



南大西洋异常区质子通量演化研究 ——基于CSES卫星6年观测

王璐^{1,2,3}, 张振霞^{3*}, 李新乔¹, 安正华¹, 徐岩冰¹, 王平¹, 卢红¹, 赵小芸¹, 张大力¹,
梁晓华¹, 丁志强^{1,2}, 李姝洁³, 泽仁志玛³, 周娜³

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

* 通讯作者, E-mail: zxzhang2018@163.com

收稿日期: 2025-05-15; 收修改稿日期: 2025-07-28; 接受日期: 2025-08-20; 网络版发表日期: 2025-10-22

国家自然科学基金项目(42474222、12173038、41904149)和国家重点研发计划项目(2023YFE0117300)资助

摘要 南大西洋异常区(SAA)的中心位置呈现出向西及向北漂移的趋势, 且漂移方向、速度与太阳活动之间存在复杂的关联. 本文基于太阳同步轨道卫星CSES 2019~2024年的观测数据, 研究第25太阳活动周上升期SAA区地磁场及高能质子的时空演化特征. 结果表明, 低能质子(2.0~10.0 MeV)在空间分布上呈现出典型的双峰结构, 而高能质子(10.0~20.0 MeV)则表现为单峰分布, 这一现象与NOAA/MEPED卫星的观测结果一致. 通过双高斯模型拟合发现, SAA质子分布中心存在显著的经向(向西)和纬向(向北)漂移. 北向漂移的平均速度在昼侧为 $(0.29 \pm 0.12)^\circ/\text{年}$; 西向漂移的平均速度在昼侧为 $(0.36 \pm 0.08)^\circ/\text{年}$, 夜侧为 $(0.33 \pm 0.10)^\circ/\text{年}$; 低能质子的漂移速度稍快于高能质子. 基于IGRF-13模型计算, SAA磁场中心在2015~2025年向北的漂移速度为 $(0.014 \pm 0.002)^\circ/\text{年}$, 向西的漂移速度为 $(0.282 \pm 0.030)^\circ/\text{年}$. CSES所观测到的SAA质子中心漂移方向, 与IGRF-13模型磁场中心漂移方向一致. 通过对SAA质子通量的边界识别和定量分析发现, SAA质子通量面积在2019~2024年缩小了 $(6.09 \pm 1.03)\%$, 其面积变化与F10.7太阳射电流量呈显著负相关. 这些发现有助于深入理解SAA质子通量的动态演化过程, 及其与太阳活动的相关性.

关键词 南大西洋异常区, 张衡一号卫星, 质子通量, 地磁场, 太阳活动

1 引言

南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly, SAA)是位于南美洲东南部的一片地磁场强度相对较弱的区域, 其成因在于地磁偶极轴与地球自转轴的不重合

(Kurnosova等, 1962; Heynderickx, 1996). 地磁偶极体的倾斜和偏移, 导致内辐射带中的带电粒子在该区域的磁镜点高度更低, 从而引起局部粒子通量的增强(Kurnosova等, 1962). 因此, SAA是辐射带中粒子通量最强的区域, 对卫星和航天员构成了显著的辐射风险

中文引用格式: 王璐, 张振霞, 李新乔, 安正华, 徐岩冰, 王平, 卢红, 赵小芸, 张大力, 梁晓华, 丁志强, 李姝洁, 泽仁志玛, 周娜. 2025. 南大西洋异常区质子通量演化研究——基于CSES卫星6年观测. 中国科学: 地球科学, 55(11): 3918–3931, doi: [10.1360/N072025-0208](https://doi.org/10.1360/N072025-0208)

英文引用格式: Wang L, Zhang Z, Li X, An Z, Xu Y, Wang P, Lu H, Zhao X, Zhang D, Liang X, Ding Z, Li S, Zhima Z, Zhou N. 2025. Investigation of the South Atlantic Anomaly (SAA) by proton flux variabilities based on 6 years' CSES data. Science China Earth Sciences, 68(11): 3776–3788, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1672-2>

(Heynderickx, 1996), SAA区粒子通量的时空演化特征也受到广泛关注.

目前, 关于SAA的位置及其演化特征的研究有多种方法, 包括地磁场模型、辐射剂量测量和高能粒子通量观测等. 其中, 国际地磁参考场模型(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)是研究SAA地磁结构及其长期变化的重要工具. IGRF模型每五年更新一次, 利用全球地面观测站和卫星数据计算出球谐系数, 并在建模过程中排除了外磁场的干扰(Thébault等, 2015). 该模型在解析SAA的空间位置和强度随时间变化方面发挥了关键作用. 根据IGRF模型分析, SAA地磁主场自1900年以来以约 $0.2^\circ/\text{年}$ 的速度向西漂移(周楚悦等, 2025).

地磁场是驱动SAA区域质子沉降的根本因素, 其长期变化对SAA中粒子的动力学具有显著调制作用. 同时, 已有观测表明SAA质子通量与太阳活动之间存在显著相关性(Huston等, 1996). TIROS-N/NOAA系列卫星的观测发现, SAA内的质子通量变化通常与太阳活动呈负相关关系(Miyoshi等, 2000; Qin等, 2014). 这是由于在太阳活动极大期, 增强的太阳极紫外(EUV)辐射会加热地球高层大气, 导致中性和电离层粒子密度升高, 从而增强电离和散射等大气损失过程, 进而使低轨道与低 L 值区域的质子通量降低. 此外, 宇宙射线反照中子衰变(Cosmic Ray Albedo Neutron Decay, CRAND)机制也是SAA区域质子形成和变化的重要来源(Albert等, 1998).

SAA的漂移速度也可通过质子通量峰值位置的演变进行估算. 过去的统计研究表明, SAA的向西漂移速率通常介于 $0.18^\circ\sim 0.66^\circ/\text{年}$ (Konradi等, 1994; Heynderickx, 1996). Pu等(2005)和谢伦等(2005)利用漂移壳追踪方法的研究指出, 1970~2000年间SAA总计向西漂移了 5.2° . POES与SAMPEX卫星的观测进一步揭示, SAA的漂移速度受11年太阳活动周期调制, 在太阳活动极小期漂移速度更快, 在极大期则减缓(Qin等, 2014; Jones等, 2017). 除西向漂移外, SAA也存在向北漂移的趋势, 1973~1995年间纬度方向的平均漂移速率为 $0.08^\circ/\text{年}$ (Badhwar, 1997). 也有研究表明, SAA的纬向漂移也与太阳活动周期变化相关, 在太阳活动上升期呈北移趋势, 而在下降期则可能向南(Casadio和Ariño, 2011; Qin等, 2014; Ginisty等, 2024). 这些基于多颗卫星观测的研究结果, 为理解SAA的动力学演化机制

及其未来变化趋势提供了重要参考.

SAA内的质子持续对低轨道航天器及宇航员构成风险, 因此, 深入理解其长期演化规律不仅对航天器防护具有现实意义, 也可以推动辐射带动力学研究. 中国电磁监测试验卫星(China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES), 自2018年发射以来已连续运行6年, 覆盖了第25太阳活动周从极小期至极大期. 其搭载的多种载荷可提供高精度的高能粒子与地磁场观测数据, 为系统研究SAA的演化过程提供了数据支撑. 本研究结合IGRF-13模型, 对SAA区域地磁场与质子通量的耦合变化关系展开分析, 并采用双高斯分布模型对质子通量在经纬度方向上的分布进行拟合, 计算2019年1月至2024年4月间SAA质子中心在空间上的漂移速度, 并进一步分析其对太阳活动变化的响应机制. 此外, 通过提取SAA区边界, 本文还对其区域面积的时间演化特征进行了量化分析.

2 数据

CSES卫星于2018年2月发射, 运行在高度约507km、轨道倾角为 97° 的太阳同步轨道上, 重访周期为5天. 卫星在约14:00 MLT经过下降交点, 从北向南飞行; 在约02:00 MLT穿越上升交点, 从南向北飞行, 分别对应昼侧和夜侧轨道(Shen等, 2018). CSES搭载了多种科学载荷, 其中高能粒子探测装置(High-Energy Particle Package, HEPP)包括高能粒子探头(HEPP-H)、低能粒子探头(HEPP-L)以及太阳X射线监测仪(HEPP-X). HEPP-L安装在卫星面向地球的YOZ面上, 其视场方向相对于日地连线约为 20° . HEPP-L用于测量能量范围为 $0.1\sim 3.0\text{MeV}$ 的电子通量和 $2.0\sim 20.0\text{MeV}$ 的质子通量, 能谱被划分为256个能道. 仪器的视场范围为 $100^\circ\times 30^\circ$, 由9个硅探测器单元组成, 其中5个为半张角 6.5° 的窄角探头, 4个为半张角 15° 的宽角探头(Li等, 2019). 此外, CSES搭载的高精度磁强计(High Precision Magnetometer, HPM)可实现最高60Hz采样率的地磁场监测(Cheng等, 2018).

