0254-6124/2013/33(4)-396–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Cheng Zhengwei, Shi Jiankui, Zhang Ziying, Liu Zhenxing. Effect of Interplanetary Magnetic Field on the field-aligned currents occurrence in the magnetotail. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 396-402

行星际磁场对磁尾场向电流发生率的影响*

程征伟 史建魁 张子迎 刘振兴

(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 利用 Cluster 卫星的磁场和等离子体探测数据, 研究了行星际磁场 (IMF) 时钟角 (clock angle) Φ 和锥角 (cone angle) θ 对磁尾等离子体片边界层 (PSBL) 区场向电流发生率的影响. 当时钟角 $\Phi > 0$ 时, 磁尾场向电流的发生率较高, 这表明磁尾场向电流的发生与昏向太阳风条件更为密切; 当 $90^\circ < |\Phi| < 180^\circ$ 时, 场向电流的发生率较高, 这表明场向电流的发生与南向 IMF 更为密切. 当锥角 $\theta < 30^\circ$ 时 (即 IMF 与日地连线夹角较小时) 场向电流的发生率较低. 而当 $\theta > 30^\circ$ 时, 场向电流在 $90^\circ < |\Phi| < 180^\circ$ 的情况下发生率明显增大, 这说明南向 IMF 情况下, 场向电流发生率明显增大. 但是当 $|\Phi| < 90^\circ$ 时 (北向 IMF 情况下), 尽管 θ 很大, 场向电流的发生率并未明显增大. 当 $\theta > 70^\circ$ 时, 且在 $140^\circ < \Phi < 160^\circ$ 的行星际磁场条件下, 磁尾等离子体片边界层区场向电流的发生率最大.

关键词 场向电流, 等离子体片边界层, 行星际磁场, 时钟角, 锥角

中图分类号 P 353. 2

Effect of Interplanetary Magnetic Field on the Field-aligned Currents Occurrence in the Magnetotail

CHENG Zhengwei SHI Jiankui ZHANG Ziying LIU Zhenxing

(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Using the magnetic field and plasma data from Cluster spacecraft, the effect of Interplanetary Magnetic Field (IMF) clock angle Φ and cone angle θ on the Field-Aligned Currents (FAC) occurrence rate at the Plasma Sheet Boundary Layer (PSBL) in the magnetotail is investigated. There were more FAC cases occurred when IMF was within the $0^\circ < \Phi < 180^\circ$ clock angle range comparing with the range of $-180^\circ < \Phi < 0^\circ$. It indicated that FAC occurrences were associated with duskward IMF (IMF $B_y > 0$). Also, there were more FAC cases occurred when the IMF was within the $90^\circ < |\Phi| < 180^\circ$ clock angle range. It supported that FAC occurrences were associated with southward IMF (IMF $B_z < 0$). Most of the FAC cases occurred when IMF was within the $\theta > 30^\circ$ cone angle. In addition, a few of FAC cases occurred when the IMF clock angle was in the $\theta < 30^\circ$ range regardless of the value of Φ. The occurrence rate of FAC was the largest when $\theta > 30^\circ$

* 国家自然科学基金项目 (41274146, 41074114) 和国家重点实验室专项基金共同资助

2012-08-29 收到原稿, 2013-03-04 收到修定稿

E-mail: zwcheng@spaceweather.ac.cn

and $140° < \Phi < 160°$.

Key words Field-aligned currents, Plasma sheet boundary layers, Interplanetary magnetic field, Clock angle, Cone angle

0 引言

场向电流 (FACs) 也称 Birkeland 电流, 其对太阳风–磁层–电离层耦合系统是非常重要的. 在 20 世纪 60 年代中期 [1−2], 场向电流首次被卫星观测证实, 目前在地球空间的不同区域, 从距地面几百公里的电离层直至几十个地球半径的磁尾都观测到了它的存在. 场向电流对于太阳风能量和动量向磁层乃至电离层的传输起到了至关重要的作用, 是能量与动量传输的重要通道之一.

