

CHENG Zhengwei, SHI Jiankui, WANG Guojun, WANG Zheng, SHANG Sheping, WANG Xiao. Distribution of the Projection Position of the Magnetotail FAC in the Northern and Southern Hemisphere Based on Cluster Observations (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(2): 216–224. DOI:10.11728/cjss2022.02.210111005

基于 Cluster 观测的磁尾场向电流在南北半球投影位置的分布*

程征伟 史建魁 王国军
王 铮 尚社平 王 霄

(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 利用 Cluster 四颗卫星的磁场探测数据计算磁尾场向电流并投影到极区电离层, 研究其投影位置在南北半球的分布规律, 统计过程中去除了强磁暴 (磁暴主相 $Dst < -100$ nT) 期间的场向电流事件。结果显示: 磁尾场向电流事件在极区投影位置的纬度分布具有明显的南北半球不对称性, 北半球为单峰结构, 南半球为双峰结构。在北半球投影到较低纬度 ($< 64^\circ$) 的场向电流事件数目明显多于南半球, 并且所能达到的最低纬度更低; 在南半球投影到较高纬度 ($> 74^\circ$) 的场向电流事件数目明显多于北半球, 并且所能达到的最高纬度更高。地磁平静条件下 ($|AL| < 100$ nT), 磁尾场向电流密度随磁地方时 (MLT) 呈递增趋势, 这一结果与低高度卫星在极区对 I 区场向电流的探测结果符合很好。研究结果表明, 磁尾场向电流投影位置的纬度分布呈现出明显的南北不对称性, 这与南北半球磁尾场向电流的空间分布以及磁层中磁场结构具有密切关系。

关键词 场向电流, 磁尾, 磁地方时, 南北半球, 不对称性

中图分类号 P353

Distribution of the Projection Position of the Magnetotail FAC in the Northern and Southern Hemisphere Based on Cluster Observations

CHENG Zhengwei SHI Jiankui WANG Guojun
WANG Zheng SHANG Sheping WANG Xiao

(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Using the magnetic field data of Cluster 4 satellites, the density of Field-Aligned Current (FAC) was calculated and projected to the polar ionosphere, and the distribution of its projected

* 国家自然科学基金项目 (41874172, 42074201), 国家重点实验室专项基金项目, 中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”和中国科学院国际伙伴计划项目共同资助

2021-01-07 收到原稿, 2021-11-26 收到修定稿

E-mail: zwcheng@spaceweather.ac.cn

position in the north and south hemispheres was studied. The FAC events during strong magnetic storms are removed from the statistical process (during the main phase of storm $Dst < -100$ nT). The results showed that: The projection locations of magnetotail FAC events in the polar region are mainly distributed in the Invariant Latitude (ILAT) between 64° and 76° . The distribution in the northern and southern hemispheres is obviously asymmetric, with a single peak structure in the northern hemisphere and a bimodal structure in the southern hemisphere. The number of FAC events that can project to lower latitudes ($< 64^\circ$) in the northern hemisphere is significantly more than in the southern hemisphere, and can achieve the lowest latitude is lower; The number of FAC events that can project to higher latitudes ($> 74^\circ$) in the southern hemisphere is significantly more than in the northern hemisphere, and can achieve the highest latitude is higher. Distinguish the polarity of FAC, the distribution of earthward FAC and the tailward FAC in the north and south hemisphere is similar. Under quiet geomagnetic conditions ($|AL| < 100$ nT), the current density of FAC in the magnetotail increased with the Magnetic Local Time (MLT) (from 20:00 MLT before midnight to 04:00 MLT after midnight), which was consistent with the previous detection results of Region 1 FAC by low-altitude satellites. The above results show that the latitude distribution of the projected position of the magnetotail FAC presents an obvious north-south asymmetry, which is closely related to the spatial distribution of the magnetotail FAC in the northern and southern hemispheres and the structure of the magnetic field in the magnetosphere. The distribution of the FAC density in the magnetotail with MLT is consistent with the distribution of Region 1 FAC in the polar ionosphere, which provides indirect evidence for the connection between the magnetotail FAC and Region 1 FAC, indicating that the FAC is a large-scale structure from the magnetotail to the ionosphere.

Key words Field-Aligned Currents (FAC), Magnetotail, Magnetic Local Time (MLT), Northern and southern hemisphere, Asymmetry

0 引言

大尺度场向电流(FAC)是电离层与磁层中重要的物理现象,对动量和能量在太阳风、磁层与电离层间的传输起着重要作用,是太阳风-磁层-电离层耦合系统中关键的一环。场向电流首次被卫星观测证实是在 20 世纪 60 年代中期^[1, 2]。随后 Zmuda 和 Armstrong^[3]利用 Triad 卫星的磁场数据计算了场向电流,并给出了极区电离层第一个场向电流的统计图形。Iijima 和 Potemra 等^[4, 5]利用 Triad 卫星的磁场数据,分辨出大尺度场向电流的两个区域,即 I 区(R1)和 II 区(R2)场向电流,对其特征进行统计研究,发现 I 区场向电流在 II 区场向电流的极向晨侧流进电离层,昏侧流出电离层,II 区场向电流的极性与 I 区场向电流的极性正好相反。Christiansen 等^[6]利用 Ørsted 和 Magsat 卫星在极区上空的探测数据,区分