NOAA-19卫星同样运行于太阳同步轨道, 轨道高度为804km, 轨道倾角为 98.6° . 其搭载的MEPED(Medium Energy Proton and Electron Detector)载荷配置有两台相互垂直的望远镜, 分别指向 0° 和 90° 方向, 用于测量高能质子和电子(Rodger等, 2010).

3 SAA区地磁场和质子通量演化分析

3.1 基于CSES卫星HPM载荷和IGRF-13模型的地磁场演化分析

图1a和1b展示了CSES卫星搭载的HPM在2019年1月与2024年1月——两个地磁平静时期($Dst > -30\text{nT}$)观测到的全球标量地磁场强度分布. 对数据进行 1° 分辨率的网格平均, 并进行平滑处理, 以消除轨道效应的干扰. 图1c为2024年与2019年磁场强度的差值图, 结果揭示了显著的南北半球差异: 从2019年至2024年, 地磁场在东半球整体增强, 而在西半球则普遍减弱, 尤其是在对应SAA的位置, 表现出明显的地磁场减弱趋势.

图1d和1e展示了IGRF-13模型的计算结果, 时间同样为2019年1月和2024年1月, 高度在507km的全球地磁场强度分布. 图1f为两年磁场强度的差值图. IGRF-13模型描述地球主磁场及其长期变化趋势, 模型在构建过程中排除了外源磁场和地壳磁异常的干扰, 并采用球谐函数展开的方式进行截断, 避免依赖于任何特定仪器的观测结果. IGRF-13模型的全球磁场强度值与CSES观测结果总体一致, 变化趋势也表现出高度的一致性.

3.2 SAA区质子通量演化分析

我们比较了HEPP-L在两个地磁平静时期($Dst > -30\text{nT}$)——2019年1月与2024年1月期间所观测到的不同能段质子通量分布. 尽管2024年1月期间发生了一次小型太阳质子事件(Solar Proton Event, SPE), 但其仅对外辐射带产生了轻微影响. 结果显示, 低能质子(2~10MeV)呈现出典型的双峰结构(见图2a和2b), 峰值分别位于经度约 50°W 和 0° 处; 而高能质子(10~20MeV)则表现为单峰分布(见图2d和2e). 为了对比CSES观测结果, 我们分析了NOAA/MEPED对SAA区域质子分布的观测情况. 比较其P5-90探头(能量范围为2.5~6.9MeV的90°探头)数据后发现, 该数据同样呈现出双峰分布结构(图2g和2h). 此外, 还计算了2019~2024年间质子通量的差异, 如图2c、2f和2i所示. 来自HEPP-L与NOAA的观测共同表明, SAA整体质子通量有所下降, 但其核心区域(50°W 附近)却出现了轻微上升.

图3中展示了IGRF-13模型计算的地磁场强度变

化与CSES和NOAA所观测的质子通量变化之间的对比. 图3a为IGRF-13计算的2024年1月全球地磁强度, 红色标记点表示磁场强度最低的位置(约在 60.0°W , 22.3°S). 图3b与3c中的黑色虚线代表基于IGRF-13计算的 L 值分布. 可以看出, 质子通量增强区域主要集中在 $L=1.2\sim 1.5$ 范围内.

研究表明, SAA区域内质子通量的变化与太阳活动存在明显的反相关关系(Huston等, 1998; Miyoshi等, 2000; Li等, 2020). 在2019~2024年, 即第25太阳活动周期的上升阶段, 整体质子通量呈下降趋势, 但在地磁场强度最低的局部区域出现了通量增高. 这一现象表明, SAA内部不同区域质子通量的变化可能受两种机制共同驱动: 一方面, 增强的太阳活动显著抑制了内辐射带外部区域($L > 1.5$)的质子通量, 但其对更深层 L 壳的影响较小; 另一方面, SAA区核心地磁场强度的逐步减弱使得质子在更深 L 壳($L=1.2\sim 1.5$)加速沉降. 两者共同作用, 导致SAA区域中不同位置的质子通量呈现出一降一升的空间差异性.

4 SAA质子中心的经纬度漂移

已有研究表明, SAA区域的粒子通量分布通常采用高斯模型、双高斯模型、Weibull分布以及多项式拟合等方法进行描述. 其中, 高斯模型及其变体适用于对称或双峰分布, 而Weibull分布则适用于非对称分布(Pu等, 2005; 谢伦等, 2005). 经过综合比较, 双高斯模型在形态一致性方面表现最佳, 能够准确描述实际观测到的SAA不对称几何结构. 因此, 我们选择采用双高斯分布对SAA的经度和纬度剖面进行拟合.

4.1 双高斯模型拟合

(1) 研究区定义. 分析区域被定义为纬度范围 $50^\circ\text{S}\sim 0^\circ$ (分辨率为 0.1°), 经度范围 $100^\circ\text{W}\sim 20^\circ\text{E}$ (分辨率为 3° , 以尽量减小轨道效应的影响). 由于2024年5月发生了一次强烈的地磁暴事件($Dst < -400\text{nT}$)以及伴随的太阳质子事件, SAA区域受到显著扰动, 并在 $L=2$ 附近形成了新的质子带(Zhang等, 2025). 因此, 本文仅采用2019年1月至2024年4月之间的数据, 用于分析SAA质子的规律性演化. 数据处理中, 数据分昼侧轨道与夜侧轨道处理, 并分为三个能段(8~12、12~16和16~20MeV), 时间分辨率为1个月.

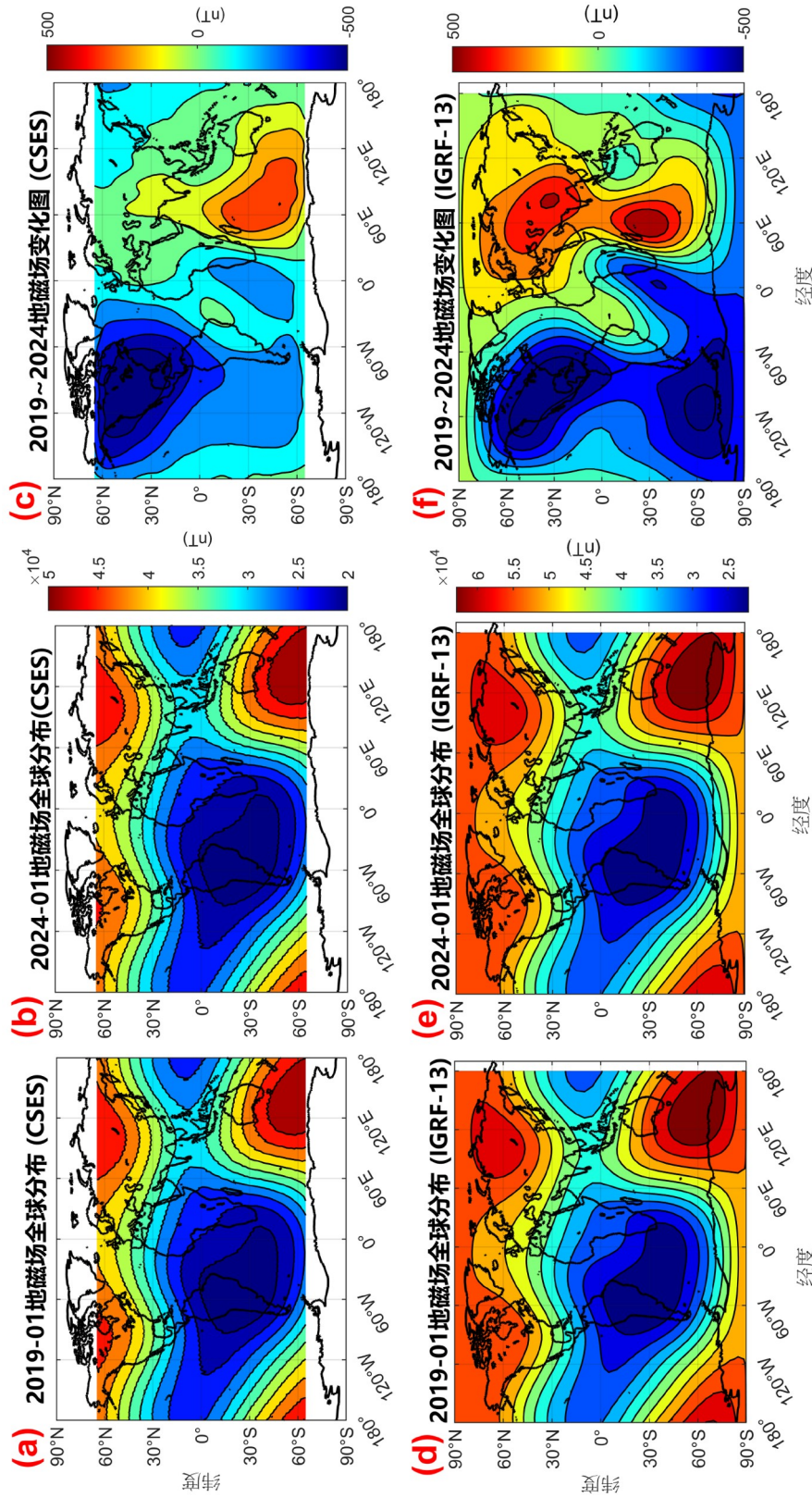


图 1 地磁场强度分布(a, b, d, e)及磁场强度差异图(c, f)

