基于 FIREBIRD-II 卫星观测数据的“微爆”型电子沉降事件统计研究*

郭浩智[1] 项正[1] 刘阳希子[2] 董俊虎[1] 胡景乐[1] 王建行[1]
戴佳坤[1]

1(武汉大学地球与空间科学技术学院 武汉 430072)

2(武汉纺织大学电子与电气工程学院 武汉 430200)

摘 要 微爆型电子沉降是指辐射带高能电子呈现脉冲式沉降，持续时间通常小于 1 秒，是地球辐射带高能电子损失的重要机制，通常认为是由哨声模合声波散射导致的。系统研究微爆型电子沉降，对于理解磁层空间波粒相互作用过程、揭示地球辐射带动态变化规律、量化磁层-电离层物质和能量输运均具有重要意义。前人统计研究多关注能量大于 1 MeV 的电子，对数百 keV 电子的微爆型沉降分布特征仍缺乏系统认识。本文基于 FIREBIRD-II 卫星计划中 FU3 卫星（2015 年 2 月 1 日至 2019 年 10 月 7 日）和 FU4 卫星（2015 年 2 月 1 日至 2022 年 3 月 16 日）的观测数据，统计分析了 200–900 keV 电子的微爆型沉降事件对磁壳值（L）、磁地方时（MLT）、地理经纬度、地磁活动水平的依赖性。结果表明微爆型电子沉降事件主要分布在晨侧的外辐射带，发生率峰值出现在 L=6-7，MLT=6-7 范围。发生率随电子能量的增加而降低，265.4 keV 电子的发生率峰值可以达到 3‰，而 481.2 keV 能级电子的发生率峰值降低到约 1‰。同时还发现微爆型电子沉降事件对地磁活动水平有较强依赖性，地磁活动越剧烈发生率越高，265.4 keV 电子平静时期发生率约为 2‰，地磁活动期间最高可以达到 6‰。发生率峰值随着地磁活动加剧向低 L 值移动，可能与磁暴时期等离子体层层顶位置向地球侧移动有关。统计结果显示微爆型电子沉降事件发生率的全球分布与哨声模合声波波幅的全球分布具有较强相关性，表明哨声模合声波可能是能量小于 MeV 电子微爆型沉降的重要驱动机制，将合声波驱动电子微爆型沉降的统计观测证据拓展至数百 keV 能段。

关键词 地球辐射带，微爆型电子沉降，哨声模合声波，波粒相互作用
中图分类号 P354

A Statistical Survey of Microburst Precipitation based on FIREBIRD-II CubeSat Measurements

GUO Haozhi[1]，XIANG Zheng[1]，LIU Yangxizi[2]，DONG Junhu[1]，HU Jingle[1]
WANG Jianhang[1]，DAI Jiakun[1]

[1] 1 (Department of Earth and Space Science and Technology,

[2] Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[3] 2 (School of Electronics and Electrical Engineering,

[4] Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract Microbursts are pulsed precipitation events of energetic electrons from the outer radiation belt, characterized by durations less than 1s. This phenomenon is a crucial loss

* 基金项目：国家自然科学基金(批准号：42474207, 425B2025)
投稿日期：2026 年 5 月 7 日
E-mail: guohaozhi@whu.edu.cn

mechanism for energetic electrons in Earth's radiation belts and is commonly thought to be driven by whistler-mode chorus waves. A comprehensive investigation of energetic electron precipitation is of great significance for better understanding of the Earth's radiation belts dynamic and space weather forecasting. Previous statistical surveys have primarily focused on microburst events with energies above 1 MeV, while systematic statistics of microburst events at hundreds of keV remain insufficient. In this study, using the data from FIREBIRD-II FU3 satellite from 1 February 2015 to 7 October 2019 and FU4 satellite from 1 February 2015 to 16 March 2022, we statistically analyze the dependence of microburst events (at energies of 200 – 900 keV) on L values, MLTs, geographic distributions, and geomagnetic activity levels. The results show that microburst events mostly occurred in the outer radiation belt at the dawn side, with peak occurrence rate observed at L=6-7 and MLT=6-7. The occurrence rates of microburst events decrease with increasing electron energies, reaching approximately 3‰ for 265.4 keV electrons and 1‰ for 481.2 keV electrons. Microburst events also show a strong dependence on geomagnetic activity levels. The occurrence rate of microburst events increases with geomagnetic activity intensity. For 265.4 keV electrons, it rises from 2‰ during quiet periods to a maximum of 6‰ during active periods. The peak of occurrence rate shifts to lower L value during active periods. The global distribution characteristics of microburst occurrence rate are consistent with the amplitude distribution of whistler-mode chorus waves, indicating that the pitch angle scattering caused by chorus is an important driver of microburst. This extends the statistical observational evidence for the scattering effect of chorus waves to hundreds of keV electrons.

Keywords Earth's radiation belts, Microburst, Whistler mode chorus waves； Wave-particle interactions

录用稿件，非最终出版稿

0 引 言

地球辐射带是环绕着地球的高能带电粒子聚集区，这些高能粒子能量通常在数百 keV 至几 MeV，速度接近光速，具有强辐射效应。这一区域由詹姆斯•范阿伦于 1958 年通过 Explorer-1 卫星上的盖格计数器首次发现[5]，故又被称为范阿伦辐射带。通常情况下地球辐射带呈现双带结构，分为内辐射带和外辐射带，中间由高能粒子通量极低的槽区分隔开。卫星观测表明，外辐射带电子通量在多种损失和加速机制的共同作用下呈现出复杂多样的时空变化特征，且与太阳活动和地磁扰动密切相关[6][14]。辐射带高能粒子可导致航天器表面充电、单粒子效应等空间辐射损伤，同时威胁宇航员的健康安全[8]，因此研究辐射带的动态变化具有重要的科学意义和应用价值。

辐射带中的带电粒子在地磁场中会经历三种周期运动：环绕磁力线的回旋运动，沿着磁力线的弹跳运动和环绕地球的漂移运动，这三种周期运动分别对应着三种绝热不变量，当外部磁场环境变化较为缓慢时，这三种绝热不变量守恒。电子沿着磁力线弹跳的过程中，其平行于磁力线方向的速度会不断变化，当电子沿着磁力线从弱磁场区域向强磁场区域运动时，平行于磁力线方向的速度会逐渐减小，速度减为 0 时，电子会发生反射向反方向运动，电子发生反射的点称为磁镜点[15]。当磁镜点高度低于约 100 km 时，由于大气中性粒子成分较为密集，电子在发生反射前就与中性粒子发生碰撞损失在大气中，这一过程被称为电子沉降[15]。大量研究表明磁层中的等离子体波与辐射带电子之间的波粒相互作用会破坏电子的绝热状态，使得电子的运动状态发生改变。等离子体波动可以通过回旋共振破坏电子的第一绝热不变量，引起电子的投掷角（电子运动方向与磁力线之间的夹角）变化，当电子投掷角减小时，对应的磁镜点高度随之降低从而损失在稠密大气中，是导致高能电子沉降的重要物理机制[16][21]。磁层中可以有效散射电子的等离子体波主要包括等离子体层嘶声[22][24]、哨声模合声波[25][26]、磁声波[27][29]、电磁离子回旋波[21][30]Error: Reference source not found 等。其中

哨声模合声波和电磁离子回旋波可以导致外辐射带中相对论电子的沉降[31][35]。根据持续时间可以将相对论电子沉降事件分为两种类型：一种是微爆型电子沉降（microburst，持续时间小于 1 秒）[36][38]；另一种是持续时间较长的沉降带（precipitation band，可持续几分钟到几十分钟）[39][40]。前人基于 SAMPEX 卫星数据的统计研究了磁暴发生时沉降带和微爆型电子沉降事件的发生时间和空间范围，发现两者是由不同的物理机制导致的[35][41]。目前研究认为哨声模合声波引起的电子投掷角扩散是微爆型电子沉降事件的主要驱动机制[42][44]，而电子沉降带主要是由电磁离子回旋波散射电子导致的[30][33][45]。电子沉降是辐射带中高能电子的主要损失机制，而微爆型电子沉降事件则是其中的重要贡献来源[44]，因此全面理解微爆型电子沉降事件的发生条件及其物理机制具有重要意义。