南北半球,研究了日侧和夜侧场向电流的季节性变化规律,发现 I 区和 II 区场向电流在晨昏向的距离没有明显的季节依赖性。Ohtani 等^[7]利用 DMSP F7 和 F12-F15 卫星的磁场探测数据,发现大尺度 I 区和 II 区场向电流的纬度位置和强度具有明显的季节依赖性,在夏季半球和冬季半球,日侧场向电流分别向极向和赤道向移动,而夜侧场向电流具有相反的季节依赖性。

目前,对于低高度电离层场向电流已经有比较全面的了解。但是还有一些重要的科学问题有待进一步深入研究,例如不同行星际条件下场向电流的产生和发展机制,场向电流源区的位置,不同区域场向电流的变化特征是否一致等,虽然现有的理论模型可以给出一些结果,但这些结果由于缺乏直接证据或存在一些问题并没被广泛接受。要深入了解和解决这些问题,必须了解地球空间不同区域的场向电流变化特

性及其之间的联系。随着探测技术的发展,场向电流的研究区域也从低高度电离层扩展到内磁层,乃至近地磁尾和远磁尾。一些研究利用 ISEE-1/2 卫星的探测数据分析地球内磁层的场向电流事件^[8, 9],计算的场向电流强度和密度值与低高度卫星的探测结果相近。Elphic 等^[10]利用 ISEE-1/2 卫星的磁强计数据,分析了 189 个磁尾等离子体片边界层穿越事件中的场向电流事件,发现极向边界小尺度电流的极性分布与 I 区场向电流系统相反。Ohtani 等^[11]也利用 ISEE-1/2 的磁强计数据分析了磁尾 PSBL 中的 FAC,发现其极性与大尺度 I 区场向电流的极性一致。Ueno 等^[12]利用 Geotail 卫星穿越磁尾期间的数据,研究了位于重联点地向一侧的场向电流,其研究显示等离子体片最外侧场向电流存在极性分布的晨昏不对称性。以往只有很少的科学卫星任务可以对内磁层乃至磁尾的场向电流进行探测,虽然只是利用单/双卫星的磁场数据来近似估算场向电流密度,但这些探测结果对于正确认识地球空间大尺度场向电流结构起到非常重要的作用。随着 Cluster 卫星的成功发射,为开展磁尾场向电流的研究提供了很好机会。

Cluster 由四颗载荷相同的卫星组成空间四面体,可以对空间磁场进行多点探测^[13],从而利用 Curlometer 方法^[14, 15]计算磁场的旋度,进而得到电流密度。Vallat 等^[16]利用 Cluster 卫星的磁场数据,研究了环电流区的电流密度。Draper 等^[17]研究给出了一次亚暴期间位于磁尾尾向移动等离子体团的发展过程,以及与之相联系的 PSBL 中的场向电流变化。Snekvik 等^[18]研究了南半球午夜扇区靠近晨侧,位于中性片外侧伴随爆发性整体流(BBF)的场向电流事件。Shi 等^[19]通过统计研究给出了磁尾等离子体片边界层区场向电流的空间分布特性。Cheng 等^[20, 21]研究了行星际磁场不同分量对磁尾场向电流的控制作用,同时分析了一次亚暴期间场向电流的载流粒子特性^[22]。Shi 等^[23, 24]研究了地球极区上空场向电子的特性和分布特征并估算了其携带的场向电流。

本文主要利用 Cluster 四颗卫星的磁场和等离子体探测数据,通过计算磁场旋度来准确求得电流密度,并选取大量的场向电流事件进行统计分析,区分南北半球,给出了磁尾场向电流在极区投影位置的分布,同时对磁尾场向电流密度的地方时分布与 I 区场

向电流进行比较,这些研究为正确认识磁尾场向电流与低高度电离层场向电流的关系提供了必要的依据。

1 探测数据

本研究中所使用的探测数据包括两部分,一是 Cluster 四颗卫星的磁场数据、电子数据和高能离子数据。这部分数据主要用来计算磁尾场向电流密度和选取场向电流事件。二是世界地磁数据中心(WDC)提供的地磁 *Dst* 指数及 *AL* 指数数据,这部分数据主要是用来划分不同的地磁活动水平,以进行统计研究。

探测数据选取的时间段为 2001 年和 2004 年每年的 7—11 月,这是根据 Cluster 卫星轨道和四颗卫星之间的空间位形所决定的。在这一时间段内,Cluster 卫星的近地点位于向阳侧,远地点在磁尾 19.6 R_e (地球半径)附近,其运行周期大约为 57 h,Cluster 卫星每年会有 60 天左右穿越磁尾等离子体片及其边界层。实际上,选取 2001 年和 2004 年数据很重要的一个原因是 Cluster 四颗卫星相互间的距离分别为 2000 km 和 1000 km 左右,这与磁尾等离子体片边界层区场向电流的空间尺度相当,有利于计算得到较为准确的场向电流密度。

