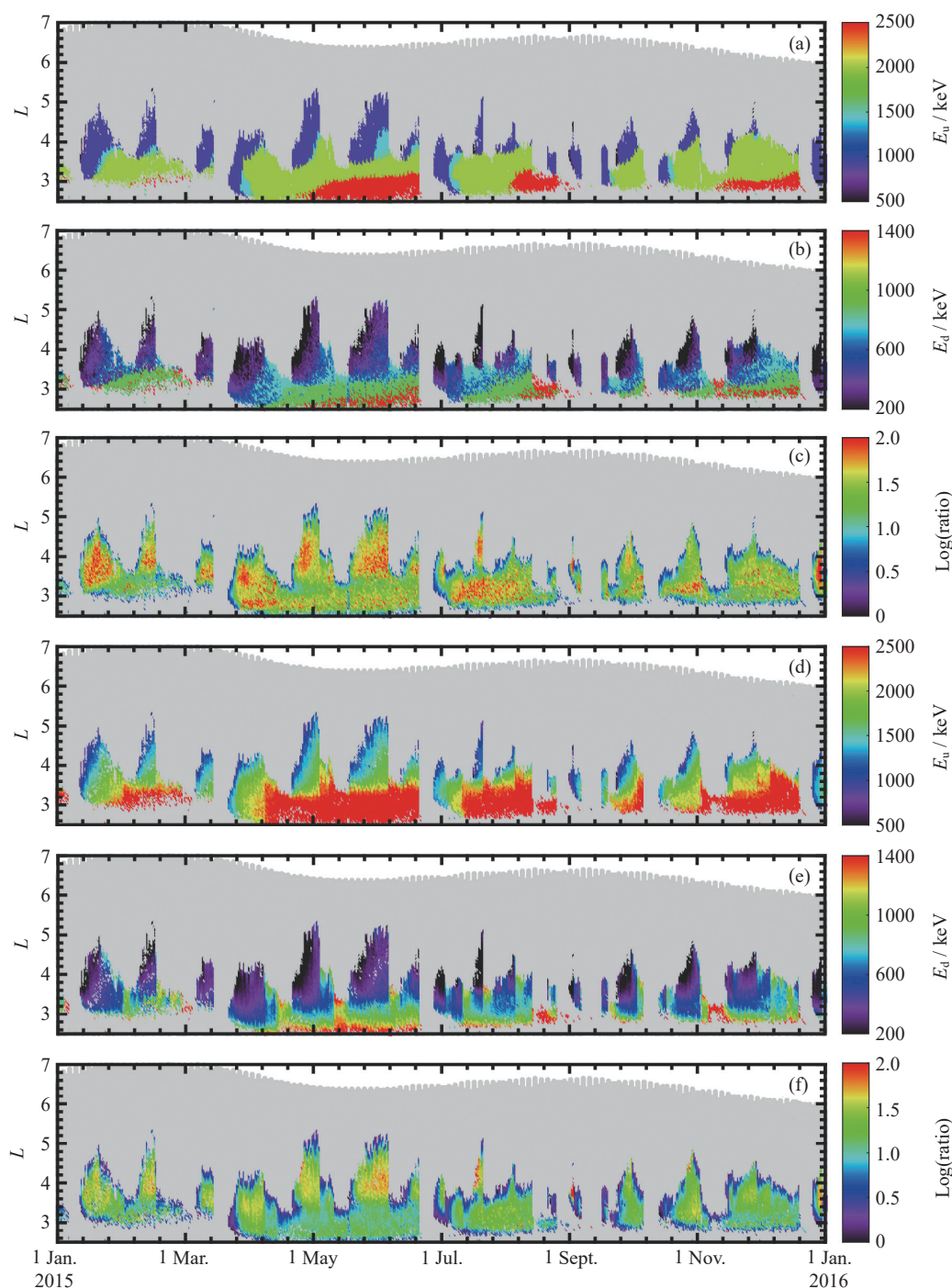


图3 2015年反转能谱的观测特征值(a)~(c)与拟合特征值(d)~(f)

Fig. 3 Observed (a)~(c) and fitted (d)~(f) eigenvalues of BOT in 2015

上更大,这主要是由于通量整体水平较低,注入的电子通量相比来说更高.图5(a)~(c)给出了反转能谱的观测特征值,图5(d)~(f)给出了反转能谱的拟合特征值,可以观察到, E_u 和 E_d 随 L 的减小而增大.比值 R 在反转能谱分布区域的中心位置比较高.与

2015年相比,反转极大值大于2 MeV以上的反转能谱难以形成,且反转极大值与反转极小值之间的比值较小.这主要是因为高能级电子通量非常低,导致反转电子通量极大值较小,尤其是大于2 MeV电子通量非常低.