Hikishima 等[46]通过模拟赤道处合声波的激发，发现在波动激发的同时，10 keV 到 100 keV 的电子会发生微爆型电子沉降事件，从理论上证明了微爆型电子沉降事件与合声波之间存在相关性。为了进一步确认微爆型电子沉降事件和合声波的相关性，Breneman 等[34]对 FIREBIRD 卫星观测的微爆型电子沉降事件与 Van Allen 卫星观测的合声波进行共轭分析，发现 FIREBIRD 卫星于 2016 年 1 月 20 日 19:44 UT 左右观测到的数个微爆型电子沉降事件与哨声模合声波的发生时间和空间范围几乎一致，并且微爆型电子沉降事件出现在 FIREBIRD 的整个观测能量范围内，不同能级微爆型电子沉降事件的发生时间很少出现分散的现象，符合大幅度哨声模合声波对电子非线性散射的特征，表明微爆型电子沉降的发生与哨声模合声波直接相关[47][48]。基于 SAMPEX 卫星 1996 年至 2007 年间约一个太阳周期的观测数据，Douma 等[49]统计分析了能量高于 1.05 MeV 的微爆型相对论电子沉降事件的 L 和 MLT 等空间分布特征，以及对地磁活动的依赖性。结果表明微爆型相对论电子沉降主要发生在 L=3-8 的外辐射带，MLT=0-13 的晨侧，发生率随着地磁活动增强而增加，这一分布特征与哨声模合声波振幅的分布大致相同。随着地磁活动水平的增加，合声波的发生率会随之增加，AE > 300 nT 时，强烈的合声波会出现在赤道附近[47][50][51]。统计结果表明微爆型电子沉降事件频繁发生的区域与大尺度合声波的存在区域出现重叠，且微爆型电子沉降事件发生率和合声波表现出相似的地磁活动水平依赖性[52]。Shumko 等[53]通过分析 FIREBIRD-II 项目中卫星的观测数据，对微爆型电子沉降事件的空间尺度进行估计，在近地轨道上纬度尺度为 29±1 km，经度尺度为 51±1 km，将尺度投影到磁赤道上，发现其与哨声模合声波的源区尺度相似。后续研究通过射线追踪模拟了单个波源合声波产生的微爆型电子沉降事件的空间尺度，与观测结果一致，表明微爆型电子沉降事件的空间尺度与合声波的传播有关[54]。将单个波源扩展到不同 L 和 MLT 处的多个波源也有相似的结论[55]，证实了哨声模合声波对电子的散射效应是微爆型电子沉降的驱动机制。

基于低轨卫星观测数据研究微爆型沉降电子时空分布规律特征，可以分析电子沉降事件的发生规律以及揭示其背后的物理机制，有助于理解辐射带中高能粒子的动态变化过程，服务于空间天气预测预报。前人的统计研究主要集中在能量大于 1MeV 的微爆型电子沉降事件，对数百 keV 电子的微爆型沉降的分布特征仍缺乏研究。FIREBIRD-II 项目中卫星的观测数据具有很高的时间分辨率和能量分辨率，非常适合用于研究能量低于 1 MeV 的电子沉降事件。得益于 FIREBIRD-II 中卫星的观测仪器的优势，本文对 200 keV 到大于 1 MeV 的六个不同能级的高能电子观测数据进行统计研究，分析不同能级电子的微爆型电子沉降事件发生率的空间分布、时间分布等特征以及对地磁活动的依赖性。统计结果发现能量低于 1 MeV 的高能电子微爆型电子沉降事件发生率分布与哨声模合声波振幅的分布也有一定的相关性，证实了哨声模合声波作为微爆型电子沉降事件的驱动机制。第一节介绍使用的 FIREBIRD-II 项目中的观测数据，第二节统计分析微爆型电子沉降事件发生率的分布，第三节讨论分析微爆型电子沉降事件识别标准的有效性，第四节总结微爆型电子沉降事件的分布特征。

1　数据来源与方法

1.1 数据来源

FIREBIRD-II（The Focused Investigations of Relativistic Electron Bursts: Intensity, Range and Dynamics-II）卫星计划是由美国国家科学基金会资助的立方星任务，旨在研究相对论电子微爆的时空尺度、强度和能谱特征，包含 FU3 和 FU4 两颗低轨卫星。两颗卫星于 2015 年 1 月 31 日成功进入近地轨道，其轨道倾角 99°，近地点距地表 440 km，远地点距地表 670 km[56]。可观测的电子通量能量范围从 200 keV 到大于 1 MeV，分为六个能量通道，分别为 265.4 keV、353.7 keV、481.2 keV、662.7 keV、913.0 keV 和大于 1055 keV。时间分辨率可以达到 18.75 ms[57]。每颗卫星上搭载一个表面探测器和一个准直探测器，其中表面探测器安装在航天器外表面，视场角接近 180°，准直探测器安装在航天器内部的准直器后方，视场角缩小到大约 45°。由于准直探测器的几何因子较小，准直探测器能够清晰地测量较低能级处的电子通量，但对于大于 1055 keV 能级电子计数往往不足，而表面探测器具有较大的几何因子，可以准确测量 MeV 以上能级的电子，但测量的低能级电子数据容易达到饱和[58]。由于 FU4 的表面探测器没有正常工作[59]，2020 年初 FU3 卫星电池老化导致探测仪器无法正常工作，2022 年底 FU4 卫星的主处理器出现可靠性下降的迹象，因此本文使用 FU3 和 FU4 的准直探测器探测的电子通量数据，时间范围分别为 2015 年 2 月 1 日至 2019 年 10 月 7 日，和 2015 年 2 月 1 日至 2022 年 3 月 16 日。

1.2 电子通量测量数据处理

微爆型电子沉降事件在电子通量的观测中表现为快速上升和下降，为了确定微爆型电子沉降事件发生的时间点首先需要对原始电子通量数据进行去趋势处理。对原始数据使用最小二乘法进行线性拟合，用原始数据减去线性拟合函数得到去趋势后的数据，这样处理可以消除在获取数据时轨道变化产生的通量变化对后续处理的影响。经过去趋势处理可以更好地将分析集中在数据本身的变化趋势上。通过查找处理后数据中电子通量急剧变化的时间点以确定微爆型电子沉降事件。以 265.4 keV 能级电子筛选标准为例：（1）选取处理后数据电子通量变化大于 10 $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}keV^{-1}$ 的数据点，避免仪器背景噪声导致的电子通量发生小幅度变化的时间点对结果造成影响；（2）每两个数据点之间的间隔大于 20 个原始观测数据点，避免在同一个持续时间稍长的微爆型电子沉降事件中确定了多个数据点，这样做可以避免重复计算微爆型电子沉降事件的发生次数。符合这两个标准的即为 265.4 keV 微爆型电子沉降事件发生的时间点。由于不同能级微爆型电子沉降事件的幅度不同，对于更高能级的电子通量数据，调整电子通量变化的阈值（353.7 keV 和 481.2 keV 能级的阈值为 4 $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}keV^{-1}$，662.7 keV 和 913.0 keV 能级的以阈值为 2 $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}keV^{-1}$），按照 265.4 keV 能级电子的筛选方法找出高能级微爆型电子沉降事件发生的时间点，将这些时间点与较低能级找出的时间点进行比较，由于高能级的微爆型电子沉降事件筛选阈值较低，为了减少高能级微爆型电子沉降事件的误判，去掉其中低能级未发生而高能级发生微爆型电子沉降事件发生的时间点，筛选得到的即为高能级微爆型电子沉降事件发生的时间点。

图 1 给出了通过自动算法识别卫星观测数据中微爆型电子沉降事件的结果示例，黑色星号表示根据上述标准判定的微爆型电子沉降事件。图 1（a）为 FU4 卫星于 2016 年 1 月 20 日 19:44:00 至 19:44:45 观测的六个能级电子原始通量数据，图 1（b）-图 1（f）分别为五个能级电子通量去趋势处理后的数据，黑色星号为基于上述标准筛选后确定的微爆型电子沉降事件发生的位置。其中大于 1055 keV 能级电子通量数据质量较差，后续数据处理舍弃这一能级的电子通量数据。可以看出在 45 秒内，265.4 keV 电子通量数据中识别出了 13 个微爆型电子沉降事件。相较于能量更高的 481.2 keV 电子，265.4 keV 电子微爆型电子沉降事件发生次数更多，幅度更大。基于这一方法，本文对卫星观测数据进行筛选，同时记录下微爆型电子沉降事件发生的时间点及对应的经度、纬度、高度、*Kp* 值、MLT 值、L 值等信息。

