

WANG Chunqin, SHEN Guohong, CHANG Zheng, HUANG Cong, ZHANG Shenyi, HOU Donghui, SUN Ying. Monitoring Results of FY-3E Satellite High-energy Particle Detector (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(5): 1342–1357. CSTR:32142.14.cjss.2024-0121. DOI:10.11728/cjss2025.05.2024-0121

FY-3E 卫星高能粒子探测器监测结果*

王春琴^{1,2} 沈国红^{1,2} 常 峥^{1,2} 黄 聪³
张坤毅^{1,2} 侯东辉^{1,2} 孙 莹^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国气象局国家空间天气监测预警中心 北京 100813)

摘要 FY-3E 卫星高能粒子探测器开展轨道空间高能电子和高能质子监测, 可获取卫星本体三个方向 ($-z$ 朝天向、 $-x$ 飞行反方向和 $+y$ 垂直轨道面方向) 0.15~5.7 MeV 的高能电子和 3~300 MeV 的高能质子数据. 通过分析高能粒子探测器 2021 年 7 月至 2024 年 5 月高能质子、高能电子探测数据, 得到卫星本体三个方向高能质子和高能电子空间分布区域及长时间演化结果. 研究表明, 能量越低, 分布范围越大, 结构越复杂, 其中较低能量的电子在南北高纬度上呈现出多条带结构; 电子通量强度 $+y$ 方向的最高, 动态变化最为显著, $-z$ 方向反之. 质子则在三个方向上的差异相对较小; 2024 年 5 月的极强地磁暴显著影响到电子和质子的空间分布和通量强度. 数据结果表明, FY-3E 高能粒子探测器能够对卫星轨道空间高能粒子动态做出灵敏响应, 探测数据不仅可以支持开展轨道环境评估、航天器辐射防护设计以及星上设备安全布局等, 还有助于辐射带的动态及极端事件研究的深入开展.

关键词 FY-3E 卫星, 高能质子, 高能电子, 地球辐射带

中图分类号 P353

Monitoring Results of FY-3E Satellite High-energy Particle Detector

WANG Chunqin^{1,2} SHEN Guohong^{1,2} CHANG Zheng^{1,2}
HUANG Cong³ ZHANG Shenyi^{1,2} HOU Donghui^{1,2} SUN Ying^{1,2}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

3(National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100813)

Abstract FY-3E satellite is one of the Fengyun-3 polar orbit meteorological satellite series and also the first morning dusk orbit meteorological satellite in China. The satellite orbits at an altitude of about

* 国家重点研发计划项目资助 (Y7BZ33A240)

2024-09-29 收到原稿, 2025-01-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

830 kilometers with an inclination angle of 98.75° . The high-energy particle detector mounted on the satellite is used to monitor the charged particle radiation environment, which can provide 0.15 MeV to 5.7 MeV high-energy electron and 3 MeV to 300 MeV proton flux data in three directions of the satellite body ($-z$ skyward direction, $-x$ flight reverse direction, and $+y$ vertical orbital plane direction). The data of high-energy protons and electrons monitored by the detector from July 2021 to May 2024 are analyzed, and the spatial distribution and long-term evolution results are obtained in the three directions as follows. The lower the energy, the larger the distribution range, and the more complex the structure, especially for energy electrons, which exhibit multiple stripes at both high latitudes of north and south. Among the three directions, the flux intensity of electrons in the $+y$ direction is the highest, and the $-z$ direction is the smallest. The difference of protons in the three directions is relatively small. The $+y$ direction electrons are most significantly affected by environmental disturbances. The extremely strong geomagnetic storm in May 2024 significantly affects the spatial distribution and flux intensity of both electrons and protons. The data results indicate that the high-energy particle detector can respond sensitively to the dynamics of high-energy particles in space. The measured data can not only support the assessment of orbital environment, serve for the design of spacecraft radiation protection and the secure layout of satellite equipment, but also can help to further understand the dynamic physics process of charged particles in radiation belts during disturbances, especially under the influence of extreme events.

Key words FY-3E satellite, High energy proton, High energy electron, Earth radiation belt

0 引言

高能带电粒子是影响航天器安全的重要因素之一^[1], 是空间天气预警的重要内容. 地球辐射带是近地空间高能粒子辐射的主要来源, 表现出复杂的动态特性^[2]. 随着空间技术的发展, 更多的卫星配置了空间环境探测仪器用于开展辐射带带电粒子探测, 由此获取更全面的地球辐射带的结构、强度等动态特性信息, 更好地服务于空间天气预报、航天器设计以及空间环境研究等. 地球表面以上几百公里高度范围是大量应用卫星运行的区域, 也是辐射带建模中非常重要的区域之一^[3], 其中极轨卫星可以在短时间内获取辐射带的动态变化信息, 有助于捕捉辐射带中的快速变化现象, 为研究辐射带提供重要数据.

FY-3E 卫星是风云三号极轨气象系列卫星之一, 也是中国首颗晨昏轨道气象卫星, 该卫星于 2021 年 7 月 5 日发射. 卫星轨道高度约 836 km, 倾角 98.75° , 轨道周期 101.5 min, 降交点为凌晨 05:30 LT, 呈三轴稳定姿态运行^[4]. 高能粒子探测器为 FY-3E 星上空间环境监测器 II 型 (SEM-II) 载荷之一, 安装在卫星本体的三个正交方向 ($-z$ 朝天向、 $-x$ 飞行反方向和 $+y$ 背阳向), 开展轨道空间 0.15~5.7 MeV 的高能电子和 3~300 MeV 的高能质子实时监测. 探测器能

够获取卫星本体三个特征方向粒子辐射空间分布、时间演化等动态信息, 可为航天器辐射防护设计、长期在轨安全保障、辐射带研究和建模提供数据支持.

本文根据高能电子探测器 (HEED) 和高能粒子探测器 (HEPD) 两类探测器的基本情况以及相关数据, 重点分析了两类仪器对轨道空间带电粒子辐射动态的观测响应结果并得出相应结论.

1 仪器及数据

FY-3E 卫星高能粒子探测器包括三个方向高能粒子探头, 共用一个电子学箱. 三个方向的探头分别安装在 FY-3E 卫星三个正交方向, 如图 1 所示, 探测视场分别指向朝天向 ($-z$)、后退向 ($-x$) 和背阳向 ($+y$). 各探头通过电缆与电子学箱连接, 由电子学箱内数据处理单元对各探头的响应信号进行采集和处理. 高能粒子探测器主要技术指标列于表 1. 高能粒子探测器三个方向探头设计完全一致, 包含高能质子和高能电子二种组件.

高能质子组件包含准直系统和传感器系统, 如图 2 所示. 准直系统上端和下端的开口直径分别为 31 mm 和 10 mm, 长度为 32 mm, 形成 40° 的测量视场. 在探头外部设置铜屏蔽, 降低从侧面斜入射粒子的影响; 在准直仪中则使用了中心磁场强度可达到

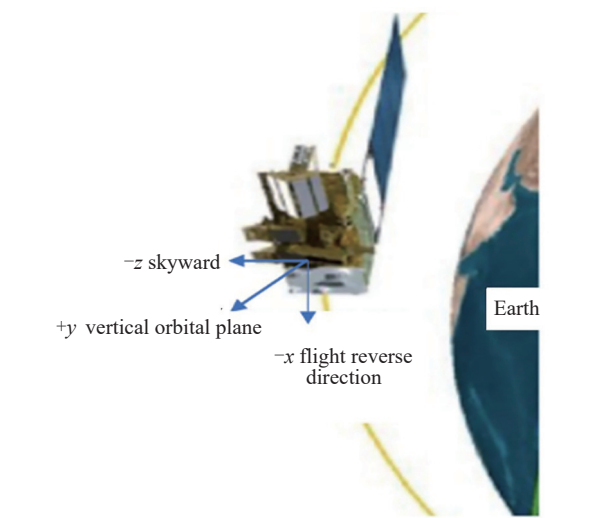


图 1 仪器相对卫星的安装方向
Fig. 1 Schematic diagram of the installation direction of the instrument on the satellite

表 1 高能粒子探测器探测技术指标
Table 1 Technical specifications for high-energy particle detector

指标名称	高能质子	高能电子
探测能道/MeV	3~5, 5~10, 10~26, 26~40, 40~100, 100~300	0.15~0.35, 0.35~0.65, 0.65~1.2, 1.2~2.0, 2.0~5.7
仪器张角/(°)	40	30
几何因子/(cm ² ·sr)	0.30	0.05
时间分辨率/s	2	2
地面定标精度	优于10%	优于8.7%

0.42 T 的永久磁铁对<1 MeV 的电子进行偏转, 图 3 地面偏转试验结果所示偏转率超过 90%. 传感器前使用了 15 μm 的铝挡光层, 阻挡阳光 (硅传感器对可见光很敏感), 并阻挡 1 MeV 以下的质子. 传感器系统中使用了 5 片离子注入型硅半导体传感器, 第 1 片传感器 (D1) 厚度为 500 μm , 直径为 12 mm; 其余 4 片传感器 D2, D3, D4, D5 厚度均为 1 mm, 直径为 12 mm. 传感器系统测量能量粒子在传感器中的能量损失, 由电子学提取 D1, D2+D3+D4 和 D5 的输出信号, 结合幅度分析法和特定的逻辑工作方式 (见表 2), 实现高能质子的能谱和通量测量.