本研究中 Cluster 卫星的磁场数据、电子数据和高能离子数据为 4 s 分辨率,由于磁尾大尺度场向电流结构的时间尺度为分钟量级,所以 4 s 分辨率的探测数据完全可以满足场向电流计算和事件选取需要。地磁活动指数数据主要用于划分不同的地磁活动水平,其中 *Dst* 指数为 1 h 分辨率, *AL* 指数为 1 min 分辨率。由于 *Dst* 指数只用于区分强磁暴时间范围,1 h 的分辨率可以满足研究需要。

2 磁尾场向电流密度计算与事件选取方法

磁尾场向电流密度的计算方法通常有两种。一种是根据卫星所探测的等离子体数据,当电子(离子)沿磁力线以一定速度运动时,携带的场向电流密度为

$$\mathbf{j}_{||e} = ne\mathbf{v}_{||e} (\mathbf{j}_{||i} = ne\mathbf{v}_{||i}),$$

因此总的场向电流密度可以由

$$\mathbf{j}_{||} = ne(\mathbf{v}_{||i} - \mathbf{v}_{||e})$$

计算得到。其中, n 为电子或离子的数密度, e 为单位电荷, $v_{||i}$ 为离子沿磁场方向的运动速度, $v_{||e}$ 为电子沿磁场方向的运动速度。由于探测器无法获取研究区域内全粒子及全能量范围的等离子体探测数据, 这种方法计算的场向电流密度往往会产生较大的误差。另一种是根据卫星所探测的磁场数据, 由安培定律 $\mathbf{J} = \frac{\nabla \times \mathbf{B}}{\mu_0}$ 计算得到电流密度, 然后投影到磁场方向得到场向电流密度 $j_{||} = \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}$, 以往通过单/双卫星的磁场探测数据只能近似得到电流强度, 通过计算电流片厚度进而得到电流密度, 计算误差较大。利用四颗卫星的磁场探测数据, 由 Curlometer 方法可以直接计算磁场的旋度^[14], 进而得到较为准确的场向电流密度。由于计算电流密度的准确性与四颗卫星组成四面体的形状以及磁场地形密切相关, 研究中使用 Q 评价来计算场向电流的磁场数据质量^[15, 19]。 Q 定义为 $Q = |\nabla \cdot \mathbf{B}|/|\nabla \times \mathbf{B}|$ 。本文采用 $Q < 0.3$ 作为数据质量标准, 这样可以保证计算误差较小。

磁尾的场向电流主要分布在等离子体片边界层中, 通常认为这一区域的场向电流与极区的 I 区电流是相连的。本研究主要根据等离子体 β 值(等离子体热压与磁压的比值)来确定等离子体片边界层的位置: 当 $0.01 \leq \beta \leq 1$ 时, 认为是在等离子体片边界层中; 当 $\beta < 0.01$ 时, 认为是在磁瓣区域; 当 $\beta > 1$ 时, 认为是在等离子体片中^[12]。利用等离子体 β 值确定等离子体片边界层位置相对较为准确, 如果 Cluster 卫星的电子或高能离子数据缺失或不全, 则可以根据磁场数据进行判断^[11, 19]。

本文通过选取场向电流事件进行统计分析, 选取事件主要遵循以下两个原则: 首先场向电流事件的峰值密度大于 $2.38 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$ ($3 \text{ pT} \cdot \text{km}^{-1}$), 这样可以保证由电流背景噪声和四面体近似电流计算产生的误差较低, 通常情况下利用 Curlometer 方法计算磁尾场向电流密度产生的误差大约为 12%^[19]; 其次, 两个独立的场向电流事件的时间间隔大于 5 min ^[19, 20], 如果 5 min 之内有多个电流密度值大于 $2.38 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$, 只选取最大值作为这次场向电流事件。

根据上述方法, 共计选取了 1839 个磁尾等离子体片边界层区场向电流事件, 并利用 T96 模型将其投影到极区电离层高度, 同时每个场向电流事件都给出了与之相对应的 Dst 和 AL 地磁活动指数。

3 统计分析与讨论

图 1 所示为 Cluster 卫星所探测到的 1839 个场向电流事件在磁尾的空间分布及其在极区的投影。从图 1 可以看出, 场向电流事件在磁尾分布于一个相对广阔的区域, x 方向大致覆盖了从 $-10R_e$ 至 $-20R_e$ 的区域, y 方向大致覆盖了从 $-15R_e$ (晨侧) 至 $+15R_e$ (昏侧) 的区域, z 方向大致覆盖了从 $-12R_e$ (南半球) 至 $+12R_e$ (北半球) 的区域。图 1(d) 给出了所有场向电流事件在极区的投影位置分布(并未区分南北半球), 图 1(d) 中的时间为磁地方时 (MLT), 纬度为不变纬度 (ILAT), 可以看到绝大部分的场向电流事件都集中在 $20:00-04:00 \text{ MLT}$ 之间, 不变纬度 70° 附近。场向电流是从磁尾到极区电离层的大尺度结构, 对磁尾场向电流进行磁力线追踪, 可以给出其在极区的足点位置, 这相当于把场向电流在磁尾的三维空间分布投影到了极区上空的二维平面上, 将三维分布问题转化为二维分布问题, 有助于利用有限的事件数目开展统计分析研究, 同时也有利于与低高度电离层的场向电流特性及分布规律进行对比。本文主要研究在一定地磁活动水平条件下, 磁尾场向电流在极区投影位置随不变纬度和磁地方时的分布规律。