(a, b) CSES/HPM观测的2019年1月与2024年1月地磁场强度分布; (c) CSES观测的2024和2019年磁场强度差异图; (d, e) 基于IGRF-13模型计算的2019年1月与2024年1月地磁场强度分布(高度为507km, 与CSES轨道高度一致); (f) 基于IGRF-13模型的2024和2019年磁场强度差异图

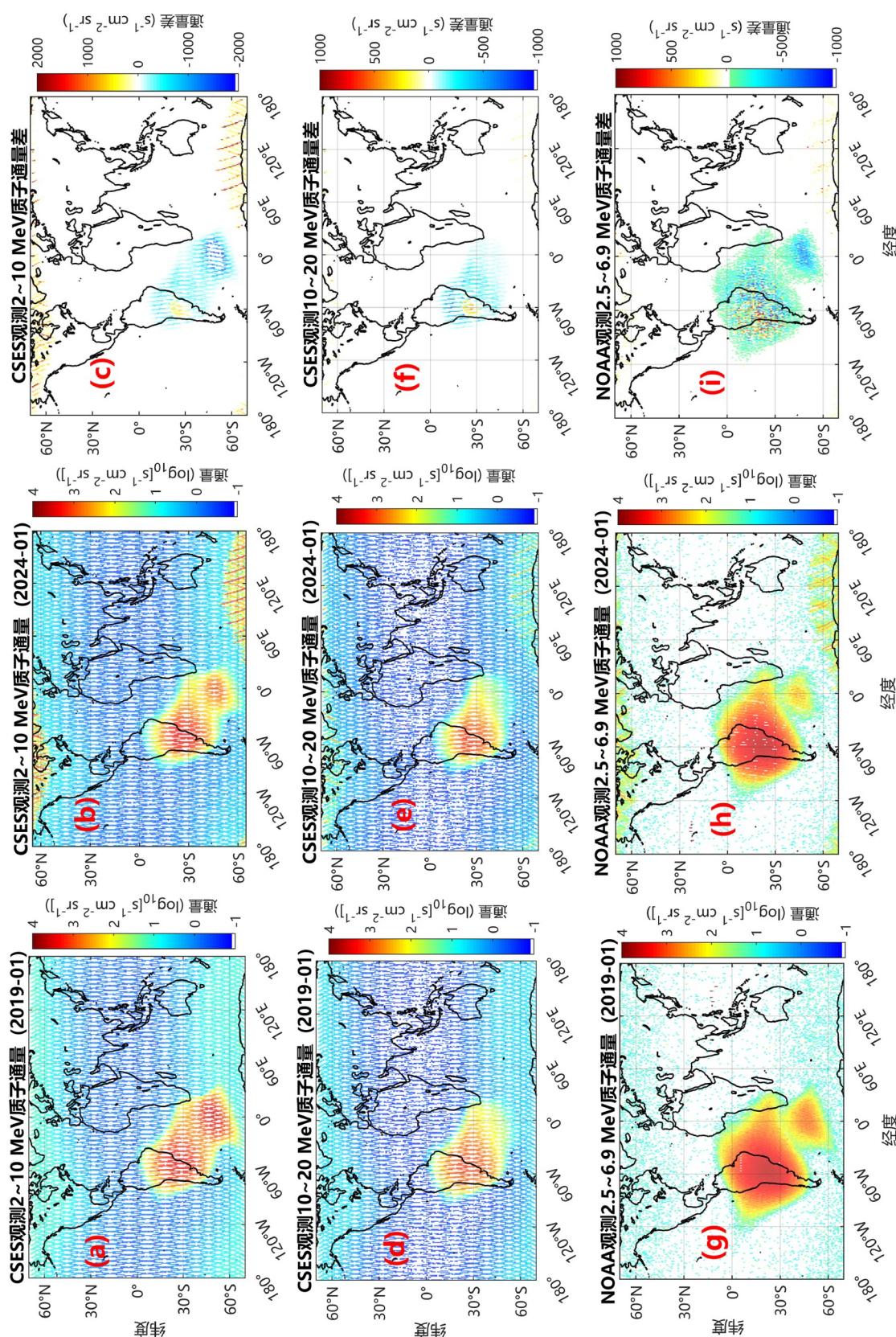


图 2 质子通量全球分布图

(a) CSES观测的2019年1月2~10MeV质子通量; (b) CSES观测的2024年1月2~10MeV质子通量; (c) CSES观测的2024年与2019年2~10MeV质子通量差; (d) CSES观测的2019年1月10~20MeV质子通量; (e) CSES观测的2024年1月10~20MeV质子通量; (f) CSES观测的2024年与2019年10~20MeV质子通量差; (g) NOAA/MEPED在2019年1月观测的2.5~6.9MeV质子通量; (h) NOAA/MEPED在2024年1月观测的2.5~6.9MeV质子通量; (i) NOAA/MEPED观测的2024年与2019年2.5~6.9MeV质子通量差