高能电子组件准直系统由探头外部结构、反散射结构和挡光层组成, 见图 4 所示. 准直系统上端和下端的开口直径分别为 24 mm 和 5 mm, 长度为

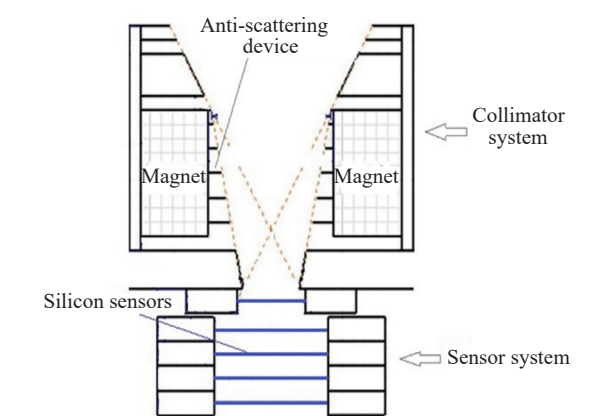


图 2 高能质子组件结构
Fig. 2 High-energy proton component structure

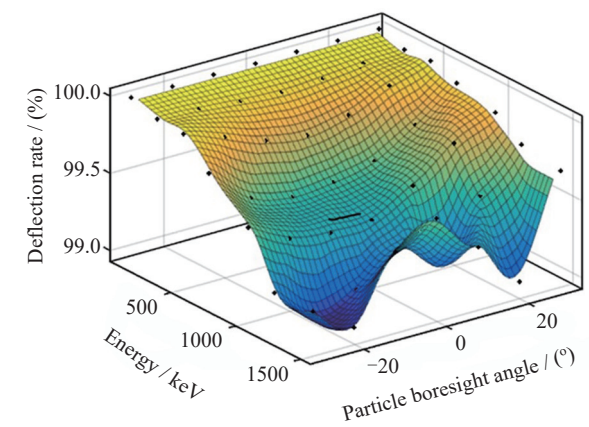


图 3 0.42 T 磁铁偏转电子地面试验结果
Fig. 3 Ground test results of deflection of high-energy electrons by a 0.42 T magnet

32 mm, 形成 30° 的测量视场. 为了减少材料中电子的弹性散射效应, 在高能电子探针内增加了一个锯齿形结构的反向散射装置, 以防止电子散射对测量的干扰. 图 5 为无锯齿和采用锯齿结构响应效率地面仿真结果, 电子在准直仪内表面散射后进入探测单元会造成伪计数增加, 造成响应效率偏大, 采用锯齿结构会显著减少散射粒子的干扰. 传感器前使用了 15 μm 的铝挡光层, 阻挡阳光和 30 keV 以下的电子. 传感器系统使用了 6 片离子注入型硅半导体传感器, 第 1 片传感器 D1 厚度为 300 μm , 直径为 12 mm; 其余 5 片传感器 D2, D3, D4, D5, D6 厚度均为 1 mm, 直径为 12 mm. 电子学获取分三路, 分别为第 1 片 (D1)、第 2 和第 3 片 (D2+D3)、第 4, 5, 6 片 (D4+D5+D6) 传感器的能量损失信号, 采用幅度分析法和特定的逻辑

表 2 高能质子传感器逻辑工作方式
Table 2 Logic working mode of high-energy proton sensors

能谱	能量范围/MeV	逻辑工作方式
P1	3~5	$D1_{2.64} \cdot \overline{D1}_{4.76} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{2.0} \cdot \overline{D5}_{0.7}$
P2	5~10	$D1_{4.76} \cdot \overline{D1}_{8.30} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{4.51} \cdot \overline{D5}_{0.7}$
P3	10~26	$D1_{2.00} \cdot (D2 + D3 + D4)_{4.51} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{25.0} \cdot \overline{D5}_{0.7}$
P4	26~40	$(D2 + D3 + D4)_{9.76} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{25.0} \cdot D5_{0.7}$
P5	40~100	$(D2 + D3 + D4)_{4.33} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{9.77} \cdot D5_{0.7}$
P6	100~300	$(D2 + D3 + D4)_{2.08} \cdot \overline{(D2 + D3 + D4)}_{4.33} \cdot D5_{0.7}$

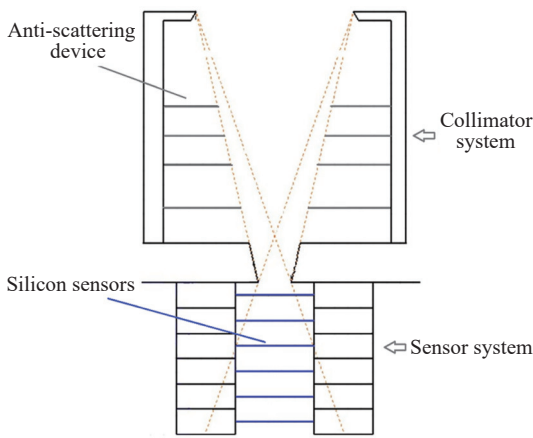


图 4 高能电子组件结构

Fig. 4 High-energy electron component structure

工作方式 (见表 3) 区分各探测能道. 图 6 为地面加速器得到的电子各道响应效率曲线. 详细的仪器定标内容和结果参见文献 [5, 6].

2 观测结果

2.1 高能粒子辐射轨道全球分布

辐射带带电粒子通量变化与 Dst 指数有密切的关系. Dst 指数对辐射带高能电子的影响主要表现在磁暴期间的快速变化上^[7-9], Dst 指数的变化也与高能电子注入辐射带槽区事件的发生有密切关系^[10,11]. Dst 指数对高能质子的影响则表现在高能质子在磁暴期间分布边界收缩, 质子通量下降或伴随太阳质子事件发生太阳质子向更低纬度的注入和新的质子辐射带的形成^[12-14]. 因此, 这里依据 Dst 指数, 给出不同

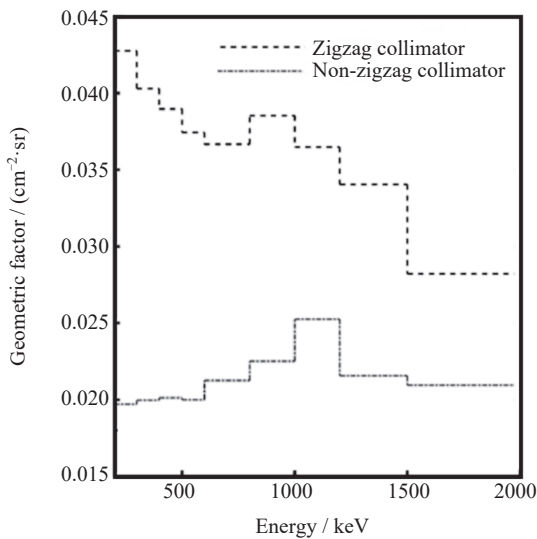


图 5 锯齿结构和非锯齿结构准直器探测效率仿真结果

Fig. 5 Simulation results of zigzag and non-zigzag collimator detection efficiency

地磁扰动状态对卫星轨道高能粒子辐射全球分布的影响 ($-50 \text{ nT} < Dst \leq -30 \text{ nT}$ 为小磁暴, $-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$ 为中等磁暴, $Dst \leq -100 \text{ nT}$ 为大地磁暴). Dst 指数数据来源为 WDC 世界地磁数据中心 (日本京都)^{*}. 对于高能质子辐射的影响, 综合考虑太阳质子事件发生情况, 数据来源为美国国家气象信息中心^{**}. 地磁扰动期间辐射带电子通量的变化可能持续数小时到数天^[15], 取决于磁暴的强度和持续时间. 为了完整地显示磁暴影响下带电粒子辐射全球分布变化, 以 Dst 指数达到最低值对应的日期为开始, 提取连续不少于 7 天的粒子通量数据绘制并分析其全球分布.

* <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

** <https://www.ngdc.noaa.gov/stp>

表 3 电子探头逻辑工作方式
Table 3 Logic working mode of electronic probes

能道	能量	逻辑工作方式
E1	0.15~0.35 MeV	$A_{10.14} \cdot \overline{A_{10.35}} \cdot \overline{A_{20.2}} \cdot \overline{A_{30.2}}$
E2	0.35~0.65 MeV	$\overline{A_{10.65}} \cdot A_{20.2} \cdot \overline{A_{20.56}} \cdot \overline{A_{30.2}}$
E3	0.65~1.20 MeV	$\overline{A_{11.2}} \cdot A_{20.56} \cdot \overline{A_{21.14}} \cdot \overline{A_{30.2}}$
E4	1.2~2.0 MeV	$\overline{A_{11.2}} \cdot (A_2 + A_3)_{1.14} \cdot \overline{(A_2 + A_3)}_{1.94}$
E5	2.0~5.7 MeV	$\overline{A_{11.2}} \cdot (A_2 + A_3)_{1.94} \cdot \overline{(A_2 + A_3)}_{3.0}$

注 A1即为传感器D1, A2代表传感器D2+D3, A3代表传感器D4+D5+D6.