在所选取的 1839 个场向电流事件中, 有 377 个场向电流事件发生在强磁暴(磁暴主相 $Dst < -100 \text{ nT}$) 的各个相位(急始、主相和恢复相)阶段, 另外 1462 个场向电流事件发生在非强磁暴期间。强磁暴期间, 场向电流的边界会明显向赤道向移动^[4, 21, 25], 特别是在主相阶段, 由于伴随着亚暴过程, 电流密度增大一个数量级^[21], 这会使选取的场向电流事件较没有强磁暴期间增加很多, 强磁暴每年发生的概率并不大, 仅有约 1~2 次, 为了减少这些偶然增加值所带来的统计误差, 研究中对这些发生在强磁暴期间的场向电流事件进行单独统计分析。

图 2 所示为磁尾场向电流的投影位置随不变纬度的变化。综合考虑既能满足每个纬度区间有足够的场向电流事件, 又能反映出随不变纬度的一些细微变化, 研究中选取不变纬度 2° 为一个统计区间。黑实线为非强磁暴期间的统计结果, 如果将单个纬度区间场向电流事件数目大于 100 的数据进行统计, 那么超过 86% 的场向电流事件投影在 $64^\circ-76^\circ$ 纬度区间内。红实线为强磁暴期间的统计结果, 场向电流事件

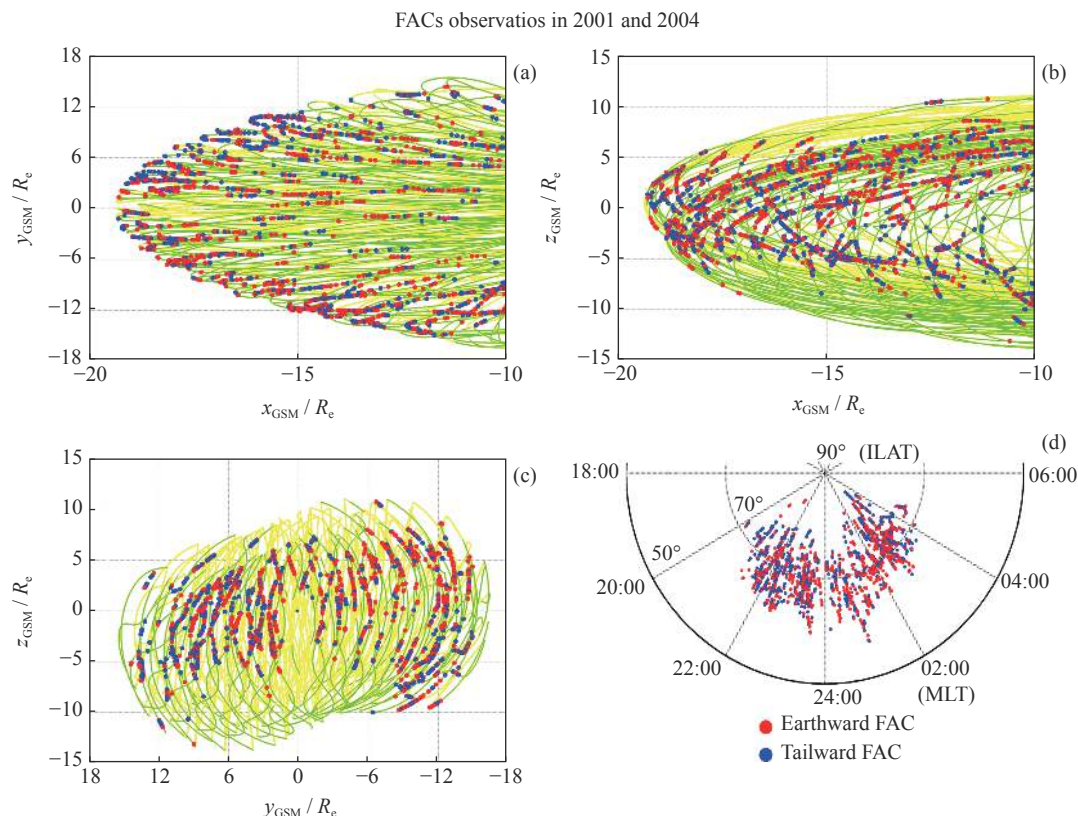


图1 Cluster 卫星探测到的 1839 个磁尾场向电流事件在 GSM 坐标系下 xy 、 xz 和 yz 平面的分布及其在极区的投影 (绿色线表示该轨道有可用探测数据, 黄色线表示无可用的探测数据)

Fig. 1 Distribution of 1839 magnetotail FAC cases detected by the Cluster in GSM coordinates xy , xz and yz planes and their projections in the polar region (Green line indicates that the data is available on the orbit, and the yellow line indicates that no data is available)