以往一些研究发现, 大尺度的场向电流会受到行星际磁场 (IMF) 的调控作用. 行星际磁场各分量的变化均对场向电流的特性 (例如发生率、空间分布、密度等)[3−6] 有明显的影响. 以往的研究大多是单独讨论行星际磁场某一分量 (例如行星际磁场 B_y 分量或 B_z 分量) 对场向电流的影响. 而场向电流的产生与变化是行星际磁场各分量共同作用的结果, 所以研究 IMF 时钟角 (clock angle) 和锥角 (cone angle) 对场向电流的影响, 可以更好地将行星际磁场各分量结合起来, 研究它们共同对场向电流的影响, 这是非常重要和必要的 [7].

已有研究证实, IMF 时钟角和锥角的变化对地球空间很多重要的物理过程具有影响. Le 等 [8] 发现通量传输事件 (FTEs) 与 IMF 时钟角的变化具有一定关系, 大多数事件发生在行星际磁场保持南向且时钟角波动小于 30° 的条件下. Kullen 等 [9] 发现 IMF 时钟角的变化对于极区产生不同种类的极光弧有着很强的影响. Grocott 等 [10] 研究发现, 约有 74% 的快速流发生在 IMF 时钟角 $30° < |\Phi| < 100°$ 的范围内. Le 和 Russell[11] 研究发现, IMF 锥角的大小决定于上行波的频率, 当 IMF 锥角增大时会降低上行波的频率. Chi 等 [12−13] 研究发现 IMF 锥角的变化对地磁脉动有明显的控制作用, 高频 (32∼64 mHz) 事件大多发生在 IMF 锥角较小的条件下, 而低频 (4∼8 mHz) 事件却恰恰相反, 其更多发生在 IMF 锥角较大的条件下.

实际上, 以上提到的有些物理过程与场向电流也存在或多或少的联系, 有研究表明某些与场向电流密切相关的物理现象与 IMF 时钟角的变化有很大关系. 例如 Hu 等 [14] 研究发现午后高纬极光强度随 IMF 时钟角的变化曲线呈一倒 V 结构. 然而有关场向电流与 IMF 时钟角或锥角关系的研究相对较少. Weimer 等 [7] 研究给出了高纬电离层中场向电流分布随 IMF 时钟角的变化关系, 结果显示高纬电离层场向电流的分布的确与 IMF 时钟角的变化密切相关. 而这一研究也仅仅是在电离层高度, 到目前为止, 还没有研究直接给出磁尾等离子体片边界层 (Plasma Sheet Boundary Layer, PSBL) 区场向电流的发生与 IMF 时钟角和锥角关系. 这主要是因为以往磁尾的探测大都为单卫星或双卫星探测, 通过单双卫星的探测数据无法计算得到足够多的场向电流事件进行统计研究, 而且只能估算电流密度, 存在较大的误差. 近年来已有一些论文利用 Cluster 四颗卫星的探测数据研究了磁尾区域的场向电流 [15−17]. 本文主要利用 Cluster 四颗卫星的探测数据, 通过计算磁场旋度来准确求得电流密度, 选取了大量的场向电流事件, 首次研究了 IMF 时钟角和锥角与磁尾等离子体片边界层区场向电流发生率之间的关系.

1 相关定义及场向电流的计算和事件选取

1.1 相关定义

IMF 时钟角和锥角数据取自 ACE 卫星的探测资料, 根据太阳风速度, 计算其到达地球磁层顶的时间延迟大约为 48∼76 min. 得到与场向电流事件相对应的 IMF 时钟角和锥角. 在本研究中对 IMF 时钟角 Φ 和锥角 θ 做如下定义:

$$\Phi = \begin{cases} \arctan(B_{sy}/B_{sz}), & (B_{sz} > 0); \\ (B_{sy}/|B_{sy}|) \times 90°, & (B_{sz} = 0); \\ \arctan(B_{sy}/B_{sz}) + 180°, & (B_{sz} < 0,\ B_{sy} \geqslant 0); \\ \arctan(B_{sy}/B_{sz}) - 180°, & (B_{sz} < 0,\ B_{sy} \leqslant 0); \end{cases} \tag{1}$$

$$\theta = \arccos(|B_{sx}|/B_{st}). \quad (2)$$

其中, B_{sx}, B_{sy} 和 B_{sz} 分别代表行星际磁场三分量, B_{st} 为总磁场强度.