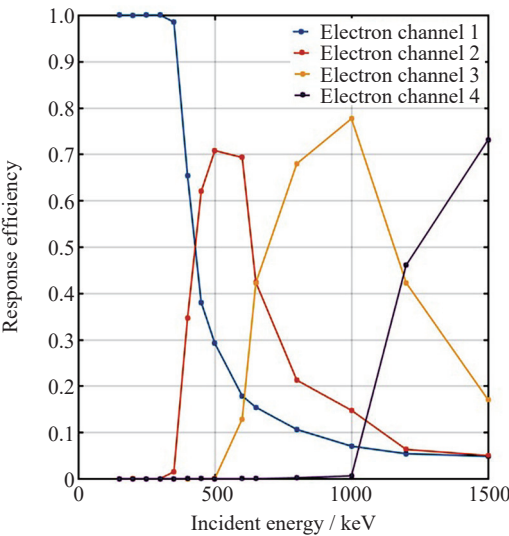


图 6 电子各道响应效率曲线加速器定标结果
Fig. 6 Calibration results of the response efficiency of electron channels

2.1.1 高能电子辐射全球分布

图 7~9 分别给出了地磁平静/中等磁暴和大地磁暴三类地磁扰动期间卫星沿轨后退向 (-x)、朝天向 (-z) 和背阳向 (+y) 三个方向 0.15~0.35 MeV 和 0.65~1.2 MeV 电子通量全球分布. 图 7 所示地磁平静期间 (*Dst* 指数最小值为 -21 nT), 轨道空间 0.15~0.35 MeV 电子辐射分别呈菱形结构和条带结构分布于南大西洋负磁异常区 (经度: -100°-60°, 纬度: -60°-0°) 和南北高纬. 三个方向表现出明显的分布结构和通量强度差异. 在 +y 方向电子辐射表现出多条带结构, 包括: 覆盖西经区域、南北纬 30°附近的条带, 覆盖经度 -60°-60°范围以外、南北纬 30°-60°的条带, 以及覆盖全经度范围、南北纬 60°附近的条带. -x 方向电子辐射不再呈现分布于南北纬 30°附近的条带结构, 而 -z 方向电子辐射仅存在南北纬 60°

附近的单条带结构. 从通量强度上来看, 三个方向在南大西洋异常区的电子峰值通量强度均要强于南北纬条带, 三个方向中 +y 方向电子通量强度明显强于 -x 方向和 -z 方向, -z 方向电子通量强度则相对最弱. 0.65~1.2 MeV 电子呈现出相似的异常区分布结构和相对简单的南北纬 60°附近单条带分布结构, 三个方向中仅在 +y 方向出现南北纬条带结构, 在其他两个方向只有南纬出现条带分布结构. 如图 8 所示中等磁暴发生期间 (*Dst* 指数最小值为 -65 nT), 电子辐射的条带分布结构和通量强度发生变化, 电子在三个方向条带结构变宽并且通量增强. 其中 0.65~1.2 MeV 电子在 -x 方向北纬也出现了明显的条带结构分布, 该能道电子在 -z 方向分布未受到明显影响. 图 9 显示大地磁暴发生期间 (*Dst* 指数最小值达到 -412 nT) 上述两个能道电子通量全球分布情况. 该起磁暴为卫星在轨以来遭遇的最强一起磁暴, 也是近 20 年以来发生的最强一起磁暴, 由图 9 中反映出, 该起强磁暴极大地影响到电子的条带分布, 甚至影响到南大西洋异常区, 三个方向的电子分布均出现相应变化. 0.15~0.35 MeV 电子条带通量强度极大增长, 条带结构进一步扩展变宽, 在南纬扩展到了异常区, 使得南大西洋异常区偏向东南的区域电子辐射通强度出现显著增强. 0.65~1.2 MeV 电子表现出与 0.15~0.35 MeV 电子相似的变化, 并且在 -z 方向高纬区域也出现了条带分布.

轨道粒子辐射空间分布的变化是地球辐射带动态的反映. 以磁壳 *L* (赤道平面内以地球半径为单位的地球中心距离, *L* 计算依据卫星轨道、姿态数据, 采用 IGRF 磁场模型得到) 组织数据, 给出上述三起扰动时段 *y* 方向电子通量随地球辐射带的位置变化 (见图 10). 不同地磁扰动影响到电子在辐射带的强度和

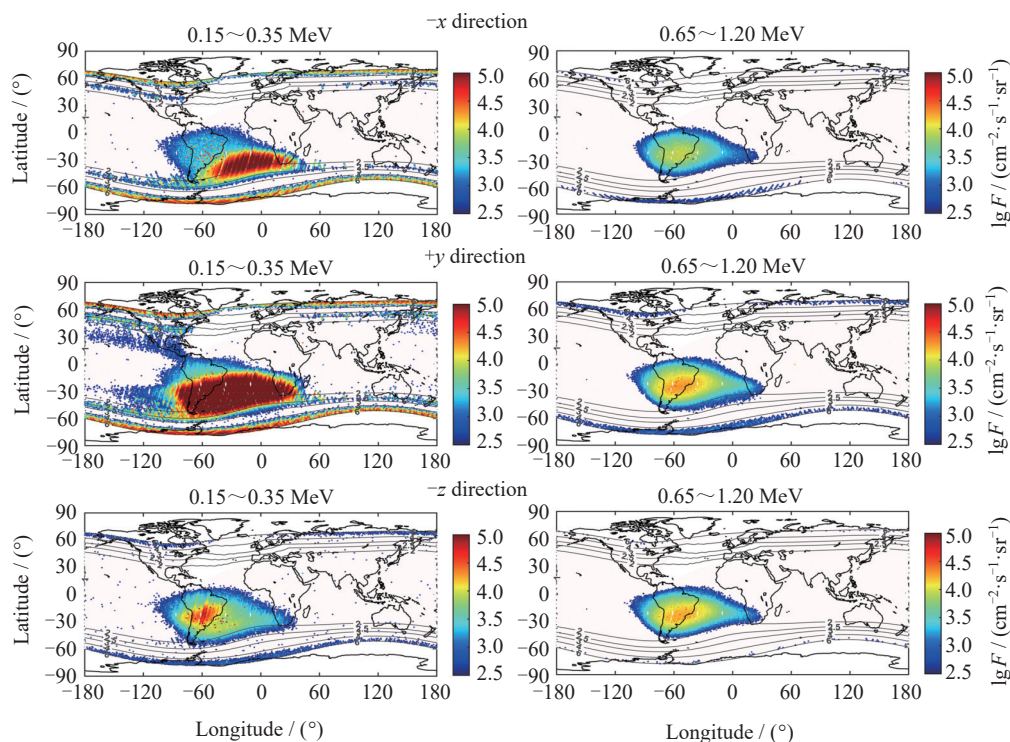


图 7 FY-3E 卫星 2024 年 2 月 1 日探测的地磁平静期间 (Dst 最小值为 -21 nT) 三个方向高能电子辐射全球分布

Fig. 7 Global distribution of high-energy electron radiation in three directions during quiet period (minimum value of Dst is -21 nT)

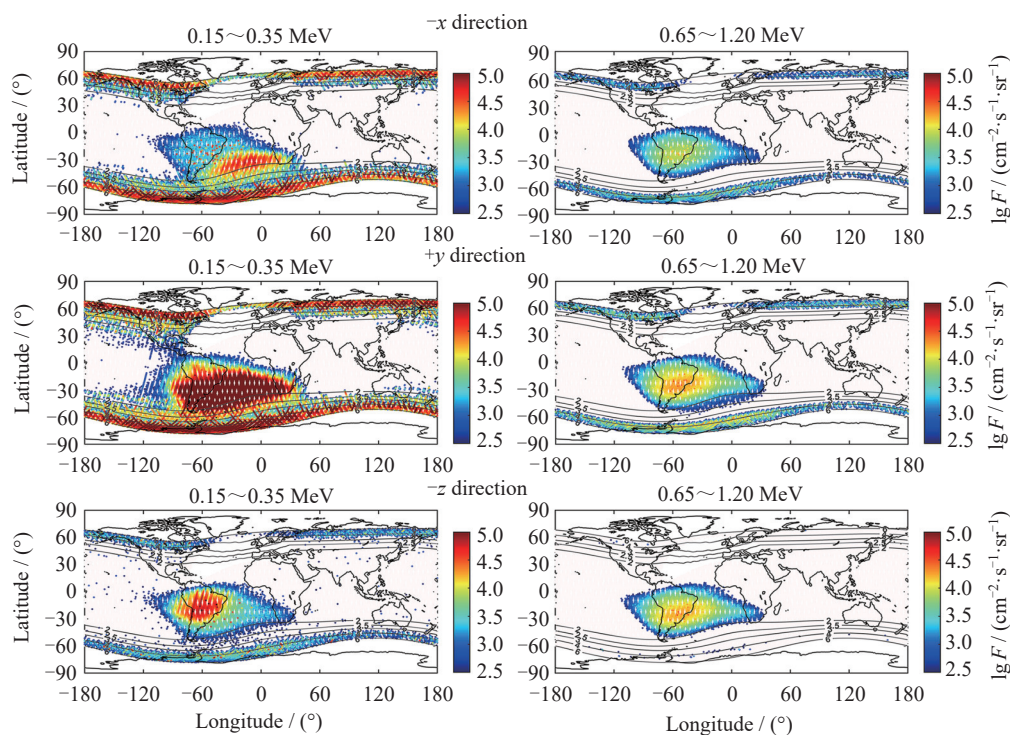


图 8 中等磁暴期间 (Dst 最小值为 -65 nT) 三个方向高能电子辐射全球分布

Fig. 8 Global distribution of high-energy electron radiation in three directions during moderate geomagnetic storm (minimum value of Dst is -65 nT)