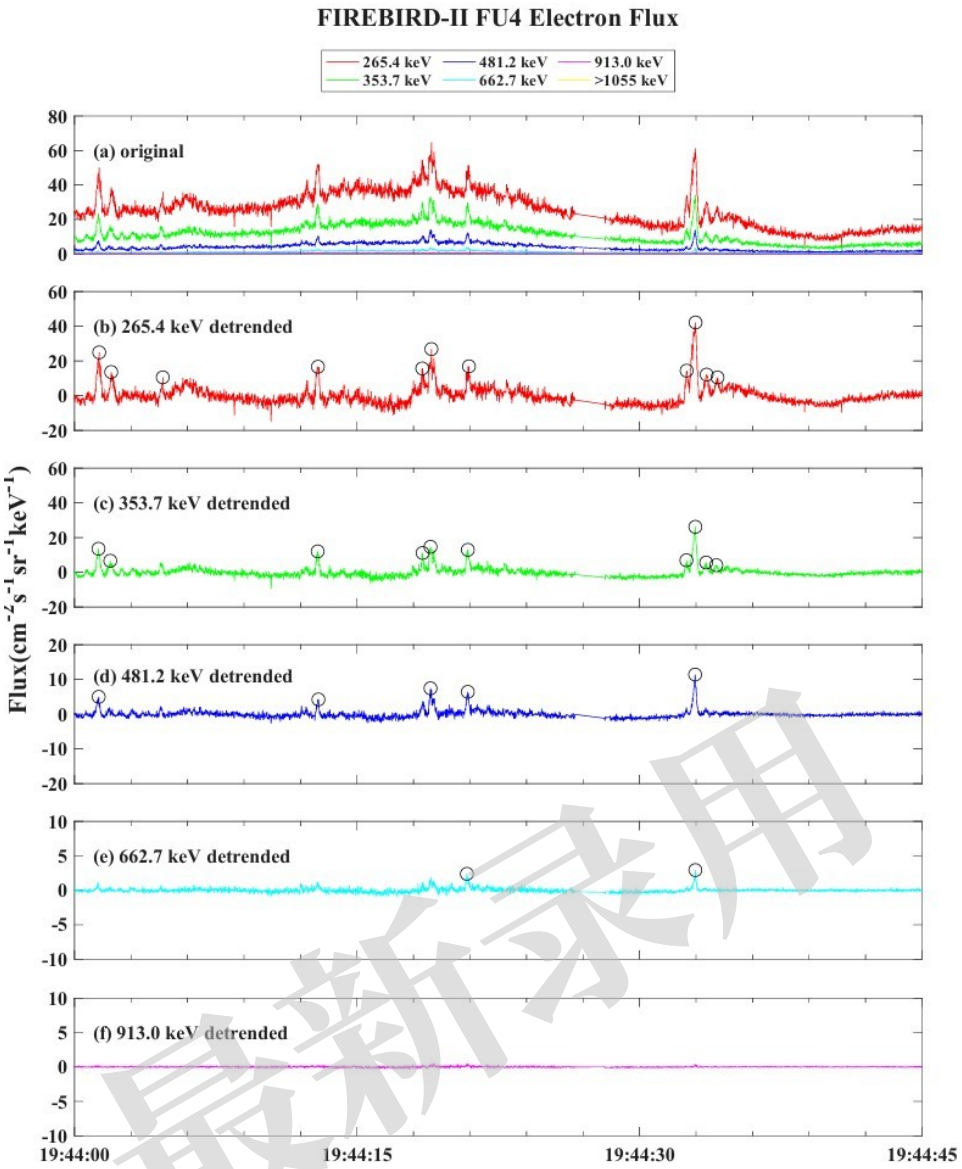


图 1 2016 年 1 月 20 日 19:44:00 至 19:44:45 FIREBIRD-II FU4 卫星观测的电子通量。（a）六个能级电子原始通量数据和挑选出的微爆型电子沉降事件;（b）去趋势处理后 265.4 keV 电子通量数据;（c）去趋势处理后 353.7 keV 电子通量数据;（d）去趋势处理后 481.2 keV 电子通量数据;（e）去趋势处理后 662.7 keV 电子通量数据;（f）去趋势处理后 913.0 keV 电子通量数据。图中横坐标为时间，纵坐标为电子通量，黑色圆圈表示判定的微爆型电子沉降事件。

Fig.1. Electron flux observed at six energy channels by FIREBIRD-II FU4 on 20 January 2016 and corresponding detrended electron fluxes. (a) original electron flux at six energy channels and identified Microburst events;(b) detrended 265.4 keV electron flux; (c) detrended 353.7 keV electron flux; (d) detrended 481.2 keV electron flux; (e) detrended 662.7 keV electron flux; (f) detrended 913.0 keV electron flux. Black circles indicate identified Microburst events.

2 结果分析

2.1 不同能级电子的微爆型沉降事件分布

本节对筛选得到的微爆型电子沉降事件数据进行统计分析，首先根据处理后得到的五个不同能级微爆事件的 L、MLT 值，分析不同能级的微爆型电子沉降事件的全球分布特征，L 的精度取为 0.5，MLT 的精度取为 0.5 h，如图 2 所示。

图 2 为不同能级电子的微爆型沉降事件发生率随 L（左列）和 MLT（右列）的分布，从上至下每一行分别为 265.4 keV、353.7 keV、481.2 keV、662.7 keV、913.0 keV。发生率指不同条件下微爆型电子沉降事件发生次数与相应条件下卫星观测总数的比值。对比不同

最新录用

能级微爆型电子沉降事件的统计结果，可以看出不同能级电子的微爆型沉降事件空间分布特征相近，均主要发生在 L=5-9 之间，即外辐射带区域，和 MLT=6-11 之间。峰值出现在 L=6-7 和 MLT=7 附近，说明微爆型电子沉降事件主要发生在晨侧。值得注意的是，在午夜之前，即在 MLT=20-24 之间，有一小部分微爆型电子沉降事件发生，发生率峰值出现在 MLT=23 附近。