图 1 给出的是 IMF 时钟角示意. $\Phi = 0°$ 表示 $+z$ 方向 (纯北向), $\Phi = \pm 90°$ 分别表示 $\pm y$ 方向 (纯昏向/晨向), $\Phi = \pm 180°$ 表示 $-z$ 方向 (纯南向).

θ 表示行星际磁场与日地连线之间的夹角, $\theta = 0°$ 表示行星际磁场沿日地连线方向, $\theta = 90°$ 表示 IMF 方向与日地连线垂直.

研究行星际磁场对某一物理过程的影响时, 通常会把 IMF 时钟角和锥角结合起来考虑, 因为当 IMF 锥角很小时, 无论 IMF 时钟角如何变化, 其方向基本上沿着日地连线. 但是, 当 IMF 锥角逐渐变大时, 其对于决定 IMF 方向的作用也就越来越大.

1.2 探测数据

研究使用的数据包括 Cluster 卫星和 ACE 卫星的探测数据. 其中, Cluster 卫星的探测数据包括 GSM 坐标系下分辨率为 4 s 的磁场数据、电子数据和高能离子数据. Cluster 卫星的远地点是 19.6 R_e, 轨道周期为 57 h, 在每年的 7—11 月会穿越磁尾等离子体片. 根据其轨道周期, Cluster 每年有 60 天左右穿越磁尾等离子体片. ACE 卫星提供了分辨率为 1 min 的 IMF 时钟角和锥角数据. 本文选取 2001 年和 2004 年 7—10 月的数据, 主要是因为 2001 年和 2004 年 Cluster 卫星穿越磁尾等离子体片边界层区时, 四颗卫星相互间的距离分别为 2000 km 和 1000 km 左右, 相对于磁尾等离子体片边界层区场向电流的空间尺度而言, 更有利于探测其特性.

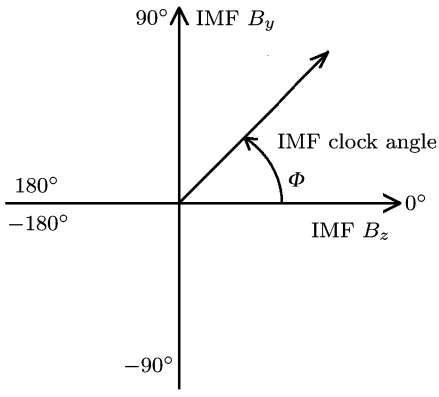


图 1 IMF 时钟角

Fig. 1 IMF clock angle

1.3 场向电流密度计算

Cluster 四颗卫星形成了空间四点的立体探测, 根据四点的磁场探测数据, 由 Curlometer 方法 [18] 可以直接计算磁场的旋度, 进而通过安培定律得到电流密度.

磁场的旋度表达式为

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \sum_{\alpha=1}^{4} \boldsymbol{k}_\alpha \times \boldsymbol{B}_\alpha. \quad (3)$$

这里, $\boldsymbol{k}_\alpha$ 为矢量系数, 由下式计算:

$$\boldsymbol{k}_\alpha = \frac{\boldsymbol{r}_{\beta\gamma} \times \boldsymbol{r}_{\beta\lambda}}{\boldsymbol{r}_{\beta\alpha} \cdot (\boldsymbol{r}_{\beta\gamma} \times \boldsymbol{r}_{\beta\lambda})}. \quad (4)$$

$\boldsymbol{r}_{\beta\gamma}$ 为任意两颗卫星之间的距离, $\boldsymbol{r}_{\beta\gamma} = \boldsymbol{r}_\gamma - \boldsymbol{r}_\beta$, $\alpha, \beta, \gamma, \lambda (= 1, 2, 3, 4)$. 例如 $\alpha = 4$ 时,

$$\boldsymbol{k}_4 = \frac{\boldsymbol{r}_{12} \times \boldsymbol{r}_{13}}{\boldsymbol{r}_{14} \cdot (\boldsymbol{r}_{12} \times \boldsymbol{r}_{13})}.$$

由安培定理进一步可以得到如下电流表达式:

$$\boldsymbol{J} = \frac{\nabla \times \boldsymbol{B}}{\mu_0}. \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{J}$ 为电流, μ_0 为常数. 将计算得到的电流投影到磁场方向上, 即可得到场向电流密度.