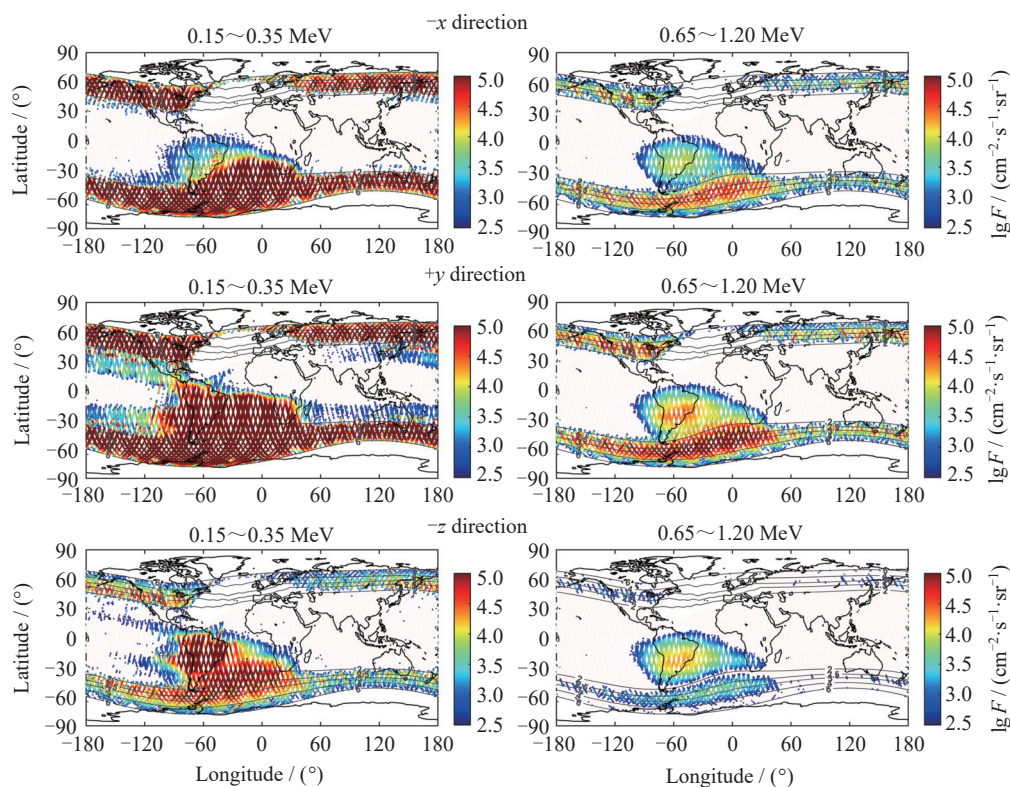


图9 强磁暴期间 (Dst 最小值为 -412 nT) 三个方向高能电子辐射全球分布

Fig. 9 Global distribution of high-energy electron radiation in three directions during a strong geomagnetic storm (minimum value of Dst is -412 nT)

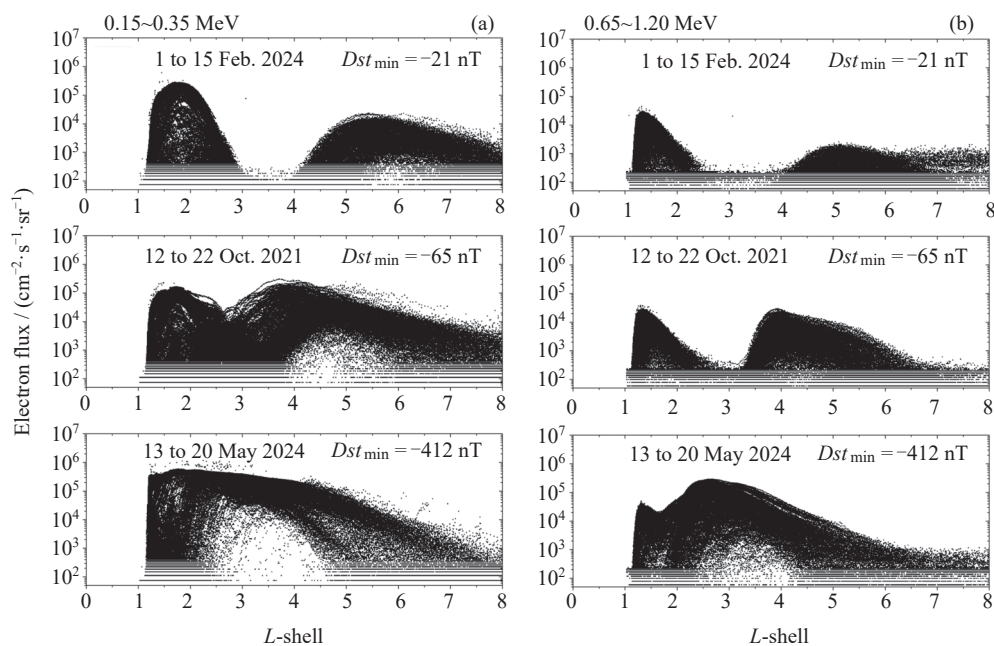


图10 不同环境扰动时段 0.15~0.35 MeV (a) 和 0.65~1.2 MeV (b) 高能电子通量辐射带位置变化

Fig. 10 Variation of 0.15~0.35 MeV (a) and 0.65~1.2 MeV (b) electron flux in radiation belt during different disturbance periods

位置分布, 图 5 强地磁暴使得电子充满了整个槽区并深入到内辐射带区域, 不同的机制, 如行星际激波诱导电场、径向扩散、亚暴相关注入和增强对流电场, 已被提出是这种深注入的驱动原因^[16]. 高能电子通量增强则可能是磁暴时波 (如超低频波或合声波等) 粒相互作用加速电子导致^[17,18]. 筛选出纬度 $> 0^\circ$ 的数据在 L 的分布 (见图 11) 清晰地显示出 $0.15 \sim 0.35$ MeV 电子“条带状”结构出现在 $L < 2$ 的区域, 在地磁平静期该结构可能来自澳大利亚 NWC 台站发射机的影响, 其发射的甚低频信号能够渗入到内磁层中 $L < 2$ 的区域, 通过波粒相互作用对数百 keV 电子的动态变化产生影响^[19,20]. 地磁暴期间来自磁层压缩和外磁层粒子注入会引发及至 $L \approx 1.1$ 的内磁层波动, 这些结构通常由高能粒子与甚低频 (ULF) 波的相干相互作用引起^[21].

2.1.2 高能质子辐射全球分布

图 12~14 分别给出了无太阳质子事件、太阳质子事件伴随小磁暴 (Dst 指数最小为 -33 nT), 以及太阳质子事件伴随大地磁暴 (Dst 指数最小为 -412 nT) 期间, 卫星沿轨三个方向 $3 \sim 5$ MeV 和 $10 \sim 26$ MeV 质子辐射通量全球分布. 由图 12 可以看出, 在无太阳质子事件期间轨道质子辐射主要来自南大西洋负磁异常区. 三个方向中, $+y$ 和 $-x$ 方向受到质子辐射影响的区域范围明显大于 $-z$ 方向, 其中 $3 \sim 5$ MeV 质子辐射在 $+y$ 和 $-x$ 方向呈现双峰区域分布. 图 13 为伴随小磁暴太阳质子事件发生期间的高能质子全球分布, 在此期间太阳高能质子由南北极区注入, 使得轨道质子辐射在南北 60° 以上纬度范围出现响应增强. 三个方向高能质子辐射注入通量水平大抵相当. 图 14 为伴随大磁暴太阳质子事件发生期间高能质子全球分布, 该起事件期间太阳高能质子注入到了更低的纬度, 意味着卫星受到更大范围的太阳质子辐射影响. 同时, 该起事件影响到 $+y$ 和 $-x$ 方向质子辐射在南大西洋异常区东南侧的通量强度和边界范围, 使得两个方向的质子辐射出现新的通量峰值区域, 而分布边界区间出现明显收缩.

上述 3 个扰动时段 $+y$ 方向质子通量对应地球辐射带的位置变化见图 15 所示, 在空间环境平静且无太阳质子事件期间, 南大西洋异常区 $3 \sim 5$ MeV 的高能质子对应地球辐射带 L 约为 4 范围以内, 双峰分别对应 $L < 2$ 和 L 约为 3 的区域. $10 \sim 26$ MeV 更高能

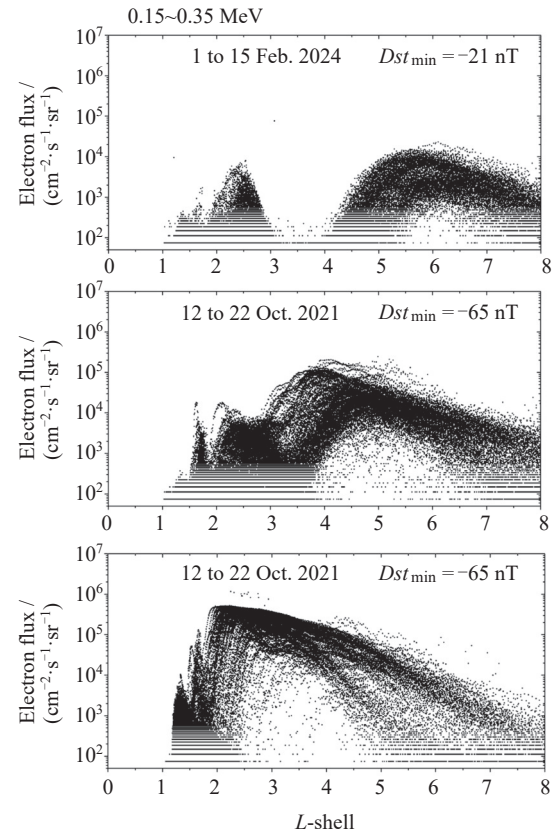


图 11 不同环境扰动时段 $0.15 \sim 0.35$ MeV 高能电子通量辐射带位置变化 (筛选纬度 $> 0^\circ$ 的数据获得)

Fig. 11 Variation of $0.15 \sim 0.35$ MeV electron flux in radiation belt during different disturbance periods (obtained data with latitude $> 0^\circ$)

量的质子分布范围缩小至 L 约为 3, 峰值在 $L < 2$ 的区域. 磁暴会影响到太阳高能质子向内注入的程度, 上述小磁暴期间太阳高能质子注入到 $L > 4$ 的辐射带区域, 极强磁暴期间太阳高能质子则注入到 $L < 3$ 更低的辐射带区域, 并显著影响到原有辐射带高能质子的分布, 导致 $L = 2 \sim 3$ 区域内捕获质子也出现了显著变化. 一方面, 在 L 约为 2 的位置形成了新的峰值捕获分布区域, 其中 $3 \sim 5$ MeV 的高能质子表现出由平静期 L 约为 3 峰值位置逐步内移的过程. 太阳高能质子可能对新捕获的形成起到了一定作用, 但注入的太阳质子强度远小于新捕获质子的峰值强度, 因此新捕获质子不仅来自太阳的直接注入, 也可能来自其他加速机制, 例如磁暴急始伴随的诱导电场对太阳质子的径向加速, 甚低频波 (ULF 波) 驱动粒子的快速径向扩散, 强的共振激发及离子回旋波 (EMIC) 局地加速等. 另一方面, 高能质子分布 L 范围向内收缩,