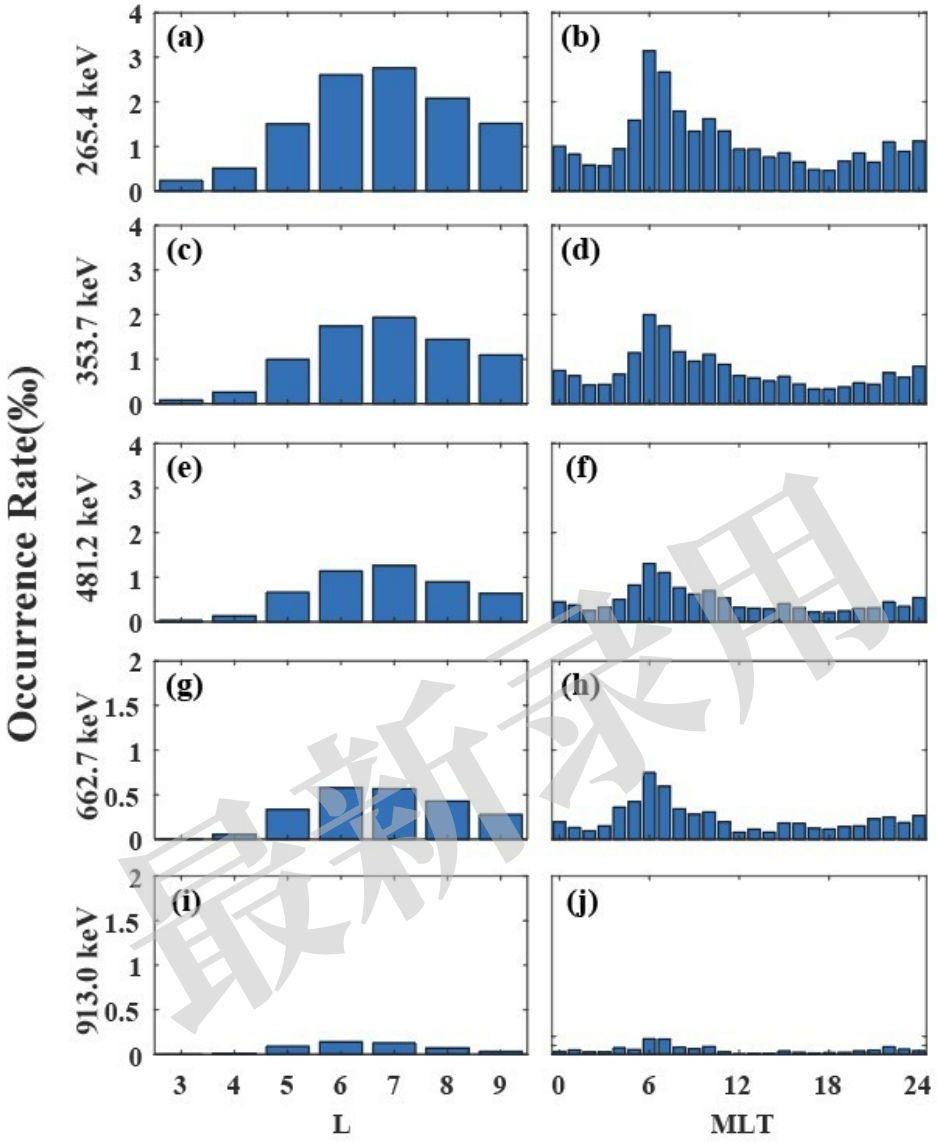


图 2 五个不同能级电子的微爆型沉降事件发生率分别随 L 和 MLT 的分布。第一列为微爆型电子沉降事件发生率随 L 的分布，第二列为微爆型电子沉降事件发生率随 MLT 的分布

Fig.2. The occurrence rate of Microbursts at five energy channels as a function of the L and MLT, respectively. Left column show the L distribution of occurrence rate of Microbursts at five energy channels. Right column show the MLT distribution of occurrence rate of Microbursts at five energy channels.

并且随着电子能量增加，微爆型电子沉降事件发生率逐渐降低，对于 265.4 keV 电子，L=6 处微爆型电子沉降发生率约为 3‰，而对于 481.2 keV 电子 L=6 处的发生率约为 1‰。图中结果与 Douma 等[49]基于 SAMPEX 卫星大于 1.05 MeV 电子通量数据统计分析得到的微爆型电子沉降事件发生率相比，能量越低的电子微爆型电子沉降事件发生率越高，且不同能级的微爆型电子沉降事件发生率具有相似的空间分布特征，这一空间分布特征与哨声模合声波振幅的分布大致相同，表明能量小于 MeV 电子的微爆型沉降可能也是由合声波散射导致的。

最新录用

2.2 微爆型电子沉降对地磁活动的依赖性

微爆型电子沉降发生率随 L 的分布高度依赖于地磁活动水平。图 3 展示了三种地磁活动水平下不同能级微爆型电子沉降发生率随 L 的分布，L 的精度为 0.25。为了比较微爆型电子沉降发生率与沉降幅度受地磁活动水平的影响，参考 Douma 等[49]对地磁活动水平的分类，本文采取 *Kp* 值表征地磁活动水平：平静期为 $Kp \leqslant 3$，扰动期为 $3<Kp \leqslant 4.6$，活跃期为 $4.6<Kp \leqslant 8.7$。以图 3（a）为例，可以看出在平静条件下，265.4 keV 微爆型电子沉降事件发生率整体较低，峰值出现在 L=7 处，大小约为 2.1‰；扰动条件下，随着地磁活动水平增加，微爆型电子沉降发生率显著增加，峰值出现在 L=6.5 处，约为 5.6‰；在活跃条件下，微爆型电子沉降事件发生更加频繁，峰值在 L=6 处，约为 6.2‰。从统计结果中可以看出随着地磁活动水平的增加，微爆型电子沉降事件的发生率也在增加。同时也可以看到随着地磁活动的增加，微爆型电子沉降事件发生的位置在径向上向内拓展，发生率峰值也向较低的 L 值移动，这一特征与前人的研究结论相似 Error: Reference source not found。O'Brien 等[60]根据 1996 年至 2001 年 SAMPEX 卫星的观测数据，发现相对论电子微爆沉降事件发生率与 Dst 指数有类似的关系。Johnston 等[61]报道了磁暴时微爆型相对论电子沉降事件位置随着等离子体层层顶移动的现象，微爆型电子沉降事件位置随着地磁活动的增强而向内移动，但它们仍然停留在等离子体层顶之外。对比图 3（a）-3（e），可以发现不同能级电子微爆型电子沉降事件具有相似的地磁活动依赖性，但随着电子能级的增加，微爆型电子沉降事件的发生率在减小。本文统计结果中所有能级的微爆型电子沉降事件发生位置随着地磁活动增强向内移动，是因为磁暴期间地球等离子体层层顶向内移动。

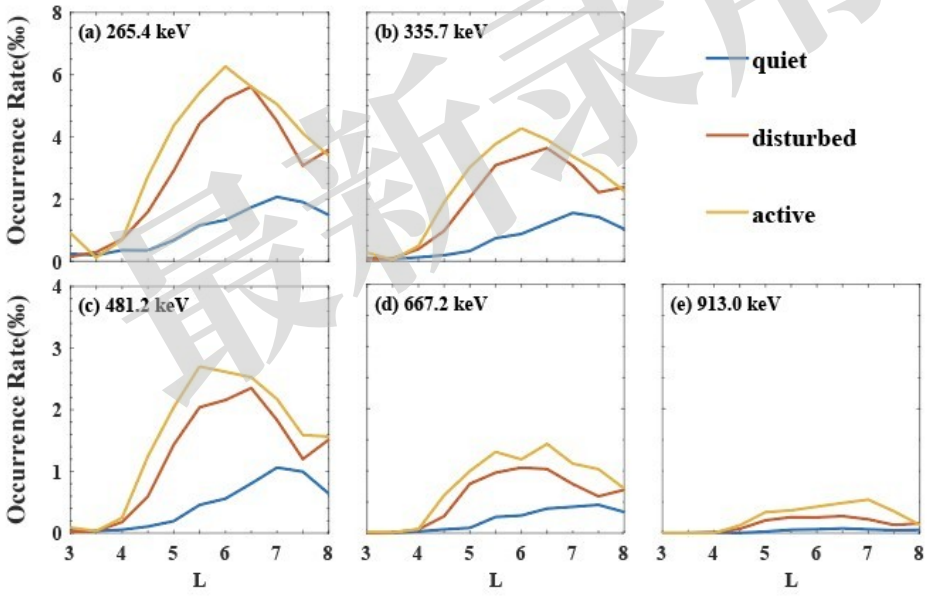


图 3 不同地磁活动条件下不同能级电子微爆型沉降发生率随 L 的分布。蓝线表示平静状态（$Kp \leqslant 3$），红线表示扰动状态（$3 < Kp \leqslant 4.6$），橙线表示活跃状态（$4.6 < Kp \leqslant 8.7$）。

Fig.3. The occurrence rate of microbursts at different energy channels as a function of L under distinct geomagnetic conditions. The blue, red, and orange lines indicate quiet ($Kp \leq 3$), disturbed ($3 < Kp \leqslant 4.6$), and active ($4.6 < Kp \leq 8.7$) conditions, respectively.