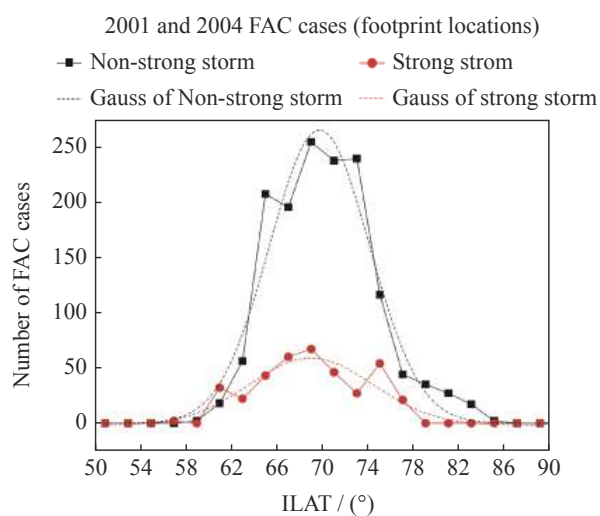


图2 磁尾场向电流事件 (在极区投影) 数目随不变纬度的变化

Fig. 2 Number of FAC in the magnetotail (projection in the polar region) changes with ILAT

除二个投影在 56° — 58° 纬度区间内, 其余事件均投影在 60° — 78° 的纬度范围内, 相对较为集中, 在 60° — 62° 和 74° — 76° 两个纬度区间内场向电流事件的数目有明显的增加。红色和黑色虚线分别为强磁暴和非强磁暴期间的高斯拟合结果, 可以看到非强磁暴期间拟合结果更好, 这与统计事件的数目相对较多有着密切的关系。此外, 由图2还可以看出, 非强磁暴期间场向电流的投影位置所能达到的最高纬度大约为 86° , 而强磁暴期间大约为 78° , 二者相差大约 8° 。同样检验场向电流投影位置所能达到的最低纬度, 二者相差 2° 左右。这表明在强磁暴期间, 场向电流的极向边界可能比赤道向边界向低纬度扩展更为明显。以往利用低高度 Triad 卫星的探测数据研究 I 区场向电流时发现, 地磁活动扰动期间 ($|AL| > 100$ nT), 场向电流片的宽度会增加, 是地磁平静时的 1.2~1.3 倍, 同时电流片中心的位置会向赤道向移动 2° ~ 3° ^[26], 这与

本研究中磁尾的统计结果有些不同,磁尾场向电流片的厚度并没有增加,相反由于极向边界向低纬移动的幅度大于赤道向边界的移动幅度,场向电流片的宽度反而减小。这主要是因为研究只是把强磁暴事件单独提取出来进行了分析,而强磁暴期间极区上空的闭合磁力线与行星际磁场重联后被持续打开剥离,同时磁尾的磁场偶极化过程也改变了整个磁层的磁场位形,这样其在极区的投影就会变得剧烈且复杂,本文将这部分数据从所有统计事件中区分出来进行分析。

在 Cluster 卫星发射之前,都是通过一颗或两颗卫星(例如 ISEE-1/2, Geotail)的探测数据对磁尾场向电流进行研究,利用单/双卫星的探测数据在计算场向电流密度时存在很大的局限性(例如对磁场和电流片进行假设、估算电流片的厚度等),选取的场向电流事件数目也相对较少,致使很多统计研究不能更加深入和细致。本研究利用 Cluster 四颗卫星的探测数据,在非强磁暴期间获取了 1462 个场向电流事件,这些场向电流事件的密度是利用四颗卫星的磁场探测数据通过计算磁场旋度直接得到的,较以往利用单/双卫星探测数据计算的更加准确,可以进行一些定量分析。由于选取事件数目有了明显的增加,还可以开展一些更加细致的统计分析,例如将统计区间划分得更小,区分南北半球或电流极性进行统计分析等。

图 3 所示为区分南北半球,磁尾场向电流事件(在极区投影)数目随不变纬度的变化。从图 3 可以看出,北半球的分布(绿色)呈单峰结构,峰值在 $68^{\circ}-70^{\circ}$ 纬度区间内;南半球的分布(紫色)呈双峰结构,二个峰值分别在 $64^{\circ}-66^{\circ}$ 和 $72^{\circ}-74^{\circ}$ 纬度区间内,二个峰值中间的谷值在 $68^{\circ}-70^{\circ}$ 纬度区间,与北半球峰值所处纬度大小相同。这表明场向电流在极区的投影分布存在明显的南北半球不对称性,其在南半球的分布相对于北半球更加复杂。如果关注峰值两边靠近较低和较高的纬度区间,可以发现:在北半球投影到较低纬度($<64^{\circ}$)的场向电流事件数目明显多于南半球,并且所能达到的最低纬度更低;在南半球投影到较高纬度($>74^{\circ}$)的场向电流事件数目明显多于北半球,并且所能达到的最高纬度更高。这主要是由于场向电流在磁尾南北半球等离子体片边界层的空间分布不同以及南北半球的磁场结构差异所造成的。实际上,磁尾场向电流在极区投影位置受到行星际磁场和太阳风条件的调控,与开放磁力线和闭合