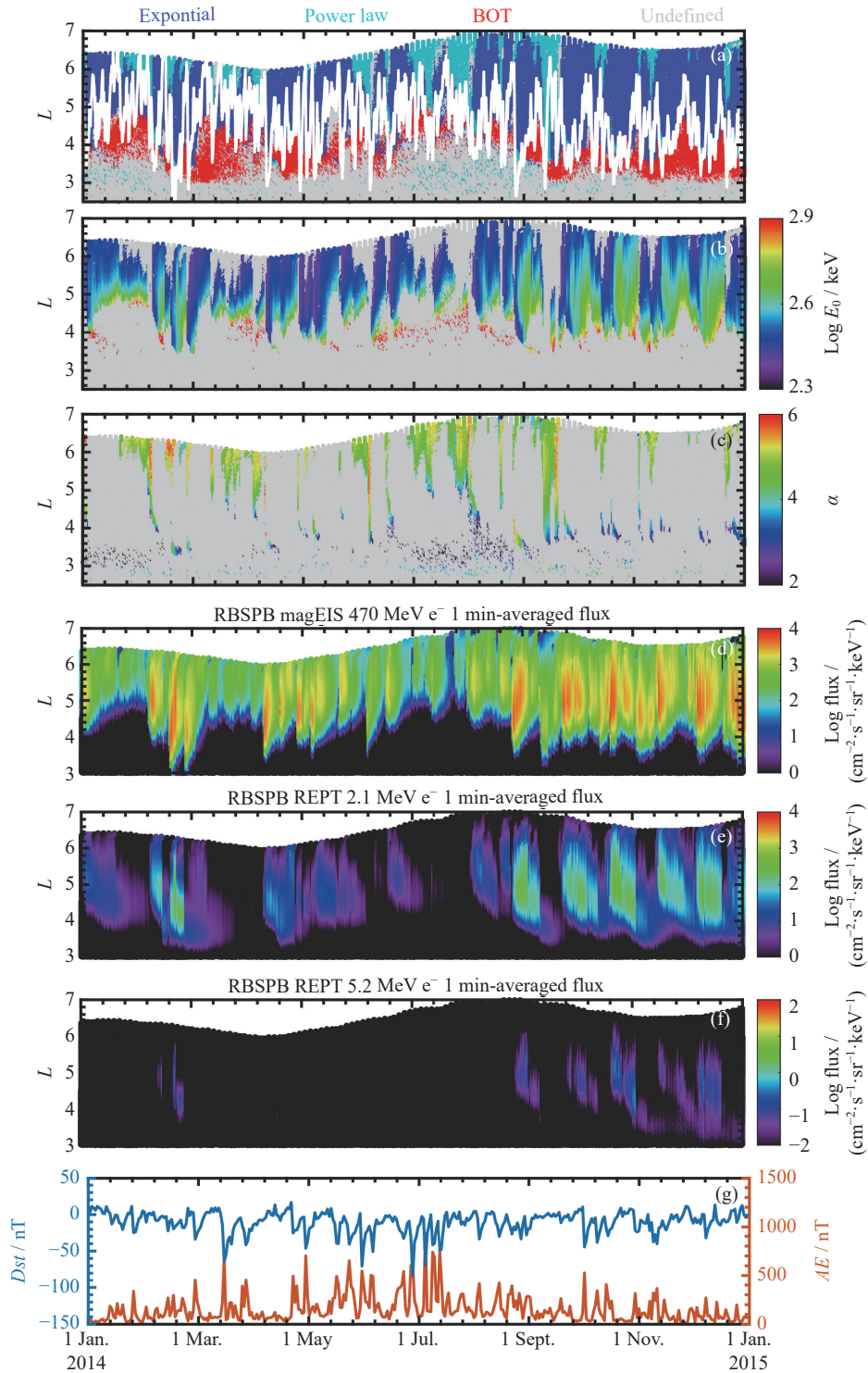


图 4 2014 年辐射带电子能谱分类结果与特征值

Fig. 4 Categorization and characteristic values of the radiation belt electron energy spectrum in 2014