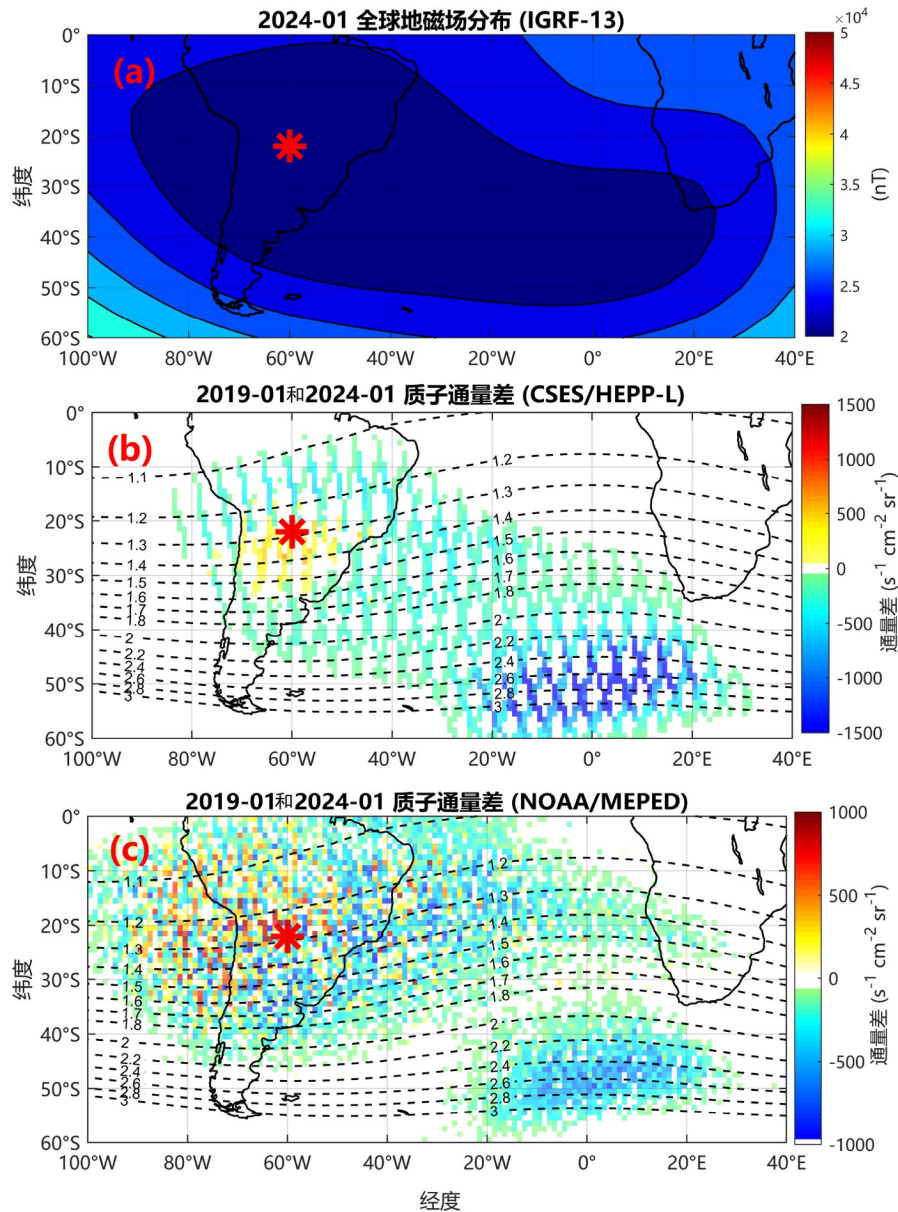


图3 SAA区磁场图及SAA区质子通量差对比图

(a) IGRF-13模型计算的SAA区域2024年1月地磁场强度; (b) CSES/HEPP-L观测的2~10MeV质子通量差异(2024和2019年); (c) NOAA/MEPED P5-90通道(2.5~6.9MeV)观测的质子通量差异(2024和2019年)

(2) 双高斯模型. 质子通量分布采用双高斯函数描述:

$$f(x) = A_1 \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right). \quad (1)$$

拟合时先采用单一高斯函数对参数(A_1 , μ_1 , σ_1)进行估计, 随后引入第二个高斯项, 并使用非线性最小二

乘法对全部参数进行联合优化.

(3) 拟合质量评估. 数据的拟合质量通过 R^2 进行定量评估:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

其中, y_i 为观测值, $f(x_i)$ 为模型预测值, $\bar{y}$ 表示观测值的

均值。

图4展示了部分SAA中心坐标的双高斯拟合结果, 其中图4a~4f是纬度分布拟合, 图4g~4l是经度分布拟合。图4a和4g使用了相同时间、能段及本地时间(昼/夜侧)数据的数据。每张子图中还标注了最大通量值的

经纬度和数, 例如图1a中的Max(24.83°S, 286.67)表示最大值出现在纬度24.83°S处, 最大通量为286.67 $\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ 。64个月所有数据拟合的平均 R^2 值分别为 0.9942 ± 0.0010 (纬度)和 0.9840 ± 0.0024 (经度), 表明所采用的拟合方法具有较高的精度和可信度。

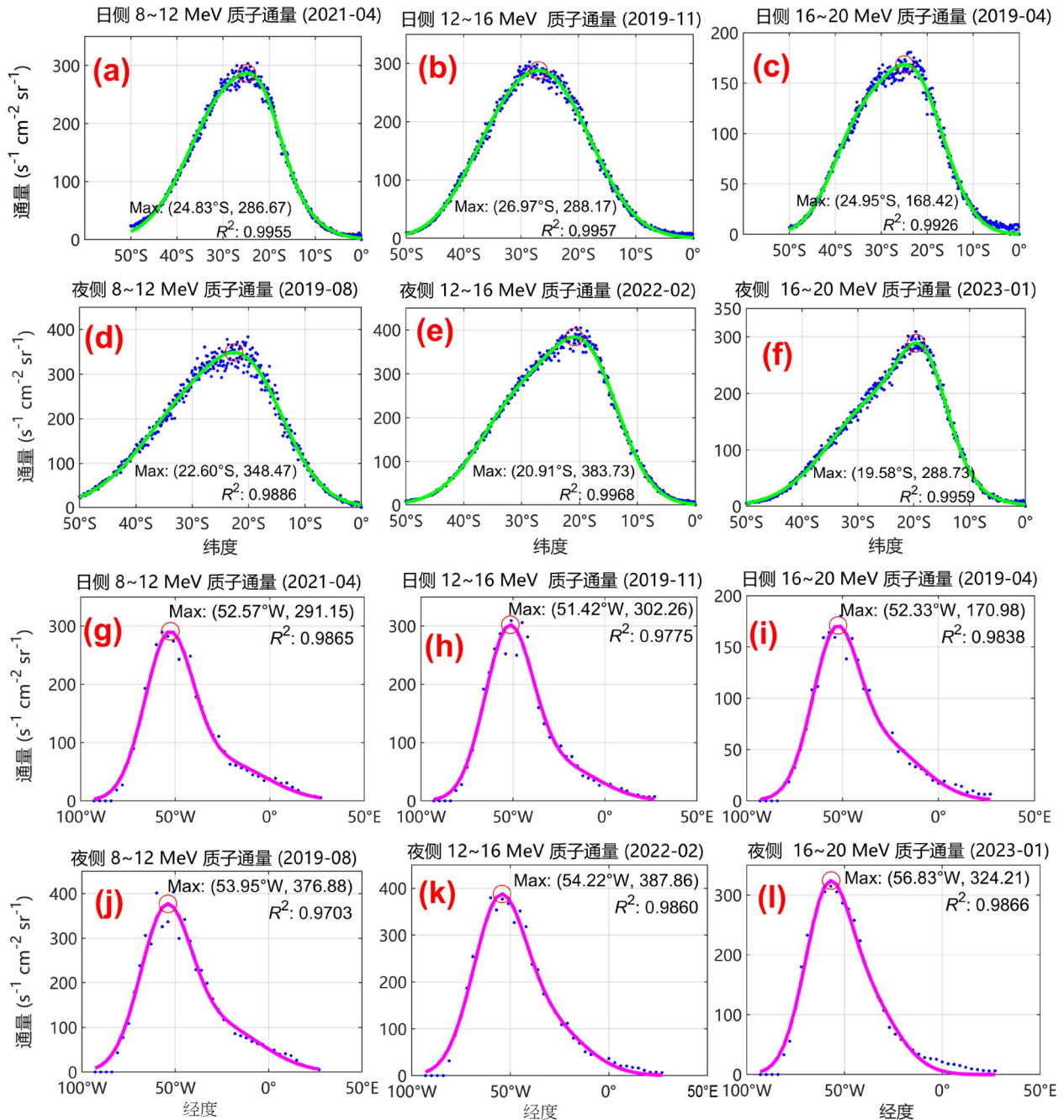


图4 SAA中心坐标的双高斯拟合结果

(a~f) 纬度分布拟合(分辨率为 0.1°); (g~l) 经度分布拟合(分辨率为 3°)

4.2 SAA地磁场中心漂移速率

图5展示了2015~2025年期间, IGRF-13模型计算的507km高度上地磁场最小值(SAA磁场中心)随时间的演化. 图5a显示了纬度方向的变化, SAA磁场中心北向漂移速度约为 $(0.014 \pm 0.002)^\circ/\text{年}$ ($R^2=0.854$); 图5b展示了经度方向的变化, 西向漂移速度为 $(0.282 \pm 0.030)^\circ/\text{年}$ ($R^2=0.907$). 地磁最小值整体呈现稳定的西北方向漂移. 到2025年, SAA地磁最小点(即SAA地磁中心)的位置约为 $(60.0^\circ\text{W}, 22.3^\circ\text{S})$.

4.3 SAA质子中心漂移速率

图6和7展示了通过双高斯拟合得到的2019年1月至2024年4月期间, SAA质子通量中心在经度和纬度方向上的演化趋势. 图6a和6e显示了F10.7太阳射电流量指数, 蓝色虚线处是2019年12月——第24与第25太阳活动周期的交替时间. 在图6b~6d中, 昼侧的纬向平均北漂速度为 $(0.29 \pm 0.12)^\circ/\text{年}$. 图6f~6h显示, 夜侧的质子中心在2019年初至2020年年中, 先是呈现显著的南向

漂移, 从2020年年中之后, 转为北向漂移. 该变化趋势与图6e中的太阳活动变化相反. 因此, 简单的线性拟合不适用于描述夜侧质子通量的演化过程. 此外, 我们还观察到夜侧纬度漂移相较于太阳活动周期的反相关存在大约180天的滞后. 这一延迟主要归因于太阳活动影响宇宙射线需要一定的反应时间, 宇宙射线进而调制内辐射带中的质子通量(Orcinha等, 2019). CSES观测到SAA区域质子的漂移显著受到太阳活动周期的调制, 并与内辐射带质子通量呈负相关, 这一结果也与以往研究一致(Casadio和Arino, 2011; Qin等, 2014; Ginisty等, 2024).