2.3 微爆型电子沉降的经纬度分布

图 4 为 265.4 keV 能级微爆型电子沉降的发生率投影在经纬度上的分布，经纬度分辨率均为 1 度。从图 3 的结果可以看出绝大多数微爆型电子沉降事件都发生在外辐射带区域，投射到地球经纬度分布后，可以看出沉降事件集中在高纬度区域，呈现带状分布。图 4 中的颜色表示观测到的微爆型电子沉降事件的发生率，其中北大西洋地区和南极半岛以西的发生率略高，南极半岛以东的发生率较低。这与 Douma 等统计的大于 1.05 MeV 的微爆型电子沉降事件发生率随经纬度分布的特征一致，说明不同能量电子的微爆型沉降事件在经纬度

最新录用

上具有一致的分布特征。

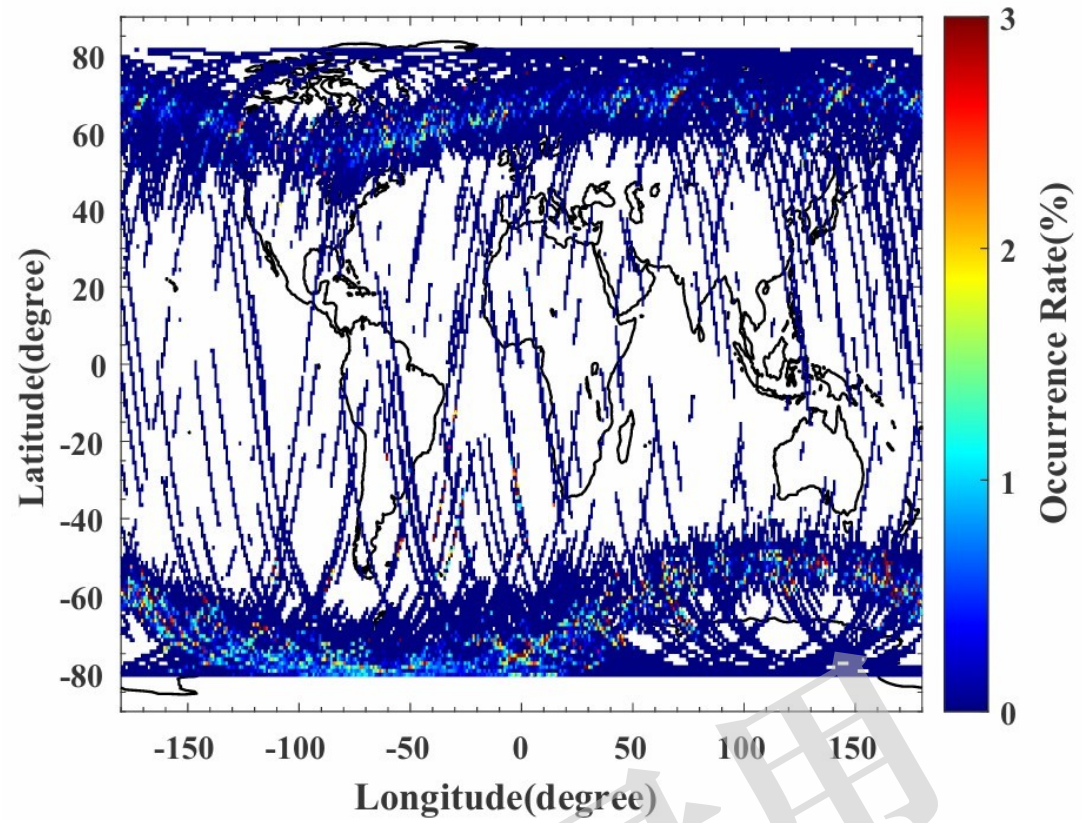


图 4 2015 年至 2022 年期间卫星观测的 265.4 keV 微爆型电子沉降事件发生率在地球经纬度上的分布。

Fig.4. Geographical distribution of occurrence rate of 265.4 keV microburst events during 2015-2022.

2.4 微爆型电子沉降发生率在不同地磁活动水平下的 L-MLT 分布

图 5 展示了用 *Kp* 指数分类的三种不同地磁活动水平下，265.4 keV 能级微爆型电子沉降发生率在 L-MLT 平面上的分布，L 和 MLT 分辨率分别为 0.5 和 1h。颜色以对数标度描述了微爆型电子沉降的发生率。从图中发现微爆型电子沉降主要发生在 L=3-8 的区域， MLT 上的分布集中在晨侧，随着地磁活动水平的增强，MLT 上的分布范围增大，向夜侧和午侧方向扩展。在地磁扰动和活跃时期，MLT=0 和 MLT=12 附近也出现了微爆型电子沉降事件。随着地磁活动水平的增强，微爆型电子沉降发生率整体上提高。这一现象与 Zhang 等[52]的结果一致，该研究基于 ELFIN 卫星数据，统计分析了微爆型电子沉降发生的 L、MLT 位置和平均能量随 AE*指数的变化。图 5 的分布结果与 Li 等[62]中图 2 展示的哨声模合声波幅度在不同地磁活动水平下随 L-MLT 的分布相比，发现微爆型电子沉降事件发生率和哨声模合声波振幅具有相似的分布特征，为哨声模合声波作为数百 keV 电子的微爆型沉降事件的驱动机制提供了统计观测证据。

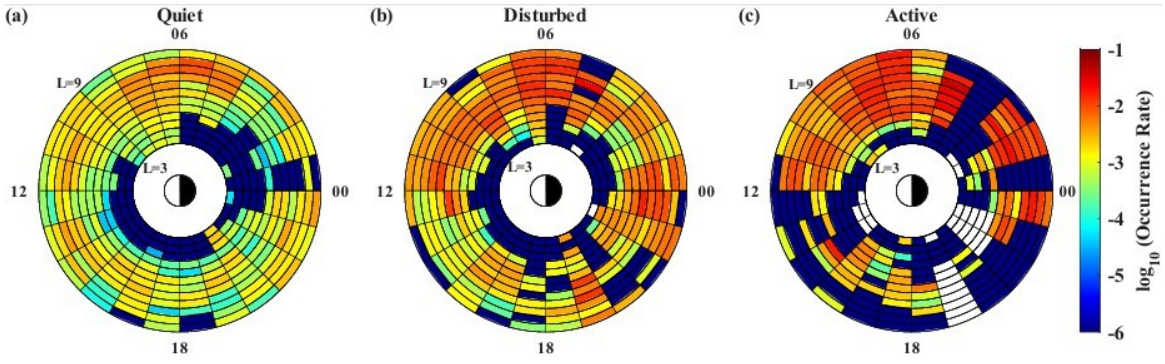


图 5 不同地磁活动条件下微爆型电子沉降发生率的 L-MLT 分布。（a）平静状态（$Kp \leqslant 3$）；（b）扰动状态（$3 < Kp \leqslant$

4.6）；（c）活跃状态（4.6 < *Kp* ≤ 8.7）。

Fig.5. The global distribution of the occurrence rate of microbursts at (a) quiet (*Kp* ≤ 3); (b) disturbed (3 < *Kp* ≤ 4.6); (c) active (4.6 < *Kp* ≤ 8.7) conditions, respectively.

2.5 微爆型电子沉降通量幅度在不同地磁活动水平下的 L-MLT 分布

图 6 展示了用 *Kp* 指数分类的三种不同地磁活动水平下 265.4 keV 能级微爆型电子沉降通量幅度的 L-MLT 分布，L 和 MLT 分辨率分别为 0.5 和 1h。颜色描述了微爆型电子沉降的幅度。与发生率的结果相同，随着地磁活动的增加，微爆型电子沉降幅度也会提高。与图 5 所示的微爆型电子沉降发生率对比可以发现，在发生率较高的区域，微爆型电子沉降幅度比低发生率区域更高，且随地磁活动增强，微爆型电子沉降事件幅度的变化没有发生率的变化显著。原因可能是统计分析时对每个 L、MLT 区域内的所有微爆型电子沉降事件幅度取平均值，在高发生率区域，单个微爆型电子沉降事件幅度可以达到较高的值，但取平均值后这一现象被高发生率区域的多个微爆型电子沉降事件稀释，不如图 5 展示的发生率变化明显。