2.3 电子能谱分布对等离子体层层顶位置、地磁活动的依赖性

图 2(a) 与图 4(a) 表明, 等离子体层层顶对辐射带电子能谱的分布起着关键作用. 为了更直观地分析

能谱类型和等离子体层层顶之间的关系, 本文统计了 2014—2018 年间, 距离等离子体层层顶不同位置处的能谱比例. 图 6(a) 给出了不同类型能谱占比关于距层顶位置的变化曲线. 在图 6(a) 中不同颜色的曲线

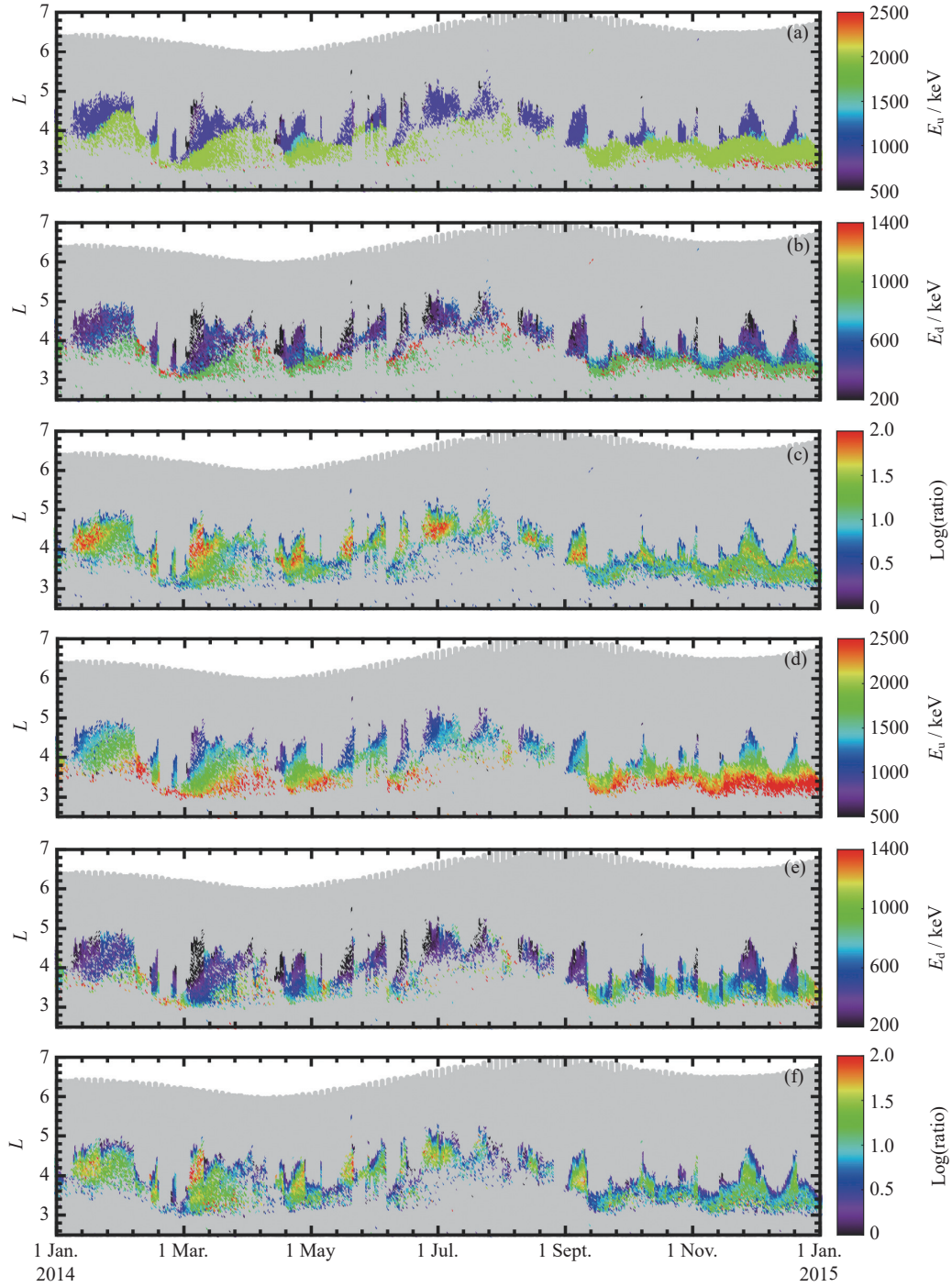


图 5 2014 年反转能谱观测特征值 (a)~(c) 及拟合特征值 (d)~(f)