图7展示了质子通量中心经度方向上的西向漂移, 在昼侧平均速度为 $(0.36 \pm 0.08)^\circ/\text{年}$, 夜侧平均速度为 $(0.33 \pm 0.10)^\circ/\text{年}$. 值得注意的是, 夜侧质子漂移呈现出显著的能量依赖性: 高能质子(16~20MeV)更靠近地磁场最小值位置($60.0^\circ\text{W}, 22.3^\circ\text{S}$), 表明其受到更强的磁场约束; 而在昼侧, 低能质子(8~12MeV)的漂移速度 $(0.44 \pm 0.06)^\circ/\text{年}$, 明显快于高能质子, 这反映出更高能量的粒子在地磁场中受到更强和稳定的约束作用. 另

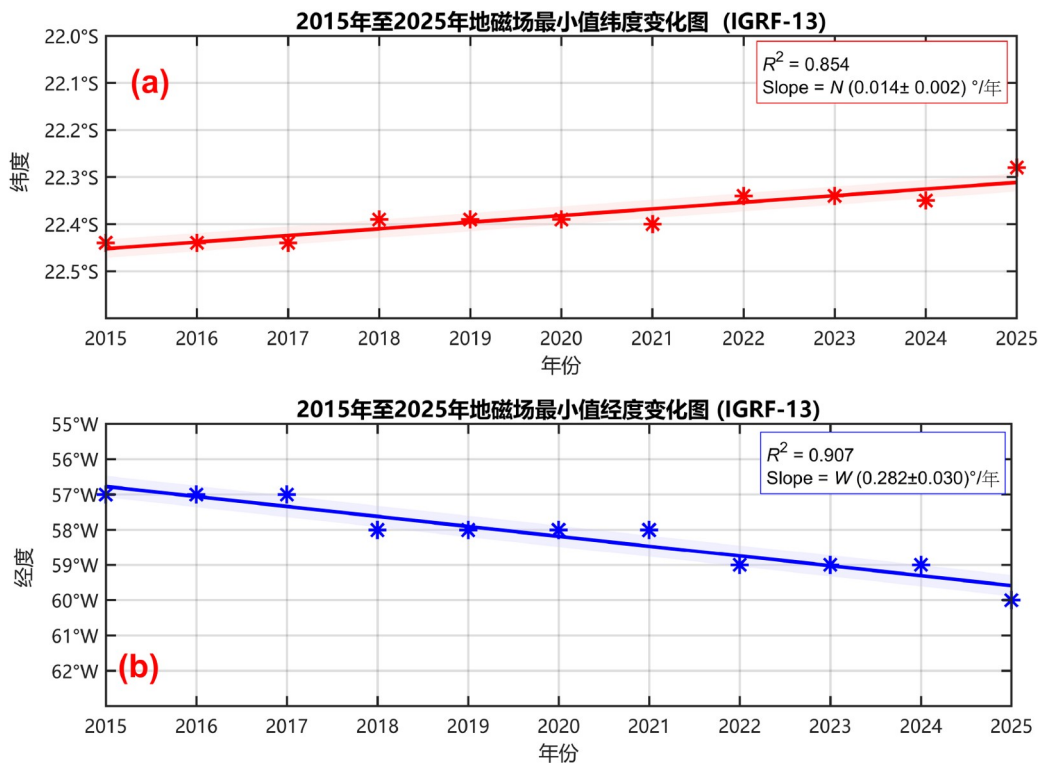


图5 基于IGRF-13模型计算的SAA磁场中心在经纬度方向的漂移速度

(a) 纬度方向; (b) 经度方向

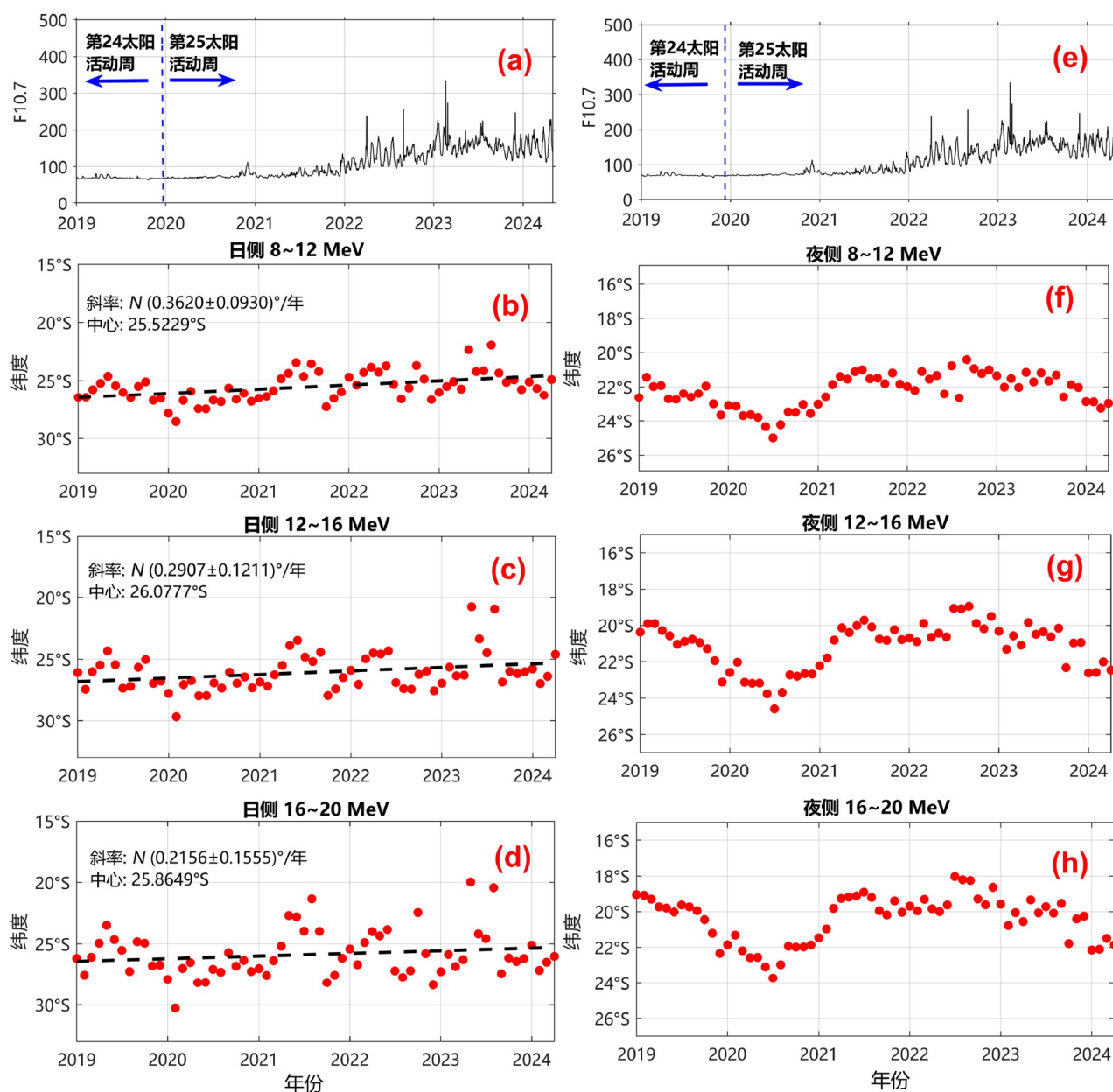


图6 CSES卫星测得的不同能段质子在昼侧与夜侧的纬度漂移速度

外, 观测到的昼夜漂移速度差异也可能与东西向大气效应的不对称性有关(Rodriguez等, 2010)。

表1汇总了不同能段质子在昼侧与夜侧条件下的漂移速度。与IGRF-13模型所预测的地磁漂移速度(纬度方向平均北漂速度为 $(0.014 \pm 0.002)^\circ/\text{年}$, 经度方向平均西向漂移速度为 $(0.282 \pm 0.030)^\circ/\text{年}$)相比, 质子漂移的方向虽然一致, 但速度明显更快。此外, SAA中质子

通量中心并不完全与地磁场最小值重合(60.0°W , 22.3°S), 而是偏移至经度大约 $50^\circ\sim 55^\circ\text{W}$, 纬度大约 $25^\circ\sim 26^\circ\text{S}$, 这一偏差背后的具体机制仍需进一步研究。