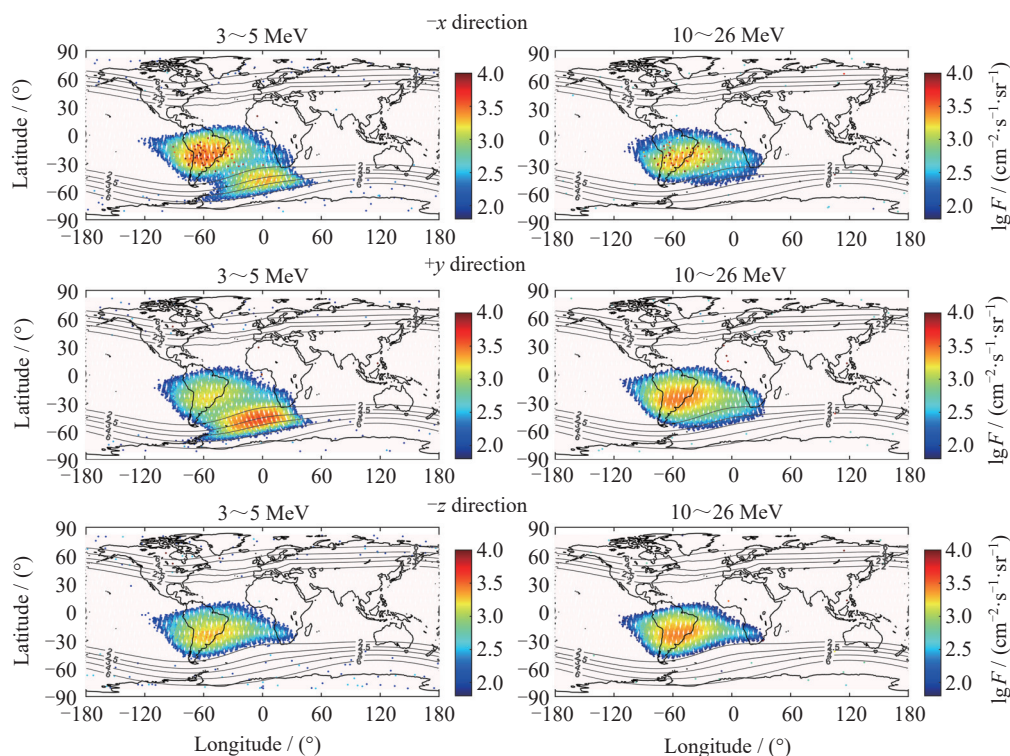
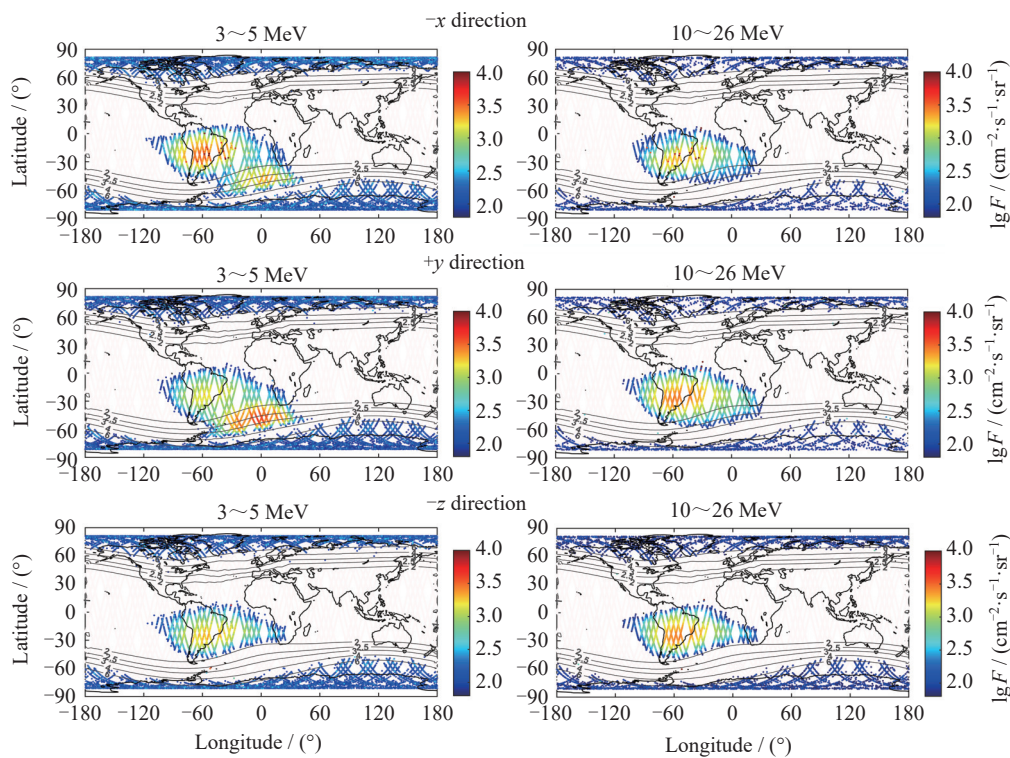


图 12 无太阳质子事件期间三个方向高能质子全球分布

Fig. 12 Global distribution of high-energy protons in three directions during none solar proton events

图 13 太阳质子事件伴随小磁暴 (Dst 指数最小为 -33 nT) 三个方向高能质子全球分布Fig. 13 Global distribution of high-energy protons in three directions accompanied by small geomagnetic storm (minimum value of Dst is -33 nT) during solar proton events

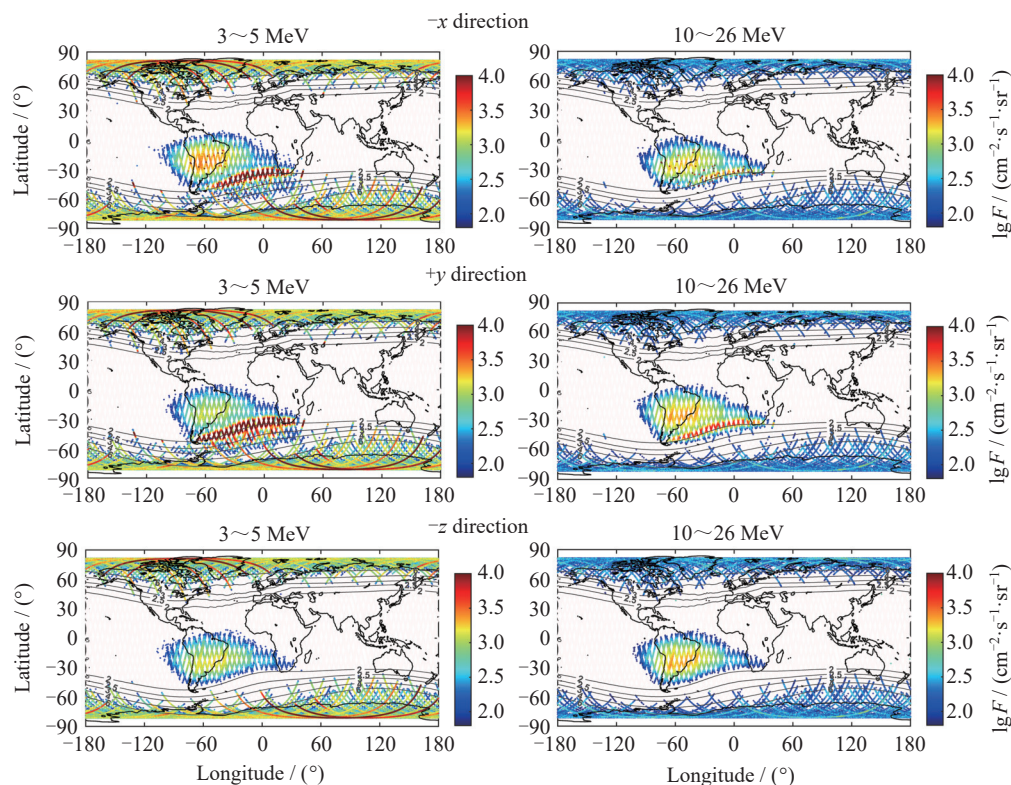


图 14 太阳质子事件伴随强磁暴 (Dst 指数最小为 -412 nT) 三个方向高能质子全球分布

Fig. 14 Global distribution of high-energy protons in three directions accompanied by strong geomagnetic storm (minimum value of Dst is -412 nT) during solar proton events

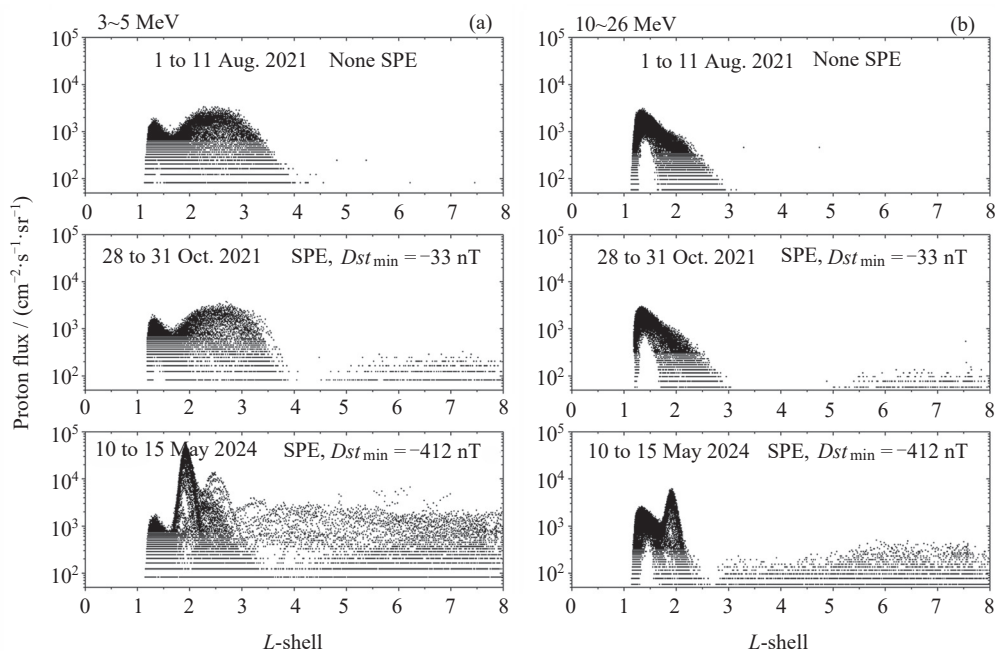


图 15 不同环境扰动时段 3~5 MeV (a) 和 10~26 MeV (b) 高能质子通量辐射带位置变化

Fig. 15 Variation of 3~5 MeV (a) and 10~26 MeV (b) proton flux in radiation belt during different disturbance periods

外边界出现了明显的损失现象, 这一现象可能是磁场曲率散射和加热大气密度增加导致的库仑碰撞频率增加造成的^[22].