Fig. 5 Observed (a)~(c) and fitted (d)~(f) eigenvalues of BOT in 2014

显示了不同能谱在三种定义能谱中所占的百分比, 对应左侧 y 轴, 其中指数分布能谱对应蓝色曲线, 幂律分布能谱对应青色曲线, 反转能谱对应红色曲线; 紫色虚线展示了 $L - L_{pp}$ 位置的所有类型能谱的总数, 对应右侧 y 轴. 为了确保足够的数据支撑统计, 只给出了能谱总数超过 1000 个的统计结果. 在图 6(a) 中,

从统计上看, 大多数反转能谱位于等离子体层层顶以内的位置, 反转能谱的峰值位置约位于 $L = L_{pp} - 2$, 其中超过 90% 的能谱是反转能谱, 这也与 Zhao 和 Ni 等^[16] 在 2019 年观测到的反转能谱特征一致. 指数分布能谱在等离子体层层顶外占主导地位, 峰值约位于 $L = L_{pp} + 1.5$, 其中超过 85% 的能谱是指数分布能

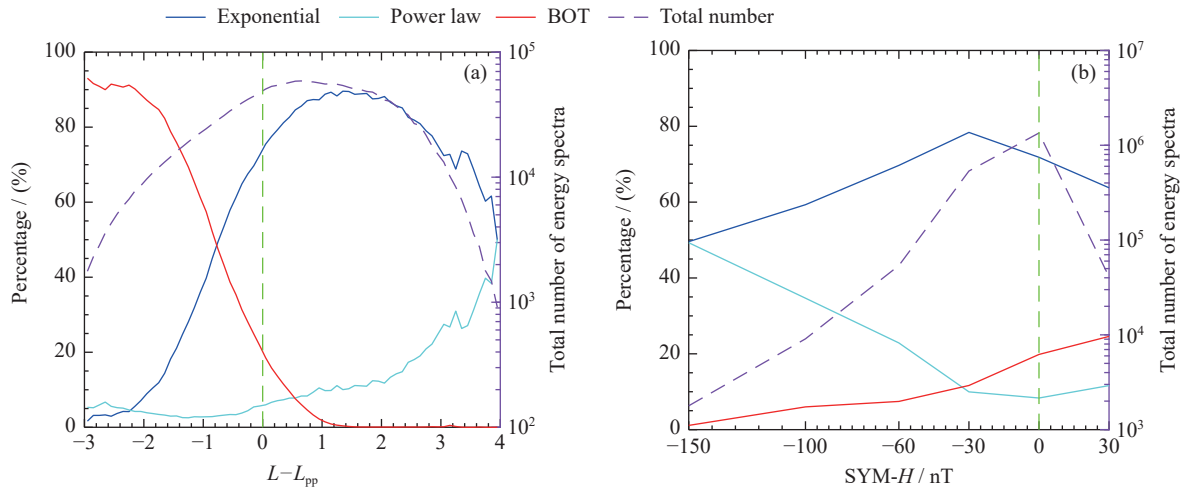

 图 6 指数分布、幂律分布和反转能谱所占的百分比关于 $L-L_{pp}$ 及 $SYM-H$ 的变化曲线

 Fig. 6 Change curve of the percentage of exponential, power law and BOT energy spectra of $L-L_{pp}$ and $SYM-H$

谱. 幂律分布能谱主要出现在远高于等离子体层层顶的位置, 这可能是电子注入导致的结果.

磁暴的发生也与辐射带电子能谱的分布密切相关. 图 6(b) 给出了 2014—2018 年期间, 不同类型能谱的百分比关于 $SYM-H$ (1 min 分辨率的环电流指数) 的变化曲线. 可以看出, $SYM-H$ 越低, 磁暴越剧烈, 反转能谱占比越少, 这表明在磁层压缩的过程中反转能谱消失. 在 $SYM-H < -30$ nT 时, 幂律分布能谱的占比随着 $SYM-H$ 的减小而增大, 指数分布能谱则呈现出与之相反的趋势, 这可能是因为在磁暴的主相, 由于电子的注入幂律分布能谱取代了高 L 处的指数分布能谱. 之后, 在磁暴的恢复相, 随着 $SYM-H$ 的逐渐增大, 指数分布能谱又重新取代幂律分布能谱, 这也与 Zhao 等^[8] 分析的磁暴中电子能谱演变过程一致. 在 $SYM-H > -30$ nT 时, 即磁暴的平静时期, 反转能谱占比增多, 指数分布能谱占比减少, 这主要是因为平静时期, 等离子体层层顶的 L 增大, 由于嘶声波的散射作用, 等离子体层层顶内的指数分布能谱被反转能谱取代^[16,31,32].