5 SAA边界识别及年变化分析

考虑到CSES卫星的太阳同步轨道特性, 及SAA区

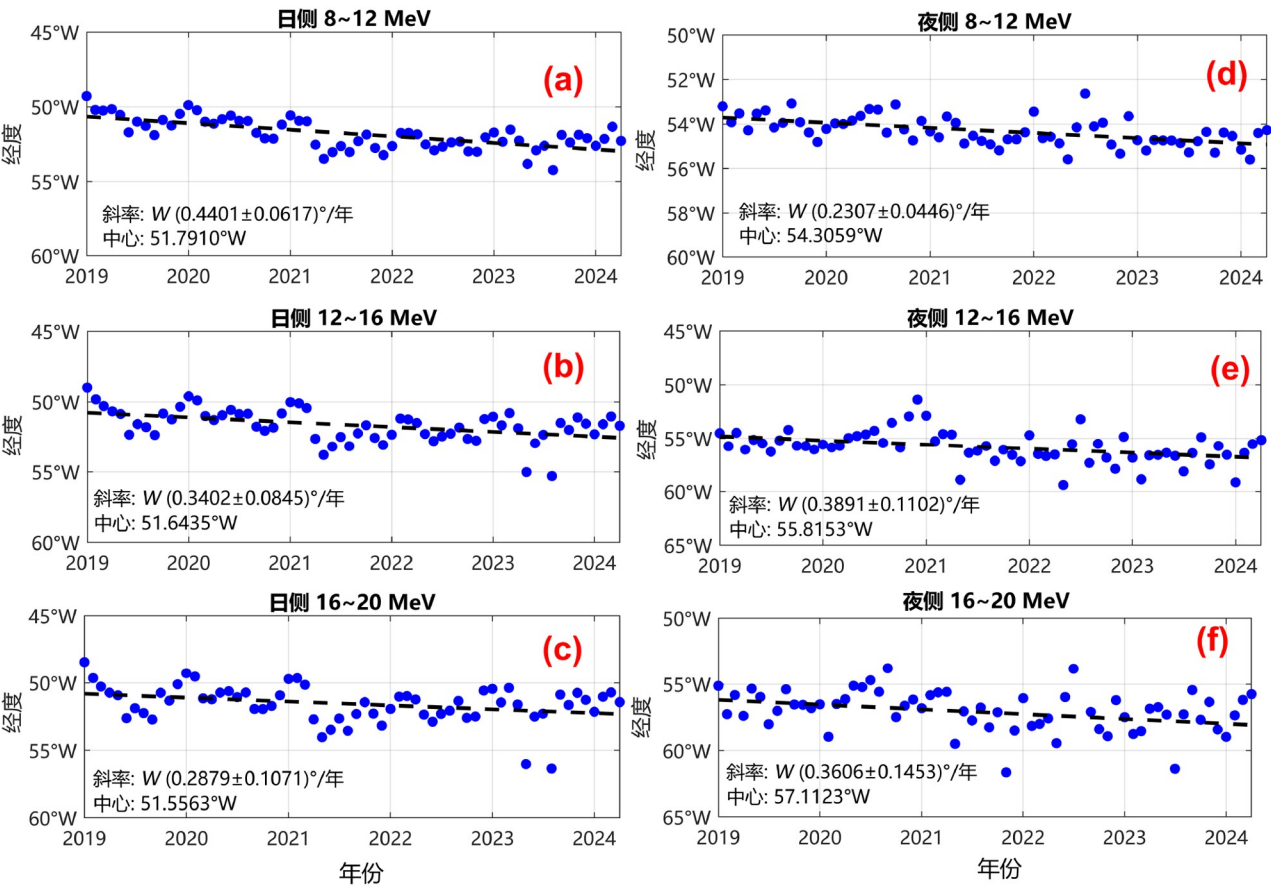


图 7 CSES 卫星测得不同能量范围质子在昼侧和夜侧的经度漂移速度

表 1 不同能量质子SAA中心的漂移速度^{a)}

能量范围	纬度(昼侧)	经度(昼侧)	经度(夜侧)
8~12MeV	$N (0.3620 \pm 0.0930)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.4401 \pm 0.0617)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.2307 \pm 0.0446)^{\circ}/\text{年}$
12~16MeV	$N (0.2907 \pm 0.1211)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.3402 \pm 0.0845)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.3891 \pm 0.1102)^{\circ}/\text{年}$
16~20MeV	$N (0.2156 \pm 0.1555)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.2879 \pm 0.1071)^{\circ}/\text{年}$	$W (0.3606 \pm 0.1453)^{\circ}/\text{年}$

a) “N”表示向北漂移, “W”表示向西漂移

域的不规则形态, 本研究采用凹包算法(concave hull), 提取SAA区域的空间形态及面积(图8). 步骤如下.

(1) SAA边界定义: 在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的质子通量全球分布图上选择4个 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 区域, 见图8红框所示范围内, 设定为非SAA区. 当质子通量高于非SAA背景区的平均值10倍, 则突破阈值, 判定为SAA区.

(2) 边界提取: 进行最大连通区域提取算法及凹包计算, 提取出可能的边界点, 并采用半径为2像素的圆盘闭运算进行边界平滑, 形成最终的边界形态.

图8展示了完整的边界识别流程结果. 图9展示了从2019年1月到2024年4月每月通过边界提取方法得到的SAA区域面积变化情况. 基于这一方法, 我们进一步绘制了SAA区域年平均边界演化图(图10), 不同颜色的曲线表示不同年份的边界. 结果显示, 2019~2024年, SAA边界持续收缩, 与太阳活动呈明显的反相关性. 图10a为2019年至2024年4月的SAA年平均边界, 可见边界缓慢收缩. 而图10b则在2024年的SAA质子边界中加入了5月与6月数据, 可以明显观察到, 由于2024年5