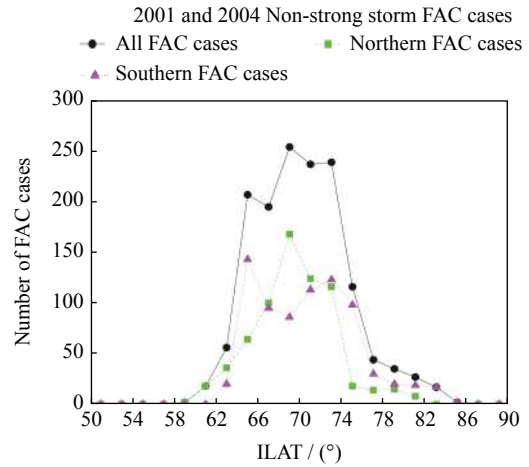


图 3 区分南北半球后磁尾场向电流事件(在极区投影)数目随不变纬度的变化

Fig. 3 Distinguish the southern hemisphere from the northern hemisphere, the number of FAC in the magnetotail (projection in the polar region) changes with ILAT

磁力线区边界、极光椭圆带以及电离层场向电流都具有十分密切的关系。在强磁暴期间,由于整个磁层的磁场位形发生了很大变化,导致一方面根据模型所投影得到的位置会产生较大的误差^[21, 22],另一方面投影位置本身也会存在较大的偏移,所以本研究只对非强磁暴期间的场向电流事件进行统计分析。

综上所述,并没有区分场向电流的极性,即地向场向电流和尾向场向电流,图 3 中所显示出来的单峰和双峰结构,特别是双峰结构是否与场向电流的极性有关,即两个峰值是否对应两个不同极性。这里区分地向场向电流和尾向场向电流,分别研究南北半球磁尾场向电流事件(在极区投影)数目随不变纬度的变化。由图 4 可以看出:北半球地向和尾向场向电流投影位置的纬度分布都是单峰结构,除在较高纬度的一个统计区间($76^{\circ}-78^{\circ}$),其他统计区间中地向场向电流的数目均多于尾向场向电流的数目;南半球地向和尾向场向电流投影位置的纬度分布都是双峰结构,当不变纬度 $<70^{\circ}$ 时,地向场向电流的数目略多于尾向场向电流的数目,当不变纬度 $>70^{\circ}$ 时,尾向场向电流的数目略多于地向场向电流的数目。地向与尾向场向电流在南北半球的分布规律相似,即地向和尾向场向电流的投影位置在北半球的分布都是单峰结构,在南半球都是双峰结构,这种单双峰结构的产生与电流极性无关。

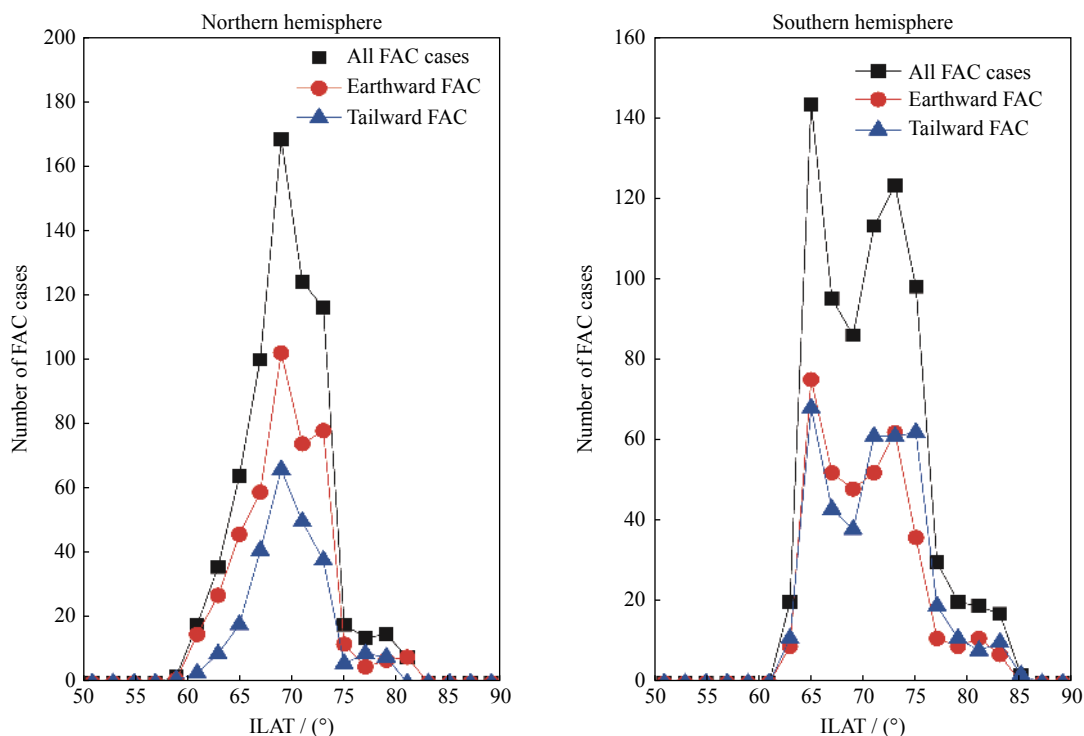


图4 南北半球磁尾地向和尾向场向电流事件(在极区投影)数目随不变纬度的变化

Fig. 4 Distinguish the southern hemisphere from the northern hemisphere, the number of earthward (tailward) FAC in the magnetotail (projection in the polar region) changes with ILAT