3 结论

使用范艾伦探测器长期的高精度能谱数据, 对 100 keV~10 MeV 电子的辐射带电子能谱的特征和演化进行了系统的统计分析, 主要结论如下.

(1) 大部分辐射带电子能谱可以被分类为指数分布能谱、幂律分布能谱和反转能谱三种类型之一. 指

数分布能谱在等离子体层层顶外占主导地位, 反转能谱在等离子体层内 $L > 2.5$ 处占主导地位, 当磁暴发生时, 幂律分布能谱通常出现在高 L 处, 随着时间的推移的推移不断扩展到低 L 处.

(2) 在地磁活动比较平静的年份, 由于等离子体层层顶的位置较高, 指数分布能谱占比减少. 由于亚暴的活跃程度较低, 高能级电子较少^[3,30], 尤其在典型的辐射带电子反转能谱峰值 (约 2 MeV) 附近的电子通量明显较低, 因此反转能谱难以形成, 占比减少. 幂律分布能谱在高 L 处存在的时间更久, 这可能是因为在磁暴的主相, 数百 keV 电子加速较慢, 幂律分布能谱演化成指数分布能谱的时间较长. 因此, 幂律分布能谱存在的时间更久, 占比更多.

(3) 大多数反转能谱位于等离子体层层顶以内的位置, 反转能谱的峰值位置约位于 $L=L_{pp}-2$, 占比超过 90%. 指数分布能谱在等离子体层层顶外占主导地位, 峰值约位于 $L=L_{pp}+1.5$, 占比超过 85%. 幂律分布能谱主要出现在远高于等离子体层层顶的位置.

(4) 地磁活动的强弱与辐射带电子能谱类型的分布密切相关, 磁暴越剧烈, 在磁层压缩的过程, 反转能谱被指数分布能谱取代的 L 范围大. 由于在磁暴主相有较强的电子注入, 幂律分布能谱取代了高 L 处的指数分布能谱. 在磁暴的恢复相, 由于注入到低 L 处的电子越来越少, 幂律分布能谱比例又逐渐减少. 在磁暴后的平静时期, 等离子体层层顶的位置向高 L 移动, 在等离子体层嘶声的散射作用下, 等离子体层层顶内的指数分布能谱被反转能谱取代.