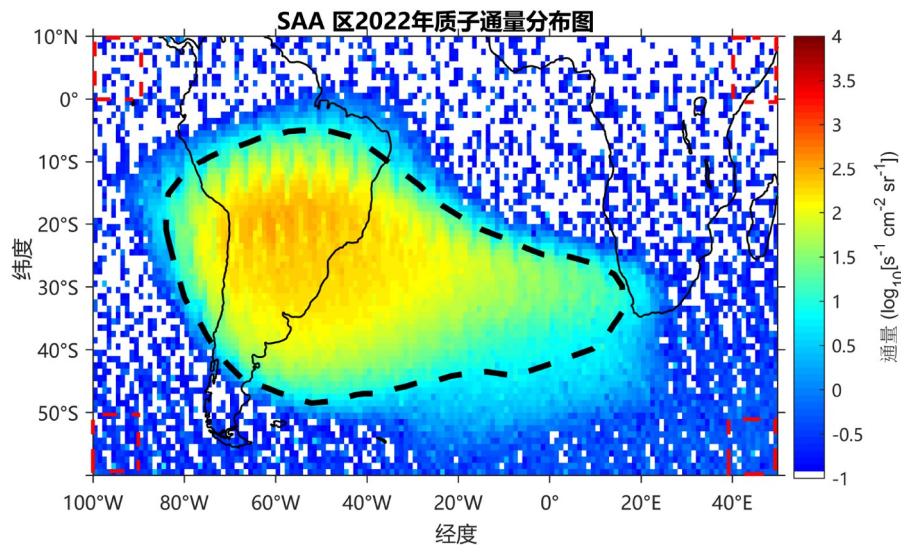


图 8 2020年SAA质子通量年平均边界识别结果

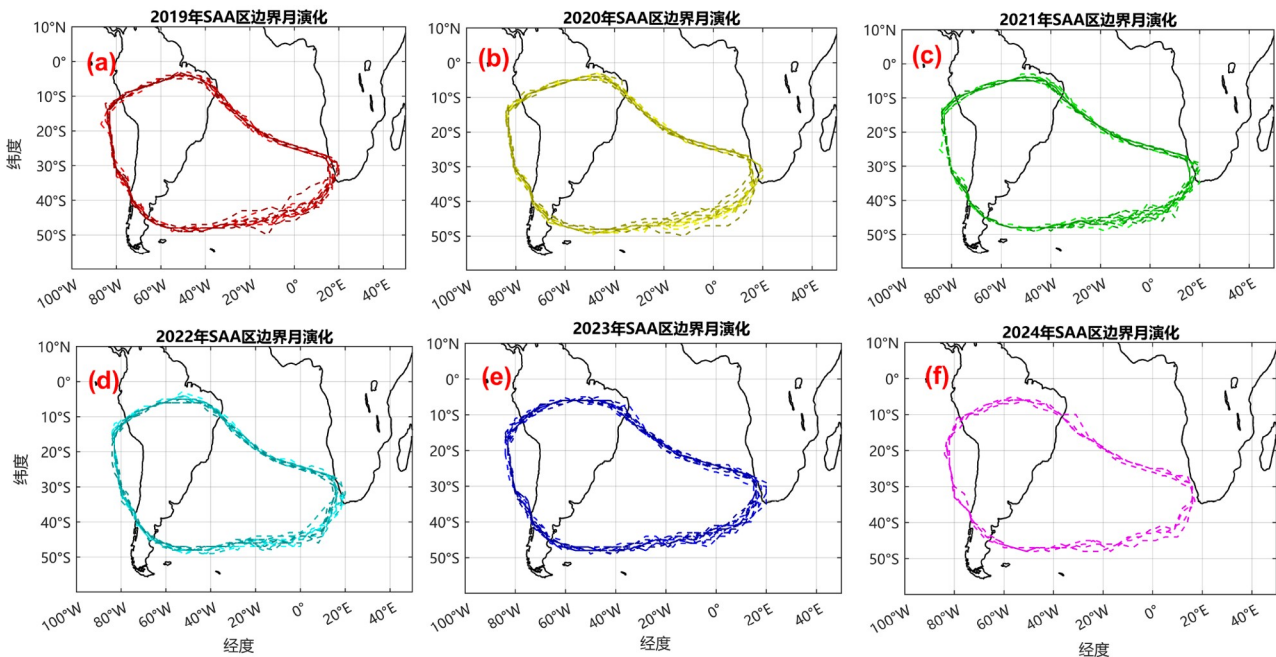


图 9 2019~2024年SAA质子通量月平均边界识别结果

月的大型磁暴事件($K_p=9$, $Dst=-400\text{nT}$)(Zhang等, 2025), SAA区域的质子边界出现了快速收缩的趋势。

图11a展示了2019年1月至2024年4月F10.7太阳射电通量指数的变化趋势。图11b显示了SAA区域内(12~16MeV)质子最大通量的月变化, 这一结果来源于第4.1节介绍的双高斯拟合方法获得的质子通量最大

值。可以看出, 质子最大通量在2019~2020年中期呈上升趋势, 随后逐渐下降。值得注意的是, 该趋势与图6f~6h中SAA夜侧质子中心纬度漂移呈反相关关系, 且同样相对太阳活动周有约180天的滞后。图11c为SAA区面积的演化曲线, 将地理坐标已转换为实际面积, 时间分辨率为3个月。2024年第二季度仅采用4月的数

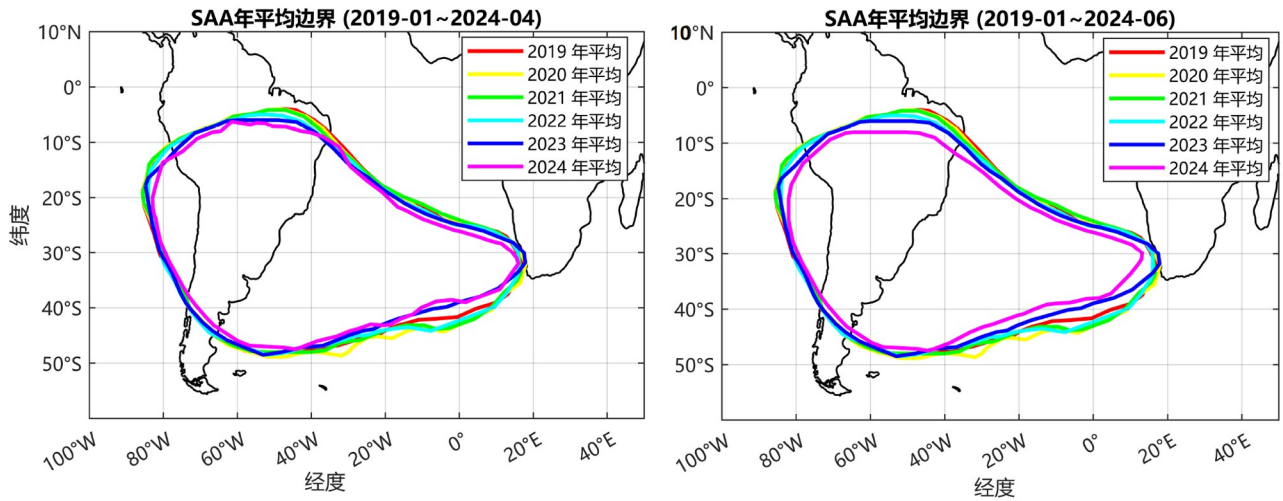


图 10 SAA区域年平均边界的演化情况

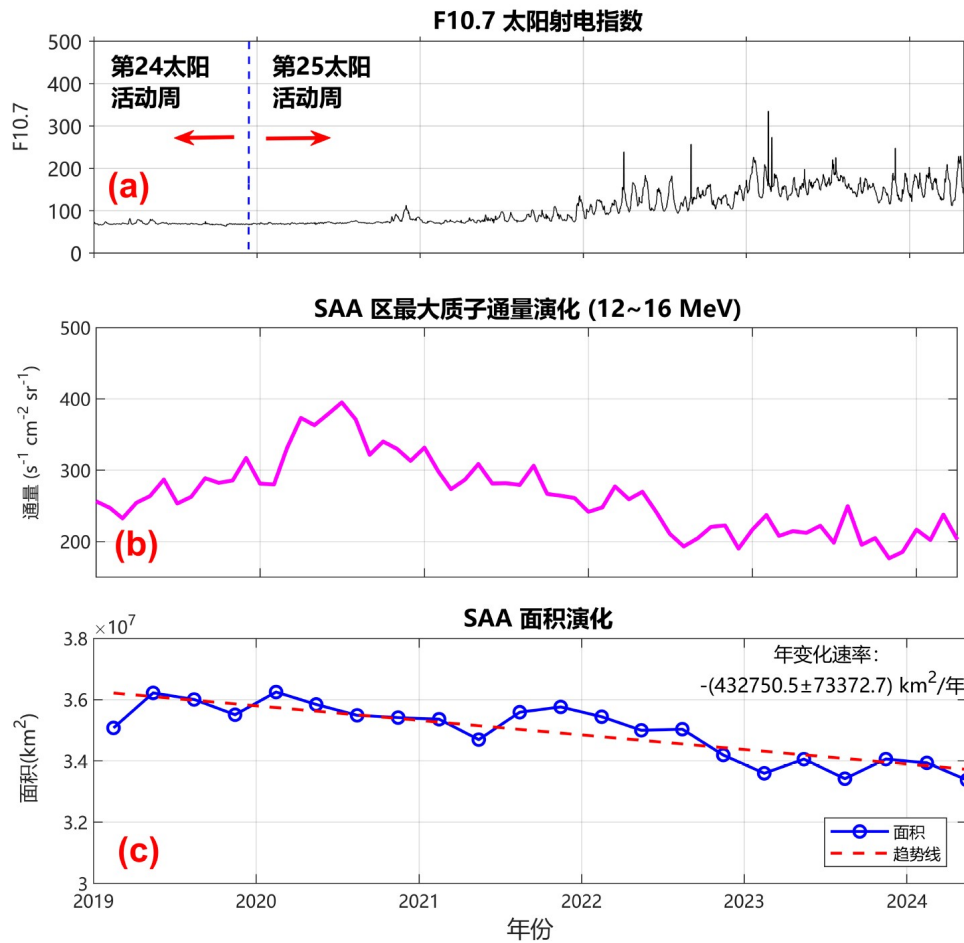


图 11 SAA区质子通量与面积随太阳活动响应特征

(a) F10.7太阳射电通量; (b) SAA区质子最大通量演化, 时间分辨率为1个月; (c) SAA区面积的变化趋势, 时间分辨率为3个月

据。从2019年1月至2024年4月, SAA区域面积持续收缩, 年均变化速率为 $-(4.33 \pm 0.73) \times 10^5 \text{ km}^2/\text{年}$, 总面积减少百分比达 $(6.09 \pm 1.03)\%$ 。这些结果表明, SAA区域内质子的演化受到太阳活动周期的显著影响。

6 结论

本研究系统分析了2019年1月至2024年4月SAA的时空演化特征, 并基于高分辨率的CSES卫星观测数据, 研究了其在第25太阳活动周期中的变化趋势及与太阳活动的相关性。主要结论如下。