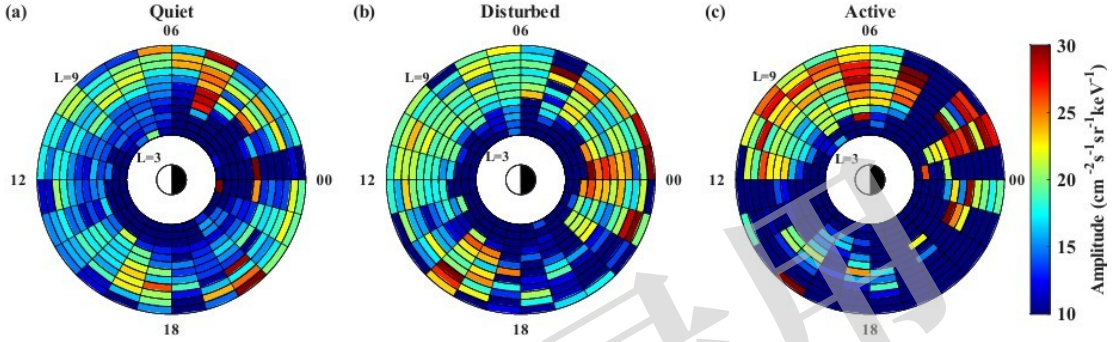


图 6 不同地磁活动条件下微爆型电子沉降幅度的 L-MLT 分布。（a）平静状态（*Kp* ≤ 3）；（b）扰动状态（3 < *Kp* ≤ 4.6）；（c）活跃状态（4.6 < *Kp* ≤ 8.7）。

Fig.6. The global distribution of the amplitude of microbursts at (a) quiet (*Kp* ≤ 3); (b) disturbed (3 < *Kp* ≤ 4.6); (c) active (4.6 < *Kp* ≤ 8.7) conditions, respectively.

3 讨　论

最新录用

微爆型电子沉降事件在不同能级上具有不同的通量变化幅度[52][59]，Johnson 等[59]对 FIREBIRD-II 微爆能谱的分析表明，265.4 keV 与 913.0 keV 能级之间的幅度差异可达 5–20 倍。若对所有能级采用统一阈值，将不可避免地导致高能级漏检和低能级误检。图 7 展示了各能级去趋势处理后电子通量的概率密度分布，其中黑色点划线表示对分布主体拟合正态分布得到的 3 倍标准差（3σ）位置，蓝色虚线表示 95%分位数，红色虚线为本文选取的阈值。从图 7 可以看出，本文选取的阈值在所有能级上均显著高于 95%分位数边界，同时接近但低于 3σ 边界，能够有效排除绝大多数随机涨落引起的误判。对于长时间、大样本的卫星观测数据，实际通量分布较理想正态分布具有更多的极端值，若严格取 3σ 边界则阈值过高，会导致大量真实但幅度较小的微爆事件被排除，本文阈值选择略低于 3σ 边界，在控制误检与避免漏检之间取得了折中。

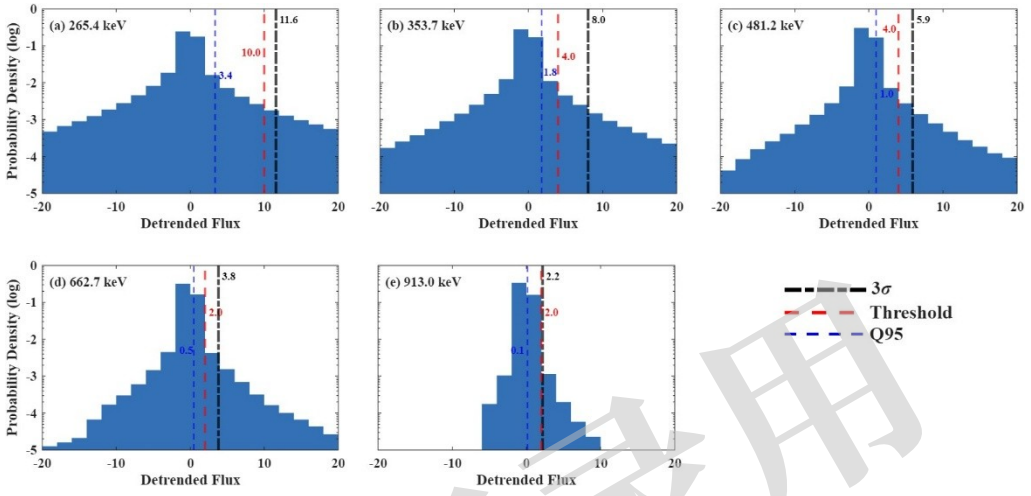


图 7 不同能级去趋势处理后的电子通量概率密度分布。点划线表示拟合正态分布得到的 3 倍标准差，红色虚线表示选取的阈值，蓝色虚线表示 95%分位数。

Fig.7. Probability density distribution of detrended electron flux at different energy channels. The dash-dotted lines indicate the 3σ threshold obtained by fitting a normal distribution to the main body of the distribution, the red dashed lines indicate the selected thresholds, and the blue dashed lines indicate the 95th percentile.

除通量变化阈值外，事件间隔是影响微爆识别结果的另一关键参数。微爆型电子沉降事件的经典定义特征之一为持续时间小于 1 秒，典型约 100–500 ms[36][43]，20 个采样点（375 ms）恰好处于该典型持续时间的范围内。图 8 展示了间隔分别取 10 个（~188 ms）、20 个（~375 ms，本文采用）和 30 个（~562 ms）观测点情况下，各能级微爆事件随 L、MLT 的数量分布，红色、黄色和蓝色分别对应上述三种间隔。对比三组结果可以发现，不同间隔下微爆型电子沉降事件均集中在 L=5–9 的外辐射带区域，MLT 分布峰值均位于晨侧，MLT=23 附近的午夜前次峰值在三组结果中均有体现，事件数量随能级升高而递减的趋势也保持一致。三组结果的差异仅体现在绝对事件数量上，但核心的空间分布和能量依赖性不受影响。

在确认方法可靠性的基础上，本文将统计结果与前人基于 SAMPEX 卫星的大于 1.05 MeV 微爆型电子沉降事件统计进行对比，以揭示微爆型电子沉降在不同能量段的分布特征。Douma 等[49]统计了 1996–2007 年约一个太阳周期内的微爆型电子沉降事件，发现大于 1.05 MeV 能级电子的微爆型电子沉降事件主要发生在 L=3–8 的外辐射带、MLT=0–13 的晨侧区域，发生率随地磁活动增强而增加。本文基于 FIREBIRD-II 的数百 keV 电子统计结果在空间分布上与前人结论一致：事件均集中于晨侧外辐射带，L 分布峰值位于 6–7，MLT 峰值位于 6–7。这一跨能量段的空间分布一致性表明，从数百 keV 到大于 1 MeV 的微爆型电子沉降可能由相同的物理机制驱动，为哨声模合声波作为数百 keV 电子微爆型沉降驱动机制的观点提供了观测支撑。