进一步统计磁尾场向电流密度随磁地方时的分布,为了与以往利用低高度卫星所统计的I区电流密度进行比较,研究中采用与以往相同的地磁活动指数条件,即 $|AL| < 100$ nT。这里主要给出了地磁相对平静期的磁地方时分布。因为通过这部分探测数据所计算的场向电流密度及其在极区的投影位置误差均相对较小,利于定量分析。

图5给出了在地磁活动指数 $|AL| < 100$ nT条件下,磁尾场向电流密度随磁地方时的分布,以及Iijima和Potemra^[26]利用低高度卫星探测数据统计的R1场向电流密度磁地方时分布,研究中以1 MLT作为一个统计区间,选取的时间段从子夜前20:00 MLT到子夜后04:00 MLT,这是由磁尾探测的时间段所决定的。磁尾共计589个场向电流事件,靠近子夜的场向电流事件数目更多。通过对比可以看出,二者的变化趋势符合很好,即从20:00 MLT到04:00 MLT(从昏侧到晨侧),无论是磁尾还是低高度场向电流密度均呈现出递增趋势,只是磁尾场向电流密度在02:00—03:00 MLT区间内有一次明显的下降,而I区场向电流密度在01:00—

02:00 MLT区间内有一次明显下降,但下降幅度小于磁尾的下降幅度。磁尾场向电流密度的最小值约为 $3.20 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值约为 $4.53 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$,平均值约为 $3.94 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$ 。电离层I区场向电流密度的最小值约为 $0.70 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值约为 $0.98 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$,平均值约为 $0.80 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。电离层I区场向电流密度大约为磁尾场向电流密度的200倍。磁尾的场向电流空间尺度范围较大,且结构复杂,带电粒子运动会产生密度大小不同或方向不同的分层电流片结构^[27],单个场向电流片的厚度在 $0.3 \sim 0.8 R_e$,本文中利用Cluster卫星数据计算的磁尾大尺度场向电流结构是由多重电流片组成的,其主要分布在等离子体片边界层中,由于等离子体片随太阳风条件南北向拍动,所以观测到的大尺度场向电流覆盖区域(z 方向)达到了约 $10 R_e$ 。而在相同磁地方时区域电离层高度的场向电流片厚度约为600 km,二者比值约为100。贯穿磁层—电离层的场向电流片可以视为是沿经度无限,沿纬度有限的大尺度结构,理论上二者密度的比值与厚度的比值应该相差不大,但实际上从磁尾探测数据所推出的极区电离层场向电流密度约

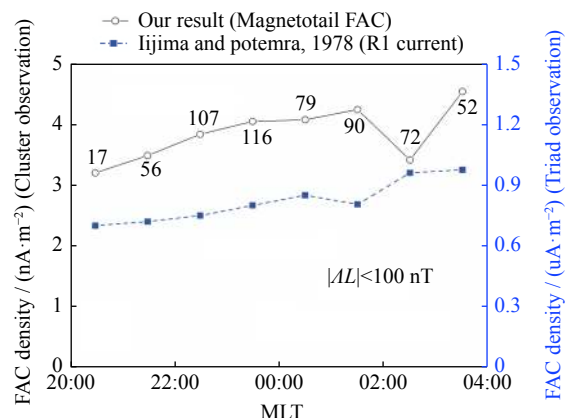


图5 $|AL| < 100$ nT 条件下磁尾场向电流密度随磁地方时的分布与以往研究中 I 区 (R1) 场向电流密度的对比 (圆圈附近的数字表示磁尾场向电流事件数目)

Fig. 5 Distribution of the FAC density in the magnetotail with MLT is compared with R1 density distribution under the condition $|AL| < 100$ nT (The numbers beside the circles are the numbers of FAC cases in the magnetotail)

为低高度探测结果的一半, 虽然有近一倍的差距, 但作为一个通过假设近似估算的结果, 其在数量级上是相同的, 这就证明二者有着非常密切的联系, 但磁尾场向电流可能不是极区 I 区场向电流唯一的源。

4 结论

利用 Cluster 和 ACE 卫星 2001 年和 2004 年 7—10 月期间的探测数据, 研究了磁尾等离子体片边界层区场向电流投影位置在南北半球的分布规律, 并与低高度卫星的探测结果进行比较, 统计过程中去除了强磁暴 (磁暴主相 $Dst < -100$ nT) 期间的场向电流事件。其研究结果如下。

(1) 磁尾等离子体片边界层区场向电流事件在极区的投影位置主要分布在不变纬度 (ILAT) 64° — 76° 之间。

(2) 区分场向电流的极性, 地向场向电流与尾向场向电流在南北半球的分布规律相似。

(3) 南北半球的分布具有明显的不对称性, 北半球为单峰结构, 南半球为双峰结构。

(4) 在北半球投影到较低纬度 ($< 64^\circ$) 的场向电流事件数目明显多于南半球, 并且所能达到的最低纬度更低; 在南半球投影到较高纬度 ($> 74^\circ$) 的场向电流