2.2 高能粒子通量长期时序演化

对探测数据按日做全轨道累积给出自 2021 年 7 月探测器开机工作以来至 2024 年 5 月卫星在轨近 4 年不同方向遭遇的高能电子和高能质子辐射情况. 图 16 为高能电子日累积通量时序演化结果, 红色、黑色和蓝色曲线分别对应卫星本体的 $-x$ 、 $+y$ 、 $-z$ 方向 $0.15 \sim 0.35$ MeV, $0.35 \sim 0.65$ MeV, $1.2 \sim 2.0$ MeV, $2.0 \sim 5.7$ MeV 的电子, 以及同期地磁活动 Dst 指数. 长期电子日累积通量演化表明, 能量越低的电子更容易受到地磁扰动的影响, 动态变化越频繁, 通量强度起伏范围也越剧烈, $2.0 \sim 5.7$ MeV 更高能量的电子通量大部分时间趋于稳定. 在 2024 年 5 月强地磁暴影响下各能道电子均出现了持续长时间显著响应增强, $2.0 \sim 5.7$ MeV 的高能电子通量也出现了大幅增长, 卫星在轨以来首次遭受到极强高能电子辐射的影响.

三个方向中 $+y$ 方向电子日通量水平最高, 动态变化最剧烈, z 方向电子日辐射水平最低, 动态变化

相对平缓. 三个方向日累积通量数值关系如图 17 所示, 随时间演化, $0.15 \sim 0.35$ MeV 电子 $+y$ 方向通量强度相对于 $-x$ 方向的倍数关系在 $1.2 \sim 6$ 倍, 相对于 $-z$ 方向倍数关系在 $6 \sim 80$ 倍. $0.35 \sim 0.65$ MeV 电子 $+y$ 方向通量强度相对于 $-x$ 方向的倍数关系在 $1.2 \sim 4$ 倍, 相对于 $-z$ 方向倍数关系在 $2.5 \sim 15$ 倍. $1.2 \sim 2.0$ MeV 电子 $+y$ 方向通量强度相对于 $-x$ 方向的倍数关系在 $1.3 \sim 2.7$ 倍, 相对于 $-z$ 方向倍数关系在 $1.6 \sim 5$ 倍. $2.0 \sim 5.7$ MeV 电子 $+y$ 方向通量强度相对于 $-x$ 方向的倍数关系在 $0.8 \sim 1.6$ 倍, 相对于 $-z$ 方向倍数关系在 $1.2 \sim 2.3$ 倍. 三个方向电子通量倍数差异反映出能量越低通量强度差异越大, 而地磁活动影响显著增大了 $+y$ 方向相对于 $-z$ 方向通量强度差异的比值.

图 18 为轨道空间高能质子日累积辐射时序演化, 自上而下分别对应三个方向 $5 \sim 10$ MeV, $10 \sim 26$ MeV, $26 \sim 40$ MeV, $100 \sim 300$ MeV 的质子, 以及同期 Dst 指数. 在 $5 \sim 10$ MeV 图中标注了发生太阳质子事件的时点位置. 由图反映, 卫星在轨近 4 年期间, 太阳质子事件是改变轨道空间高能质子辐射环境

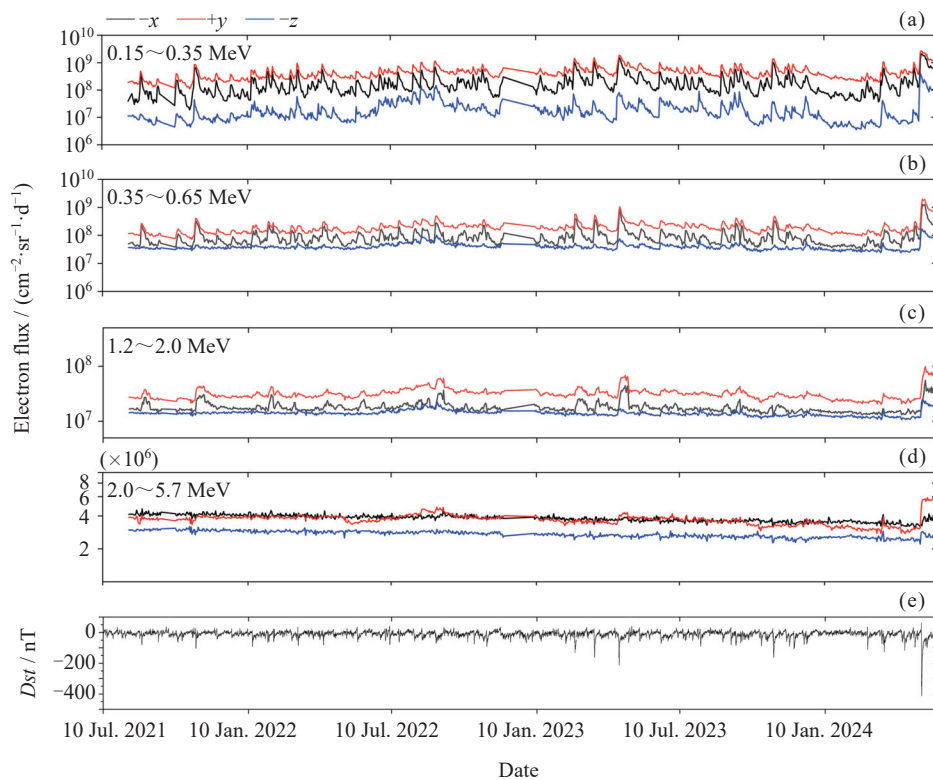


图 16 FY-3E 卫星轨道空间高能电子日累积通量时序变化

Fig. 16 Variations of daily cumulative flux of high-energy electrons in FY-3E satellite orbit

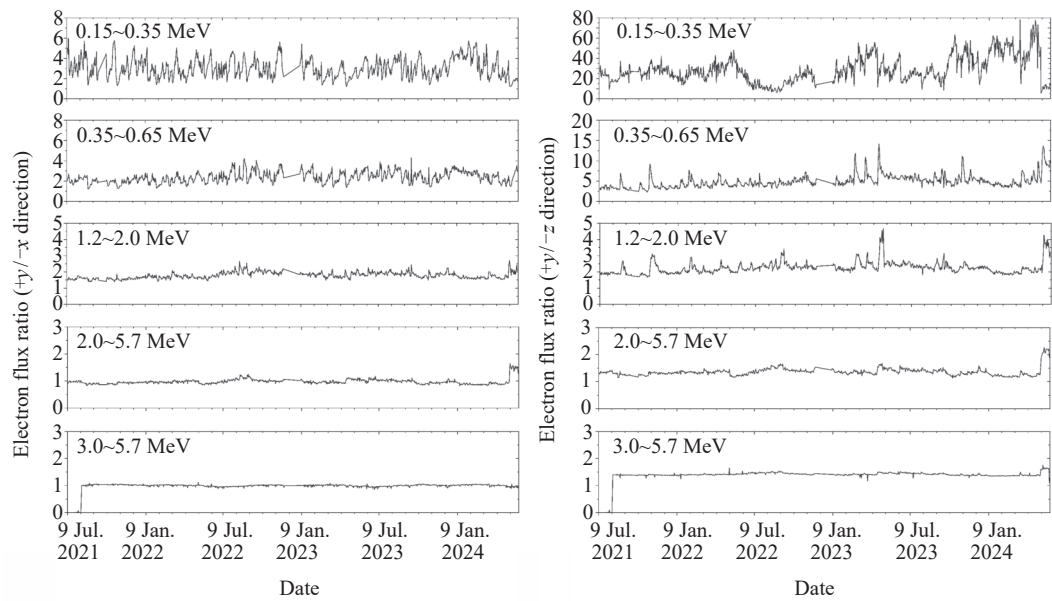


图 17 FY-3E 卫星轨道空间三个方向高能电子日累积通量比率时序变化

Fig. 17 Variations of daily cumulative flux ratio of high-energy electrons in three directions of FY-3E satellite orbit