最新录用

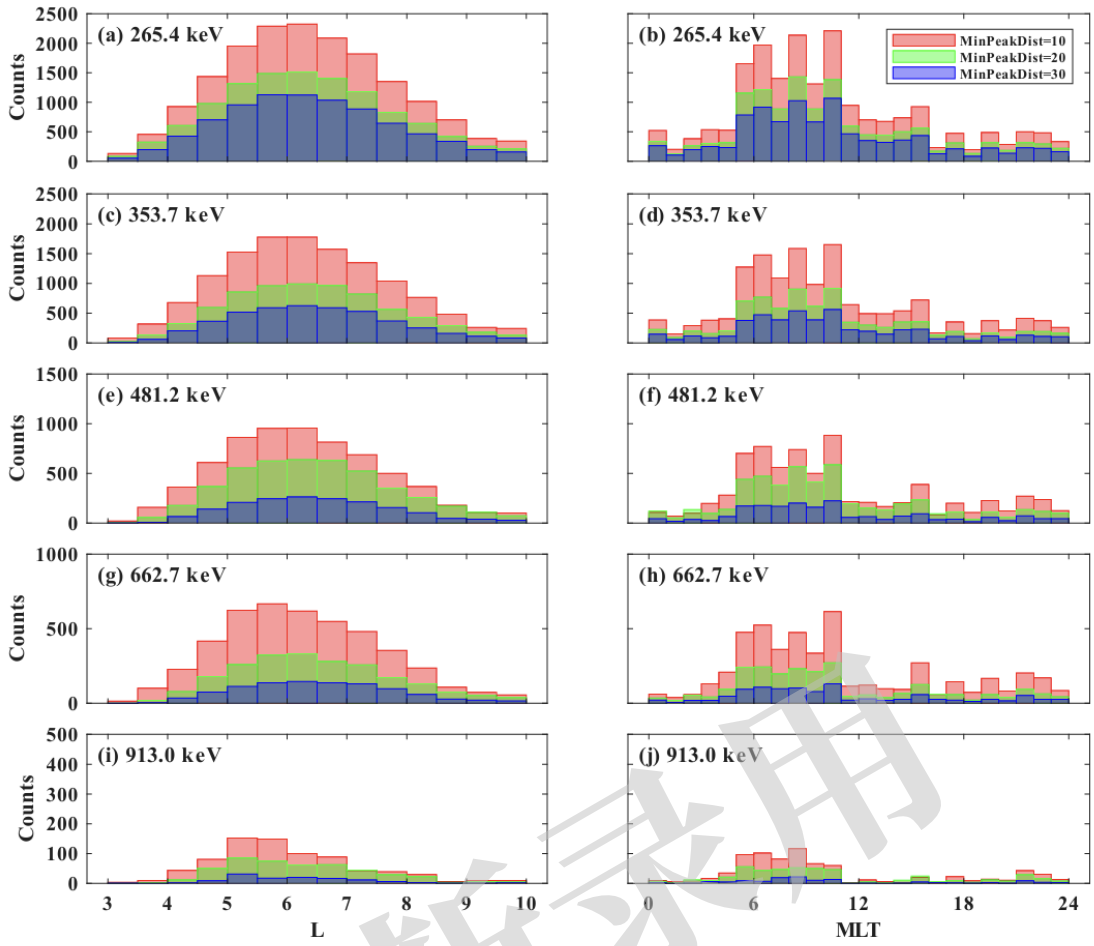


图 8 不同能级不同间隔下微爆型电子沉降事件数量随 L、MLT 的分布。红色表示间隔为 10 个原始数据观测点，黄色表示间隔为 20 个原始数据观测点，蓝色表示间隔为 30 个原始数据观测点。

Fig.8. Distributions of microburst events as a function of L and MLT for different energy channels under different interval thresholds. Red, yellow, and blue indicate interval thresholds of 10, 20, and 30 raw observational data points, respectively.

4 结　论

本文使用 FIREBIRD-II 卫星计划 2015 年 2 月 1 日至 2022 年 3 月 16 日观测的能量小于 1 MeV 的六个能级的高能电子通量数据，统计分析了微爆型电子沉降发生的能量范围、空间分布以及对地磁活动的依赖性，主要结论如下：

（1）能量小于 1 MeV 电子的微爆型沉降事件与能量大于 1 MeV 电子的相比，发生率随 L、MLT 的分布的呈现大致相同的规律，发生率峰值出现在 L=6-7，MLT=6-7 附近。其中 265.4 keV 能级电子的发生率可以达到 3‰，发生率随电子能量的增加而降低，481.2 keV 能级电子的发生率降低到约 1‰。

（2）微爆型电子沉降事件高度受地磁活动影响，在地磁活动平静时，微爆型电子沉降事件发生率较低，随着地磁活动水平越来越剧烈，微爆型电子沉降事件发生率逐渐增加，并且所有能级的微爆型电子沉降事件都会在地磁活动增强时随着等离子体层顶而内移。在极端地磁活动条件下，在 L 值较大的区域也能观测到微爆型电子沉降事件。

（3）微爆型电子沉降事件的发生率随 L、MLT 的时空分布与哨声模合声波振幅分布具有一定的相关性，支持了哨声模合声波作为 MeV 以下能级电子微爆型沉降的驱动机制这一观点，为其对数百 keV 电子的散射效应补充了关键的统计观测证据。

最新录用

参考文献

[5] VAN ALLEN J A, MCILWAIN C E, LUDWIG G H. Radiation observations with satellite 1958 ε[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1959, **64**(3): 271-286. DOI: 10.1029/JZ064i003p00271

[6] LI X L, BAKER D N, KANEKAL S G, *et al*. Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(20): 3827-3830. DOI: 10.1029/2001GL013586

[7] REEVES G D, MCADAMS K L, FRIEDEL R H W, *et al*. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(10): 36. DOI: 10.1029/2002GL016513

[8] BAKER D N, KANEKAL S G, HOXIE V C, *et al*. A long-lived relativistic electron storage ring embedded in Earth's outer Van Allen belt[J]. *Science*, 2013, **340**(6129): 186-190. DOI: 10.1126/science.1233518

[9] BAKER D N, JAYNES A N, HOXIE V C, *et al*. An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts[J]. *Nature*, 2014, **515**(7528): 531-534. DOI: 10.1038/nature13956

[10] XIANG Z, TU W C, LI X L, *et al*. Understanding the mechanisms of radiation belt dropouts observed by Van Allen probes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(10): 9858-9879. DOI: 10.1002/2017JA024487

[11] XIANG Z, TU W C, NI B B, *et al*. A statistical survey of radiation belt dropouts observed by Van Allen probes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(16): 8035-8043. DOI: 10.1029/2018GL078907

[12] MA X, XIANG Z, NI B B, *et al*. On the loss mechanisms of radiation belt electron dropouts during the 12 September 2014 geomagnetic storm[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(6): 598-610. DOI: 10.26464/epp2020060

[13] 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. DOI: 10.1029/2023JA031407

[14] GUO D Y, WANG D D, SHPRITS Y, *et al*. One-step local acceleration process of ultra-relativistic electrons in the center of the outer radiation belt: observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(9): e2024JA033024. DOI: 10.1029/2024JA033024

[15] ROEDERER J G. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation[M]. Berlin: Springer, 1970. DOI: 10.1007/978-3-642-49300-3

[16] LI W, SHPRITS Y Y, THORNE R M. Dynamic evolution of energetic outer zone electrons due to wave-particle interactions during storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A10): A10220. DOI: 10.1029/2007JA012368

[17] MILLAN R M, THORNE R M. Review of radiation belt relativistic electron losses[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(3): 362-377. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.06.019

[18] SUMMERS D, NI B B, MEREDITH N P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04206. DOI: 10.1029/2006JA011801

[19] SUMMERS D, NI B B, MEREDITH N P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04207. DOI: 10.1029/2006JA011993

[20] SHPRITS Y Y, SUBBOTIN D A, MEREDITH N P, *et al*. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and loss[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(14): 1694-1713. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.06.014

[21] ZHANG X J, LI W, MA Q, *et al*. Direct evidence for EMIC wave scattering of relativistic electrons in space[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 6620-6631. DOI: 10.1002/2016JA022521

[22] XIANG Zheng, TAN Jiaqiang, NI Binbin, *et al*. A statistical analysis of the global distribution of plasmaspheric hiss based on Van Allen Probes wave observations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(3): 039401. DOI: 10.7498/aps.66.039401 (项正, 谈家强, 倪彬彬, 等. 基于范阿伦卫星观测数据的等离子体层嘶声全球分布的统计分析[J]. 物理学报, 2017, **66**(3): 039401. DOI: 10.7498/aps.66.039401)

最新录用

[23] NI B B, HUA M, ZHOU R X, *et al*. Competition between outer zone electron scattering by plasmaspheric hiss and magnetosonic waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(8): 3465-3474. DOI: 10.1002/2017GL072989

[24] DONG J H, XIANG Z, NI B B, *et al*. Global empirical models of wave amplitudes and normal angles of banded plasmaspheric hiss obtained from Van Allen Probes observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(9): e2023JA031869. DOI: 10.1029/2023JA031869

[25] 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. DOI: 10.1029/2021GL095714

[26] FENG H T, WANG D D, GUO D Y, *et al*. Lower band chorus wave scattering causing the extensive Morningside diffuse auroral precipitation during active geomagnetic conditions: a detailed case study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(5): e2023JA032240. DOI: 10.1029/2023JA032240

[27] MA Q L, LI W, THORNE R M, *et al*. Electron scattering by magnetosonic waves in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(1): 274-285. DOI: 10.1002/2015JA021992