事件数目明显多于北半球, 并且所能达到的最高纬度更高。

(5) 地磁平静条件下 ($|AL| < 100$ nT), 磁尾场向电流密度随磁地方时呈递增趋势 (从午夜前 20:00 MLT 到午夜后 04:00 MLT), 通过比较发现, 其与低高度卫星对 I 区场向电流的探测结果符合很好。

致谢 地磁数据由世界地磁数据中心 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>) 获取, Cluster 数据和软件由 Cluster 团队 (<https://cosmos.esa.int/web/csa>) 提供。

参考文献

- [1] ZMUDA A J, MARTIN J H, HEURING F T. Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1966, **71**(21): 5033-5045
- [2] CUMMINGS W D, DESSLER A J. Field-aligned currents in the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1967, **72**(3): 1007-1013
- [3] ZMUDA A J, ARMSTRONG J C. The diurnal variation of the region with vector magnetic field changes associated with field-aligned currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1974, **79**(16): 2501-2502
- [4] IJIMA T, POTEIRA T A. Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1976, **81**(34): 5971-5979
- [5] IJIMA T, FUJII R, POTEIRA T A, et al. Field-aligned currents in the south polar cusp and their relationship to the interplanetary magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **81**(A12): 5595-5603
- [6] CHRISTIANSEN F, PAPITASHVILI V O, NEUBERT T. Seasonal variations of high-latitude field-aligned currents inferred from Ørsted and Magsat observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A2): 1029
- [7] OHTANI S, UENO G, HIGUCHI T, et al. Annual and semiannual variations of the location and intensity of large-scale field-aligned currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A1): A01216
- [8] JIAO Weixin. The relationship between field-aligned current and substorm phase[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1996, **16**(2): 140-144
- [9] CHUN F K, RUSSELL C T. Field-aligned currents in the inner magnetosphere: control by geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A2): 2261-2270
- [10] ELPHIC R C, MUTCH P A, RUSSELL C T. Observations of field-aligned currents at the plasma sheet boundary: an ISEE-1 and 2 survey[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1985, **12**(10): 631-634

- [11] OHTANI S, KOKUBUN S, ELPHIC R C, *et al.* Field-aligned current signatures in the near-tail region: 1. ISEE observations in the plasma sheet boundary layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1988, **93**(A9): 9709-9720
- [12] UENO G, OHTANI S I, SAITO Y, *et al.* Field-aligned currents in the outermost plasma sheet boundary layer with Geotail observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A11): 1399
- [13] BALOGH A, CARR C M, ACUÑA M H, *et al.* The Cluster magnetic field investigation: Overview of in-flight performance and initial results[J]. *Annales Geophysicae*, 2001, **19**(10/11/12): 1207-1217
- [14] ROBERT P, DUNLOP M W, ROUX A, *et al.* Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data[M]. Netherlands: ESA Publications Division, 1998: 395-418
- [15] DUNLOP M W, BALOGH A, GLASSMEIER K H, *et al.* Four-point cluster application of magnetic field analysis tools: the curlometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A11): 1384
- [16] VALLAT C, DANDOURAS I, DUNLOP M, *et al.* First current density measurements in the ring current region using simultaneous multi-spacecraft Cluster-FGM data[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(5): 1849-1865
- [17] DRAPER N C, LESTER M, COWLEY S W H, *et al.* Cluster magnetotail observations of a tailward-travelling plasmoid at substorm expansion phase onset and field aligned currents in the plasma sheet boundary layer[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(12): 3667-3683
- [18] SNEKVIK K, HAALAND S, ØSTGAARD N, *et al.* Cluster observations of a field aligned current at the dawn flank of a bursty bulk flow[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, **25**(6): 1405-1415
- [19] SHI J K, CHENG Z W, ZHANG T L, *et al.* South-north asymmetry of field-aligned currents in the magnetotail observed by Cluster[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A7): A07228
- [20] CHENG Z W, SHI J K, DUNLOP M, *et al.* Influences of the interplanetary magnetic field clock angle and cone angle on the field-aligned currents in the magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(20): 5355-5359
- [21] CHENG Z W, SHI J K, ZHANG J C, *et al.* Influence of the IMF cone angle on invariant latitudes of polar region footprints of FACs in the magnetotail: Cluster observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 2588-2597
- [22] CHENG Z W, ZHANG J C, SHI J K, *et al.* The particle carriers of field-aligned currents in the Earth's magnetotail during a substorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(4): 3058-3068
- [23] SHI J K, ZHANG Z Y, TORKAR K, *et al.* Temporal and spatial scales of a high-flux electron disturbance in the cusp region: cluster observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4536-4543
- [24] SHI J K, ZHANG Z Y, TORKAR K, *et al.* South-north hemispheric asymmetry of the FAE distribution around the cusp region: Cluster observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(7): 5342-5352
- [25] WANG H, LÜHR H, MA S Y, *et al.* Field-aligned currents observed by CHAMP during the intense 2003 geomagnetic storm events[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, **24**(1): 311-324
- [26] IJIMA T, POTEIRA T A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A2): 599-615
- [27] FRANK L A, MCPHERRON R L, DECOSTER R J, *et al.* Field-aligned currents in the Earth's magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A2): 687-700

(责任编辑: 李莉)