(1) 通过对CSES/HPM实测结果与IGRF-13模型计算结果进行对比, 获得了2019~2024年全球地磁场强度的变化情况。结果显示地磁场呈现明显的东西半球不对称性: 东半球磁场整体增强; 而西半球则表现出整体减弱趋势, 变化特征更加复杂。

(2) CSES观测表明, 低能量质子(2.0~10.0 MeV)呈双峰结构, 而高能量质子(10.0~20.0 MeV)呈单峰分布, 这与NOAA/MEPED的观测结果一致。且CSES和NOAA的观测均显示, 2019~2024年, SAA在 $L=1.2\sim 1.5$ 的区域质子通量有所增强, 而在SAA外围区域($L>1.5$)则有所减弱。

(3) 通过对2019年1月至2024年4月间SAA区域的经度和纬度质子通量分布进行双高斯拟合, 确定了SAA质子中心的漂移趋势: 昼侧纬向平均北向漂移速度为 $(0.29 \pm 0.12)^\circ/\text{年}$; 经度西向速度分别为 $(0.36 \pm 0.08)^\circ/\text{年}$ (昼侧)和 $(0.33 \pm 0.10)^\circ/\text{年}$ (夜侧)。IGRF-13模型计算发现, 2015~2025年间SAA地磁场中心的漂移速率为: 纬向北漂 $(0.014 \pm 0.002)^\circ/\text{年}$, 经向西漂 $(0.282 \pm 0.030)^\circ/\text{年}$, SAA磁场中心与质子通量中心的漂移趋势一致。

(4) SAA边界提取分析表明, SAA质子通量面积自2019年1月至2024年4月持续收缩, 年均缩减速度约为 $-(4.33 \pm 0.73) \times 10^5 \text{ km}^2/\text{年}$, 累计缩减面积百分比达 $(6.09 \pm 1.03)\%$ 。该变化趋势与太阳活动周期呈负相关性, 表明太阳活动对SAA演化有重要影响。

致谢 我们对所有参与CSES卫星项目的科研人员表示诚挚的感谢。CSES数据可通过数据服务平台注册下载(<https://www.leos.ac.cn/>)。用户需在线注册并填写数据使用申请表, 并遵循相应数据政策。OMNI数据可从NASA

GSFC/SPDF的OMNI-Web接口获取(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>)。NOAA相关数据可通过以下链接获取(<http://poes.ngdc.noaa.gov/data/>)。

参考文献

- 谢伦, 濮祖荫, 焦维新, 傅绥燕. 2005. 南大西洋异常区内辐射带高能质子辐射环境长期. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 658–663
- 周楚悦, 方涵先, 段叠, 肖超, 任干明, 黄宏韬, 林扬. 2025. 基于IGRF-13模型的地球主磁场全球长期变化分析研究. 地球与行星物理论评, 56: 278–291
- Albert J M, Ginet G P, Gussenhoven M S. 1998. CRRES observations of radiation belt protons: 1. Data overview and steady state radial diffusion. *J Geophys Res*, 103: 9261–9273
- Badhwar G D. 1997. Drift rate of the South Atlantic Anomaly. *J Geophys Res*, 102: 2343–2349
- Casadio S, Arino O. 2011. Monitoring the South Atlantic Anomaly using ATSR instrument series. *Adv Space Res*, 48: 1056–1066
- Cheng B J, Zhou B, Magnes W, Lammegger R, Pollinger A. 2018. High precision magnetometer for geomagnetic exploration onboard of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Sci China Tech Sci*, 61: 659–668
- Ginisty F, Wrobel F, Ecoffet R, Manda M, Michez A, Balcon N, Ruffenach M, Mekki J. 2024. South Atlantic Anomaly evolution seen by the proton flux. *J Geophys Res-Space Phys*, 129: e2023JA032186
- Heynderickx D. 1996. Comparison between methods to compensate for the secular motion of the South Atlantic Anomaly. *Radiat Meas*, 26: 369–373
- Huston S, Kuck G, Pfitzer K. 1996. Low-altitude trapped radiation model using TIROS/NOAA data. In: *Radiation Belts: Models and Standards*. AGU, 97: 119–122
- Huston S L, Kuck G A, Pfitzer K A. 1998. Solar cycle variation of the low-altitude trapped proton flux. *Adv Space Res*, 21: 1625–1634
- Jones A D, Kanekal S G, Baker D N, Klecker B, Looper M D, Mazur J E, Schiller Q. 2017. SAMPEX observations of the South Atlantic anomaly secular drift during solar cycles 22–24. *Space Weather*, 15: 44–52
- Konradi A, Badhwar G D, Braby L A. 1994. Recent space shuttle observations of the South Atlantic anomaly and the radiation belt models. *Adv Space Res*, 14: 911–921
- Kurnosova L V, Kolobyanina T N, Logachev V I, Razorenov L A, Sirotkin I A, Fradkin M I. 1962. Discovery of radiation anomalies above the South Atlantic at heights of 310–340 km. *Planet Space Sci*, 9: 513–516
- Li X Q, Xu Y B, An Z H, Liang X H, Wang P, Zhao X Y, Wang H Y,

- Lu H, Ma Y Q, Shen X H, Wen X Y, Wang H, Zhang D L, Shi F, Peng W X, Gao M, Yu X X, Wang J Z, Zhang Y J, Zhang J L, Zhang J, Li H X, Zeng J R, Nan Y F. 2019. The high-energy particle package onboard CSES. *Radiat Detect Technol Methods*, 3: 22
- Li X, Xiang Z, Zhang K, Khoo L Y, Zhao H, Baker D N, Temerin M A. 2020. New insights from long-term measurements of inner belt protons (10s of MeV) by SAMPEX, POES, Van Allen probes, and simulation results. *J Geophys Res-Space Phys*, 125: e2020JA028198
- Miyoshi Y, Morioka A, Misawa H. 2000. Long term modulation of low altitude proton radiation belt by the Earth's atmosphere. *Geophys Res Lett*, 27: 2169–2172
- Orcinha M, Tomassetti N, Barão F, Bertucci B. 2019. Observation of a time lag in solar modulation of cosmic rays in the heliosphere. *J Phys-Conf Ser*, 1181: 012013
- Pu Z Y, Xie L, Jiao W X, Fu S Y, Fang X H, Zong Q G, Heynderickx D. 2005. Drift shell tracing and secular variation of inner zone high energy proton environment in the SAA. *Adv Space Res*, 36: 1973–1978
- Qin M R, Zhang X G, Ni B B, Song H Q, Zou H, Sun Y Q. 2014. Solar cycle variations of trapped proton flux in the inner radiation belt. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 9658–9669
- Rodger C J, Clilverd M A, Green J C, Lam M M. 2010. Use of POES SEM-2 observations to examine radiation belt dynamics and energetic electron precipitation into the atmosphere. *J Geophys Res*, 115: A04202
- Rodriguez J V, Onsager T G, Mazur J E. 2010. The east-west effect in solar proton flux measurements in geostationary orbit: A new GOES capability. *Geophys Res Lett*, 37: L07109
- Shen X H, Zhang X M, Yuan S G, Wang L W, Cao J B, Huang J P, Zhu X H, Piergiorgio P, Dai J P. 2018. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. *Sci China Tech Sci*, 61: 634–642
- Thébault E, Finlay C C, Beggan C D, Alken P, Aubert J, Barrois O, Bertrand F, Bondar T, Boness A, Brocco L, Canet E, Chambodut A, Chulliat A, Coisson P, Civet F, Du A, Fournier A, Fratter I, Gillet N, Hamilton B, Hamoudi M, Hulot G, Jager T, Korte M, Kuang W, Lalanne X, Langlais B, Léger J M, Lesur V, Lowes F J, Macmillan S, Mandea M, Manoj C, Maus S, Olsen N, Petrov V, Ridley V, Rother M, Sabaka T J, Saturnino D, Schachtschneider R, Sirol O, Tangborn A, Thomson A, Tøffner-Clausen L, Vigneron P, Wardinski I, Zvereva T. 2015. International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation. *Earth Planet Sp*, 67: 79
- Zhang Z X, Zhang F, Wang L, Li X Q, Zhima Z R, Wang Y F, Yang Y Y, Yang D H, Li S J, Chu W, Zhou N, Wang D D, Zhang D L, Battiston R, Iuppa R, Shen X H. 2025. The magnetosphere-ionosphere-ground responses to the May 2024 super solar storm. *Space Weather*, 23: e2024SW004197

(责任编辑: 乐超)