[28] GU Xudong, HE Ying, NI Binbin, *et al*. Scattering of radiation belt electrons caused by wave-particle interactions with magnetosonic waves associated with plasma density drop[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **63**(6): 2121-2130. DOI: 10.6038/cjg2020N0384 (顾旭东, 何颖, 倪彬彬, 等. 伴随等离子体密度下降的磁声波与辐射带电子的波粒相互作用及其散射效应[J]. 地球物理学报, 2020, **63**(6): 2121-2130. DOI: 10.6038/cjg2020N0384)

[29] NI B B, YAN L, FU S, *et al*. Distinct formation and evolution characteristics of outer radiation belt electron butterfly pitch angle distributions observed by Van Allen Probes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(4): e2019GL086487. DOI: 10.1029/2019GL086487

[30] BLUM L W, HALFORD A, MILLAN R, *et al*. Observations of coincident EMIC wave activity and duskside energetic electron precipitation on 18-19 January 2013[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(14): 5727-5735. DOI: 10.1002/2015GL065245

[31] HENDRY A T, RODGER C J, CLILVERD M A, *et al*. Confirmation of EMIC wave-driven relativistic electron precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(6): 5366-5383. DOI: 10.1002/2015JA022224

[32] SHEN X C, LI W, MA Q L, *et al*. Whistler mode wave-driven electron scattering properties from ELFIN measurements of the precipitation ratio[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(4): e2024JA033363. DOI: 10.1029/2024JA033363

[33] YAHNIN A G, YAHNINA T A, SEMENOVA N V, *et al*. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 8286-8299. DOI: 10.1002/2016JA022765

[34] BRENEMAN A W, CREW A, SAMPLE J, *et al*. Observations directly linking relativistic electron microbursts to whistlermode chorus: Van Allen Probes and FIREBIRD II[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(22): 11265-11272. DOI: 10.1002/2017GL075001

[35] YUAN Z G, LIU K, YU X D, *et al*. Precipitation of radiation belt electrons by EMIC waves with conjugated observations of NOAA and Van Allen satellites[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(23): 12694-12702. DOI: 10.1029/2018GL080481

[36] NAKAMURA R, ISOWA M, KAMIDE Y, *et al*. SAMPEX observations of precipitation bursts in the outer radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A7): 15875-15885. DOI: 10.1029/2000JA900018

[37] LORENTZEN K R, LOOPER M D, BLAKE J B. Relativistic electron microbursts during the GEM storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(13): 2573-2576. DOI: 10.1029/2001GL012926

[38] THORNE R M, O'BRIEN T P, SHPRITS Y Y, *et al*. Timescale for MeV electron microburst loss during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A9): A09202. DOI: 10.1029/2004JA010882

[39] BROWN J W, STONE E C. High-energy electron spikes at high latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(19): 3384-3396. DOI: 10.1029/JA077i019p03384

[40] BLUM L, LI X L, DENTON M. Rapid MeV electron precipitation as observed by SAMPEX/HILT during high-speed stream-driven storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(5): 3783-3794. DOI: 10.1002/2014JA020633

最新录用

[41] BLAKE J B, LOOPER M D, BAKER D N, *et al*. New high temporal and spatial resolution measurements by SAMPEX of the precipitation of relativistic electrons[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **18**(8): 171-186. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00969-8

[42] LORENTZEN K R, BLAKE J B, INAN U S, *et al*. Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A4): 6017-6027. DOI: 10.1029/2000JA003018

[43] TSURUTANI B T, LAKHINA G S, VERKHOGLYADOVA O P. Energetic electron (>10 keV) microburst precipitation, ~5-15 s X-ray pulsations, chorus, and wave-particle interactions: a review[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(5): 2296-2312. DOI: 10.1002/jgra.50264

[44] ELLIOTT S S, BRENEMAN A, COLPITTS C, *et al*. Understanding the properties, wave drivers, and impacts of electron microburst precipitation: current understanding and critical knowledge gaps[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **9**: 1062422. DOI: 10.3389/fspas.2022.1062422

[45] CAPANNOLO L, LI W, MA Q, *et al*. Energetic electron precipitation: multievent analysis of its spatial extent during EMIC wave activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(4): 2466-2483. DOI: 10.1029/2018JA026291

[46] HIKISHIMA M, OMURA Y, SUMMERS D. Microburst precipitation of energetic electrons associated with chorus wave generation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(7): L07103. DOI: 10.1029/2010GL042678

[47] ZHANG X J, THORNE R, ARTEMYEV A, *et al*. Properties of intense field-aligned lower-band chorus waves: implications for nonlinear wave-particle interactions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(7): 5379-5393. DOI: 10.1029/2018JA025390

[48] ZHANG X J, MOURENAS D, ARTEMYEV A V, *et al*. Nonlinear electron interaction with intense chorus waves: statistics of occurrence rates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(13): 7182-7190. DOI: 10.1029/2019GL083833

[49] DOUMA E, RODGER C J, BLUM L W, *et al*. Occurrence characteristics of relativistic electron microbursts from SAMPEX observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(8): 8096-8107. DOI: 10.1002/2017JA024067

[50] OMURA Y, KATOH Y, SUMMERS D. Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A4): A04223. DOI: 10.1029/2007JA012622

[51] LI W, THORNE R M, NISHIMURA Y, *et al*. THEMIS analysis of observed equatorial electron distributions responsible for the chorus excitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A6): A00F11. DOI: 10.1029/2009JA014845

[52] ZHANG X J, ANGELOPOULOS V, MOURENAS D, *et al*. Characteristics of electron microburst precipitation based on high-resolution ELFIN measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(5): e2022JA030509. DOI: 10.1029/2022JA030509

[53] SHUMKO M, SAMPLE J, JOHNSON A, *et al*. Microburst scale size derived from multiple bounces of a microburst simultaneously observed with the FIREBIRD-II CubeSats[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(17): 8811-8818. DOI: 10.1029/2018GL078925

[54] KANG N, BORTNIK J, ZHANG X J, *et al*. Relativistic microburst scale size induced by a single point-source chorus element[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(23): e2022GL100841. DOI: 10.1029/2022GL100841

[55] KANG N, BORTNIK J, MA Q L, *et al*. Modeling the global distribution of chorus wave induced relativistic microburst spatial characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(3): e2023JA032250. DOI: 10.1029/2023JA032250

[56] KLUMPAR D, SPRINGER L, MOSLEH E, *et al*. Flight system technologies enabling the twin-CubeSat FIREBIRD-II scientific mission[C]//29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, Utah, 2015.

[57] JOHNSON A T, SHUMKO M, GRIFFITH B, *et al*. The FIREBIRD-II CubeSat mission: focused investigations of relativistic electron burst intensity, range, and dynamics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(3): 034503. DOI: 10.1063/1.5137905

最新录用

[58] CREW A B, SPENCE H E, BLAKE J B, *et al*. First multipoint in situ observations of electron microbursts: initial results from the NSF FIREBIRD II mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(6): 5272-5283. DOI: 10.1002/2016JA022485

[59] JOHNSON A T, SHUMKO M, SAMPLE J, *et al*. The energy spectra of electron microbursts between 200 keV and 1 MeV[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(11): e2021JA029709. DOI: 10.1029/2021JA029709

[60] O'BRIEN T P, LORENTZEN K R, MANN I R, *et al*. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: evidence for dual ULF and VLF acceleration[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A8): 1329. DOI: 10.1029/2002JA009784

[61] JOHNSTON W R, ANDERSON P C. Storm time occurrence of relativistic electron microbursts in relation to the plasmapause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A2): A02205. DOI: 10.1029/2009JA014328

[62] 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. DOI: 10.1029/2009GL037595

[63] XIANG Z, LI X L, BAKER D N, *et al*. Bursty precipitation of relativistic electrons unveiled by CIRBE/REPTile-2 measurements and their physical implications[J]. *AGU Advances*, 2026, **7**(1): e2025AV001913. DOI: 10.1029/2025AV001913

第一作者简介　郭浩智　男，2001 年 4 月出生于湖北省黄冈市，现为武汉大学地球与空间科学技术学院硕士研究生，主要研究方向为空间波粒相互作用。



通信作者简介　项正　男，1990 年 8 月出生于湖北省黄冈市，现为武汉大学地球与空间科学技术学院副教授，博士生导师，主要研究方向包括低轨卫星、空间波粒相互作用、人工影响地球辐射带等。



最新录用