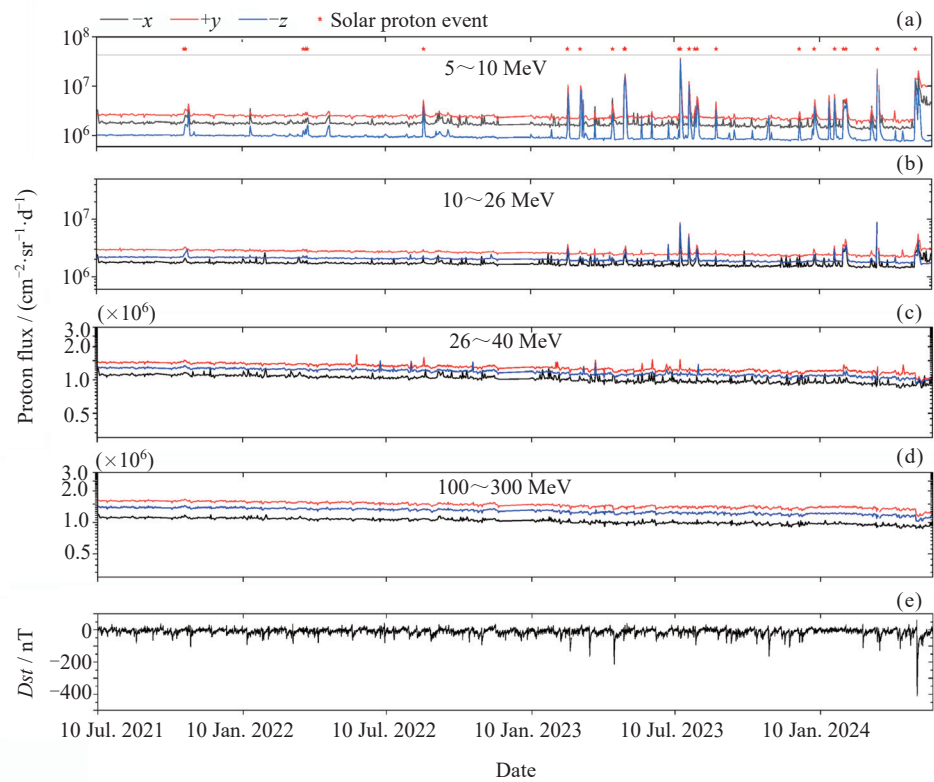


图 18 FY-3E 卫星轨道空间高能质子日累积通量时序变化

Fig. 18 Variations of daily cumulative flux of high-energy protons in FY-3E satellite orbit

的主要因素, 每起太阳质子事件发生均会导致轨道三个方向高能质子日累积通量的响应增长. 已发生的太阳质子事件主要影响到 26 MeV 以下较低能量质子

日累积通量, 使得这些能道的质子日累积通量在三个方向出现趋势一致的增长变化. 2024 年 5 月强地磁暴的发生, 显著改变了同期太阳质子事件对卫星轨道质

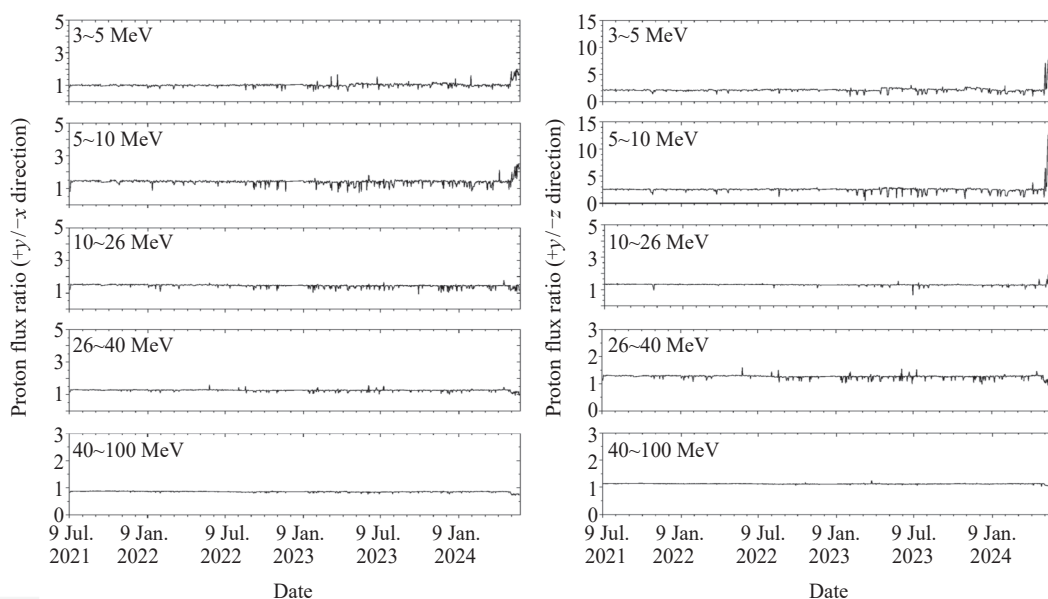


图 19 FY-3E 卫星轨道空间三个方向高能质子日累积通量比率时序变化

Fig. 19 Variations of daily cumulative flux ratio of high-energy protons in three directions of FY-3E satellite orbit

子辐射环境的一般影响,在此期间,在 $+y$ 方向、 $-x$ 方向 $5\sim 10$ MeV 质子日累积通量响应增长后,持续保持在高通量水平,而 $26\sim 40$ MeV 和 $100\sim 300$ MeV 质子日累积通量则出现持续小幅减小. 4 年大部分时间段三个方向通量强度相对比值关系基本保持稳定,2024 年 5 月强扰动使得三个方向高能质子日累积通量比值出现了显著差异,如图 19 所示, $+y$ 方向 $3\sim 5$ MeV, $5\sim 10$ MeV, $10\sim 26$ MeV 通量强度相对于 $-x$ 方向、 $-z$ 方向的比值增大, $+y$ 方向通量强度最大, $-z$ 方向通量强度最小,两个方向比值超过了 1 个量级. $+y$ 方向 $26\sim 40$ MeV 和 $40\sim 100$ MeV 质子通量强度相对于 $-x$ 方向、 $-z$ 方向的比值出现小幅减小.

由上结果反映,在卫星本体 $+y$, $-x$, $-z$ 三个监测方向中, $+y$ 方向高能电子辐射强度最大, $-z$ 方向高能电子辐射强度最小. 相较于电子,三个方向高能质子通量强度差异相对较小. 高能电子动态变化主要受到地磁扰动的影响,地磁活动会对 $+y$ 方向的电子辐射产生显著响应,加大了电子辐射相对于 $-x$ 和 $-z$ 方向的比值,尤其是相对 $-z$ 方向的比值. 高能质子动态变化则主要受到太阳质子事件的影响,太阳质子事件对三个方向的质子辐射均产生影响,使得三个方向质子通量增强,但不会明显影响到三个方向日辐射通量比值. 三个方向所表现出的显著通量差异与入射粒子的投掷角(即粒子运动方向与地磁场方向的夹角)分布有关,由图 20 三个方向沿轨运行投掷角分布所示,

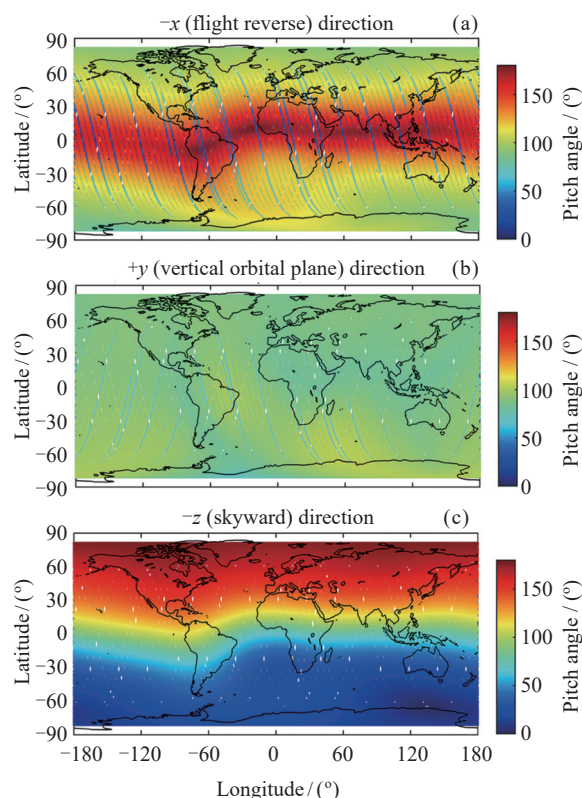


图 20 FY-3E 卫星三个方向粒子投掷角分布

Fig. 20 Distribution of particle pitch angles in three directions of FY-3E satellite