参考文献

- [1] NI B B, XIANG Z, GU X D, *et al.* Dynamic responses of the Earth's radiation belts during periods of solar wind dynamic pressure pulse based on normalized superposed epoch analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 8523-8536
- [2] NI B B, ZHANG Y, GU X D. Identification of ring current proton precipitation driven by scattering of electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Fundamental Research*, 2023, **3**(2): 257-264
- [3] WANG J H, GUO D Y, XIANG Z, *et al.* Prediction of geosynchronous electron fluxes using an artificial neural network driven by solar wind parameters[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(1): 275-285
- [4] CHU X N, MA D L, BORTNIK J, *et al.* Relativistic electron model in the outer radiation belt using a neural network approach[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(12): e2021SW002808
- [5] PILIPENKO V, YAGOVA N, ROMANOVA N, *et al.* Statistical relationships between satellite anomalies at geostationary orbit and high-energy particles[J]. *Advances in Space Research*, 2006, **37**(6): 1192-1205
- [6] GUO D Y, XIANG Z, NI B B, *et al.* Three-dimensional simulations of ultra-relativistic electron acceleration during the 21 April 2017 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(4): e2023JA031407
- [7] CAO J B, DUAN A Y, REME H, *et al.* Relations of the energetic proton fluxes in the central plasma sheet with solar wind and geomagnetic activities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(11): 7226-7236
- [8] ZHAO H, JOHNSTON W R, BAKER D N, *et al.* Characterization and evolution of radiation belt electron energy spectra based on the van allen probes measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(6): 4217-4232
- [9] WHITTAKER C I, GAMBLE R J, RODGER C J, *et al.* Determining the spectra of radiation belt electron losses: fitting DEMETER electron flux observations for typical and storm times[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(12): 7611-7623
- [10] PIZZELLA G, LAUGHLIN C D, O'BRIEN B J. Note on the electron energy spectrum in the inner Van Allen Belt[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, **67**(9): 3281-3287
- [11] IMHOF W L, SMITH R V. Energy spectrum of electrons at low altitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, **70**(9): 2129-2134
- [12] GALPER A M, KOLDASHOV S V, MIKHAILOV V V, *et al.* Energy spectrum and charge composition of a new, long-lived, unstable electron radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A12): 28685-28689
- [13] FENNEL J F, CLAUDEPIERRE S G, BLAKE J B, *et al.* Van Allen Probes show that the inner radiation zone contains no MeV electrons: ECT/MagEIS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(5): 1283-1289
- [14] LI X, SELESNICK R S, BAKER D N, *et al.* Upper limit on the inner radiation belt MeV electron intensity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(2): 1215-1228
- [15] JAYNES A N, BAKER D N, SINGER H J, *et al.* Source and seed populations for relativistic electrons: their roles in radiation belt changes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(9): 7240-7254
- [16] ZHAO H, NI B, LI X, *et al.* Plasmaspheric hiss waves generate a reversed energy spectrum of radiation belt electrons[J]. *Nature Physics*, 2019, **15**(4): 367-372
- [17] NI B B, HUANG H, ZHANG W X, *et al.* Parametric sensitivity of the formation of reversed electron energy spectrum caused by plasmaspheric hiss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(8): 4134-4143
- [18] HUANG He. The Formation, Evolution and Disappearance of Reversed Energy Spectra of Radiation Belt Electrons: Observations and Simulations[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (黄河. 辐射带电子反转能谱的生成、演化和消失: 观测与模拟 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [19] 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
- [20] 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
- [21] HUA M, BORTNIK J, KELLERMAN A C, *et al.* Ensemble modeling of radiation belt electron acceleration by chorus waves: dependence on key input parameters[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(3): e2022SW003234
- [22] SHPRITS Y Y, ALLISON H J, WANG D D, *et al.* A new population of ultra-relativistic electrons in the outer radiation zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(5): e2021JA030214
- [23] SU Z P, XIAO F L, ZHENG H N, *et al.* STEERB: a three-dimensional code for storm-time evolution of electron radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A9): A09208
- [24] 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
- [25] LIU Yangxizi, XIANG Zheng, GUO Jianguang, *et al.* Scattering effect of very low frequency transmitter signals on energetic electrons in Earth's inner belt and slot region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(14): 149401 (刘阳希子, 项正, 郭建广, 等. 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[J]. *物理学报*, 2021, **70**(14): 149401
- [26] GUO D Y, XIANG Z, NI B B, *et al.* Bounce resonance scattering of radiation belt energetic electrons by extremely low-frequency chorus waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(22): e2021GL095714
- [27] ZONG Q G, ZHOU X Z, WANG Y F, *et al.* Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A10): A10204
- [28] LIU X, LIU W L, CAO J B, *et al.* Dynamic plasmopause model based on THEMIS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(12): 10543-10556
- [29] GUO D Y, FU S, XIANG Z, *et al.* Prediction of dynamic plasmopause location using a neural network[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(5): e2020SW002622
- [30] XIANG Z, LI X L, KAPALI S, *et al.* Modeling the dynamics of radiation belt electrons with source and loss driven by the solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2020JA028988
- [31] NI B B, SUMMERS D, XIANG Z, *et al.* Unique banded structures of plasmaspheric hiss waves in the earth's magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(3): e2023JA031325
- [32] NI B B, ZOU Z Y, FU S, *et al.* Resonant scattering of radiation belt electrons by off-equatorial magnetosonic waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(3): 1228-1236

作者简介



王建行 男, 2001 年出生于安徽省淮北市, 现为武汉大学电子信息学院空间物理系博士生, 主要研究方向为空间波粒相互作用的观测和建模、地球空间环境的预测预报。

E-mail: jianhangwang@whu.edu.cn



项正 男, 1990 年 8 月出生于湖北省黄冈市, 现为武汉大学电子信息学院空间物理系副教授, 主要研究方向为地球辐射带动力学。

E-mail: xiangzheng@whu.edu.cn



马新 女, 1992 年 6 月出生于河南省漯河市, 现为武汉大学电子信息学院空间物理系博士后, 主要研究方向为地球辐射带波粒相互作用机理与建模。

E-mail: whumaxin@whu.edu.cn