$+y$ 方向接收到的带电粒子辐射投掷角集中在 $70^\circ\sim 100^\circ$. 在粒子集中分布的南大西洋异常区, $-x$ 和

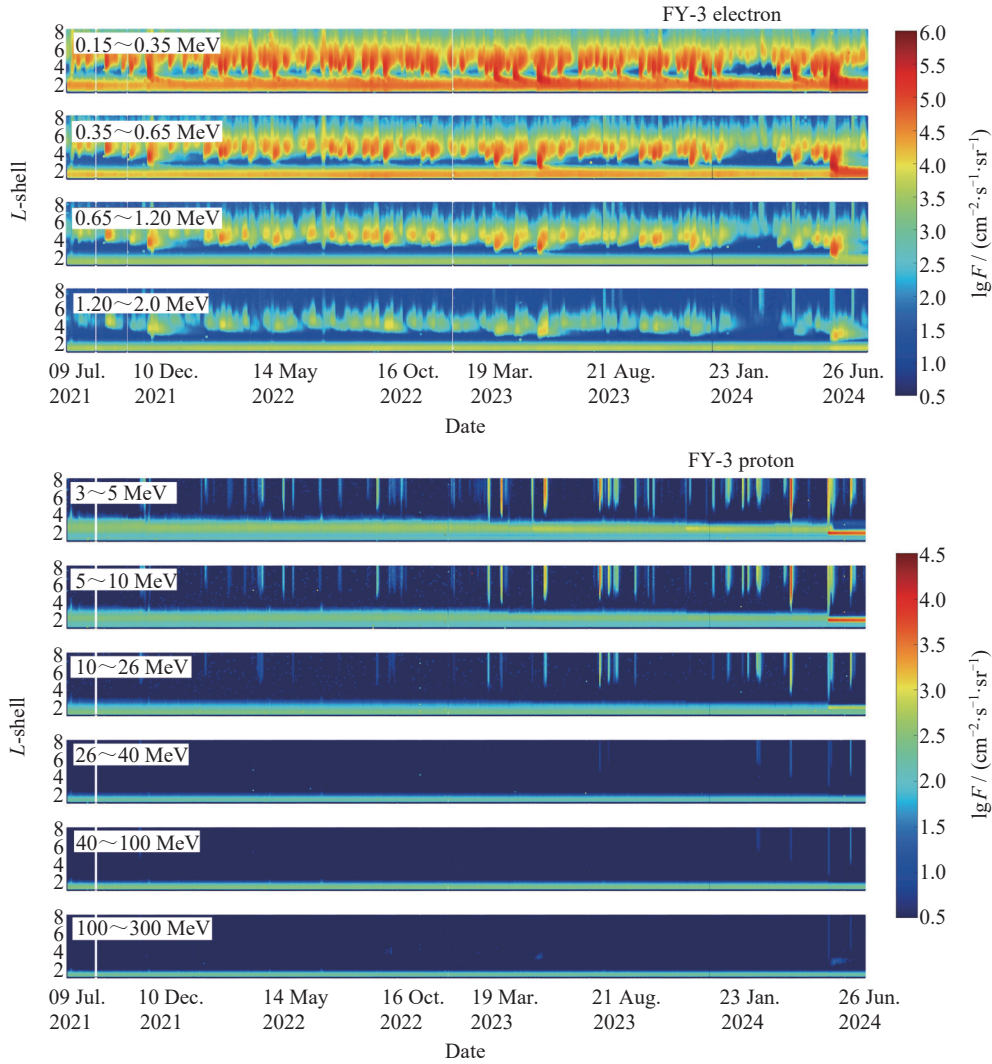


图 21 辐射带高能电子、高能质子通量强度时序变化

Fig. 21 Evolution of high energy electron and proton flux in radiation belt

$-z$ 方向粒子投掷角变化范围较大, 在穿越南大西洋异常区大部分区域 $-x$ 方向投掷角在 $90^\circ \sim 120^\circ$, $-z$ 方向投掷角则在 $0^\circ \sim 50^\circ$. 在南北高纬 $-x$ 投掷角范围在 $70^\circ \sim 100^\circ$, $-z$ 方向投掷角范围接近 0° 和 180° 附近. 依据带电粒子通量随投掷角分布的一般特点, 带电粒子最大通量通常出现在 $70^\circ \sim 100^\circ$, 而在投掷角接近 0° 和 180° 附近通量降低^[23], 因此三个方向中 $+y$ 方向粒子辐射最强. 地磁扰动期间, 小投掷角的带电粒子更容易沿着磁力线沉降, 导致辐射带中这些粒子的通量减少, 而大投掷角的粒子则更容易在磁力线间传播, 导致投掷角分布的各向异性增加^[24], 从而导致三个方向遭遇的粒子辐射差异增大. 这种差异性的认识对于卫星制定有效的辐射防护措施至关重要.

3 结论

FY-3E 观测结果反映, 轨道空间高能带电粒子空间分布集中出现在南大西洋异常区和南北高纬, 南大西洋异常区分布相对稳定, 而南北高纬呈现高动态变化. 能量越低的带电粒子空间分布范围变化越大, 分布结构变化越复杂. 地磁扰动会对轨道高能电子环境产生显著影响, 通常情况下扰动主要影响到南北高纬的电子分布, 改变南北高纬电子条带分布结构, 导致南北纬电子通量强度的显著增强. 2024 年 5 月极强地磁暴不仅极大地影响到南北纬条带结构, 导致南北纬电子通量极大的增强, 甚至影响到南大西洋异常区, 使得异常区局部区域出现显著增强.

近4年带电粒子长期日累积通量时序结果表明,轨道高能电子辐射环境动态变化显著,高能质子辐射环境则相对稳定.卫星 $+y$, $-x$, $-z$ 三个方向中, $+y$ 方向遭遇的高能电子、高能质子辐射强度最大, $-z$ 方向相对最弱.对于高能电子来说,电子能量越低,三个方向辐射强度差异越大, $0.15\sim 0.35$ MeV电子通量 $+y$ 方向相对于 $-z$ 方向差异会超过1个量级.对于高能质子而言, $+y$ 方向相对 $-z$ 方向的通量差异不超过3倍, 10 MeV以上三个方向的高能质子辐射水平相接近.2024年5月极强磁暴加大了三个方向辐射差异, $0.15\sim 0.35$ MeV高能电子 $+y$ 方向相对 $-z$ 方向辐射最大差异达约80倍, 10 MeV以下的高能质子辐射也出现了超过了一个量级的差异.

FY-3E卫星探测仪器已获取到2021年7月在轨以来至今的高能质子、高能电子通量数据,这些探测数据能够灵敏反映卫星轨道空间带电粒子辐射通量强度、分布位置、分布方向等特性,可以为轨道环境评估、航天器辐射防护设计和星上设备安全布局提供关键的环境数据支持.对于FY-3E卫星而言,卫星运行过程会穿越地球辐射带不同区域,由此可以用来开展辐射带动态变化研究,图21分别为2021年7月至2024年5月高能电子、高能质子通量在辐射带不同位置的时序演化结果,该结果表现出与其他同类卫星观测结果相似的辐射带位置时序演化^[15].值得关注到的是,2024年5月强地磁暴对地球辐射带高能带电粒子通量强度和分布结构产生的显著影响,为开展极端事件分析研究提供了新的案例.

致谢 感谢中国气象局提供的FY-3E卫星高能质子和高能电子通量数据.

参考文献

- BAKER D N, ERICKSON P J, FENNELL J F, *et al.* Space weather effects in the earth's radiation belts[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 17
- DMITRIEV A V. On the radiation belt location during the 23rd and 24th solar cycles[J]. *Annales Geophysicae*, 2019, **37**(4): 719-732
- HEYNDERICKX D. Radiation belt modelling in the framework of space weather effects and forecasting[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(16): 1687-1700
- ZHANG P, HU X Q, LU Q F, *et al.* FY-3E: the first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, **39**(1): 1-8
- SHEN G H, ZHANG X X, WANG J H, *et al.* Development and calibration of a three-directional high-energy particle detector for FY-3E satellite[J]. *Aerospace*, 2023, **10**(2): 173
- HOU D H, ZHANG X X, WANG J H, *et al.* Calibration of the FY-3E particle sensors: high-energy particle detector (HEPD)[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, **18**(7): P07050
- VLASOVA N A, KALEGAEV V V, NAZARKOV I S. Dynamics of relativistic electron fluxes of the outer radiation belt during geomagnetic disturbances of different intensity[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021, **61**(3): 331-340
- PIERRARD V, BOTEK E, RIPOLL J F, *et al.* Electron dropout events and flux enhancements associated with geomagnetic storms observed by PROBA-V/Energetic Particle Telescope from 2013 to 2019[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(12): e2020JA028487
- CHEN H W T, KALEGAEV V V, PANASYUK M I, *et al.* Long-term dropout of relativistic electrons in the outer radiation belt during two sequential geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(10): e2020JA028098
- ZHENG Y H, LUI A T Y, LI X L, *et al.* Characteristics of 2-6 MeV electrons in the slot region and inner radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A10): A10204
- WANG Chunqin, ZHANG Xianguo, SHEN Guohong, *et al.* Dynamic results of electron flux in radiation belt from 2011 to 2015 based on FY-3B satellite observation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(6): 1831-1841 (王春琴, 张贤国, 沈国红, 等. 2011-2015年辐射带电子动态 FY-3B 卫星实测结果 [J]. *地球物理学报*, 2021, **64**(6): 1831-1841)
- WANG C Q, CHANG Z, ZHANG X X, *et al.* Proton belt variations traced back to Fengyun-1C satellite observations[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(6): 611-618
- LOOPER M D, BLAKE J B, MEWALDT R A. Response of the inner radiation belt to the violent Sun-Earth connection events of October-November 2003[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(3): L03S06
- LORENTZEN K R, MAZUR J E, LOOPER M D, *et al.* Multisatellite observations of MeV ion injections during storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A9): 1231
- YUAN C J, ZONG Q G. Dynamic variations of the outer radiation belt during magnetic storms for 1.5-6.0 MeV electrons[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**(2): 431-440
- GOYAL R, ZHAO H, CALIF S, *et al.* Role of subauroral polarization streams in deep injections of energetic elec-

- trons into the inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(11): e2024GL108863
- [17] SUMMERS D, THORNE R M, XIAO F L. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A9): 20487-20500
- [18] HORNE R B, THORNE R M. PotentiAl waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(15): 3011-3014
- [19] NI B B, HUA M, GU X D, *et al.* Artificial modification of Earth's radiation belts by ground-based Very-Low-Frequency (VLF) transmitters[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(3): 391-413
- [20] SAUVAUD J A, WALT M, DELCOURT D, *et al.* Inner radiation belt particle acceleration and energy structuring by drift resonance with ULF waves during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(4): 1723-1736
- [21] LI X L, BARKER A B, BAKER D N, *et al.* Modeling the deep penetration of outer belt electrons during the “Halloween” magnetic storm in 2003[J]. *Space Weather*, 2009, **7**(2): S02004
- [22] SELESNICK R S, HUDSON M K, KRESS B T. Injection and loss of inner radiation belt protons during solar proton evenTs and magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08211
- [23] LI W, HUDSON M K. Earth's Van Allen radiation belts: from discovery to the Van Allen Probes era[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(11): 8319-8351
- [24] SMIRNOV A, SHPRITS Y, ALLISON H, *et al.* Storm-time evolution of the equatorial electron pitch angle distributions in earth's outer radiation belt[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **9**: 836811

作者简介



王春琴 女, 1978 年生, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要从事星载空间带电粒子及辐射效应探测数据分析研究工作.

E-mail: wcq@nssc.ac.cn