由于四颗卫星空间位形和磁场结构对计算电流会有很大影响, 所以必须考虑卫星的探测数据质量. 根据文献 [19], 可以计算代表卫星数据质量的 Q 值, 有

$$Q = |\nabla \cdot \boldsymbol{B}|/|\nabla \times \boldsymbol{B}|. \quad (6)$$

可以看出, Q 值越小, 探测数据质量越高, 反之探测数据质量越低. 对于空间电流计算的误差和数据质量, 文献 [19–20] 中曾有过研究. 2001 年和 2004 年 Cluster 四颗卫星之间的间距分别为 2000 km 和 1000 km 左右, 且由于我们所研究的区域位于磁尾, 磁场的特征尺度较大, 因此本文采用 $Q < 0.3$ 作为数据质量标准, 这样可以保证计算误差较小.

1.4 场向电流事件选取

首先要确定场向电流事件位于等离子体片边界层区, 其判别一般有两种方法. 一种是根据磁场判断, 通过规定磁场 B_x, B_y, B_{xy} 等磁场分量的数值来确定等离子体片边界层区 [21−22]. 这种方法可以基本确定 PSBL 区域, 但是在地磁活动比较强烈, 磁场扰动剧烈时判断起来相对困难, 准确性也相对较差. 另

一种是根据卫星的离子和磁场探测数据来计算等离子体热压与磁压的比值 β, 再根据 β 值对等离子体片边界层区进行判定. 其具体方法是, 当 $\beta > 1$ 时为等离子体片区, 当 $0.01 \leqslant \beta \leqslant 1$ 时为等离子体片边界层区, 当 $\beta < 0.01$ 时为等离子体瓣区 [23].

这里主要根据 β 值来确定等离子体片边界层区的位置. 但如果 Cluster 的电子或高能离子数据缺失或者不全, 则根据磁场数据进行判断. 另外, 本文对场向电流密度及两事件的时间间隔也做了相应规定, 即场向电流密度 $|\boldsymbol{j}_{\rm FAC}| > 2.38\,{\rm nA\cdot m^{-2}}$, 两个独立的场向电流事件的间隔时间 $\Delta t > 5\,{\rm min}$. 图 1 给出的是根据 β 值、磁场、电流密度和间隔时间选取场向电流事件的一个例子.

在图 2 中, A, B, C, D 和 E 均位于等离子体片边界层区, 因为都满足 $0.01 \leqslant \beta \leqslant 1$ 的条件, 而且从磁场三分量来看, B_x 分量占主导, B_y 和 B_z 相对较小, 均满足等离子体片边界层区的磁场条件. A 的密度为 $3.92\,{\rm nA\cdot m^{-2}}$ (地向), E 的密度为 $-4.75\,{\rm nA\cdot m^{-2}}$ (尾向) 均满足 $|\boldsymbol{j}_{\rm FAC}| > 2.38\,{\rm nA\cdot m^{-2}}$ 的条件. 在 A 与 E 之间, 电流密度虽然有一些较大的扰动 (如 B, C 和 D), 但其最大值都不超过 $2.38\,{\rm nA\cdot m^{-2}}$, 所以不选取作为场向电流事件. A 与 E 的时间间隔超过了 15 min. 所以 A 和 E 满足所有条件, 选取其作为等离子体片边界层区场向电流事件. 依据上述方法, 共选取了 1839 个磁尾等离子体片边界层区场向电流事件进行研究.

2 结果分析与讨论

图 3 给出的是 1839 个磁尾等离子体片边界层区场向电流事件的发生数目随 IMF 时钟角和锥角的分布. 图 3 显示, 绝大部分场向电流事件发生在 $\theta > 30°$ 的条件下, 当 θ 较小 ($\theta < 30°$) 时, 无论 IMF 时钟角如何变化, 场向电流的数目都较少. 这主要是由于, 当 IMF 锥角较小时, 其方向主要是沿日地连线方向, 此时 IMFB_y 和 IMFB_z 的变化对行星际磁场方向的影响很小. 图 3 还显示, 场向电流在 $0° < \Phi < 180°$ 范围内的数目明显多于在 $-180° < \Phi < 0°$ 范围内

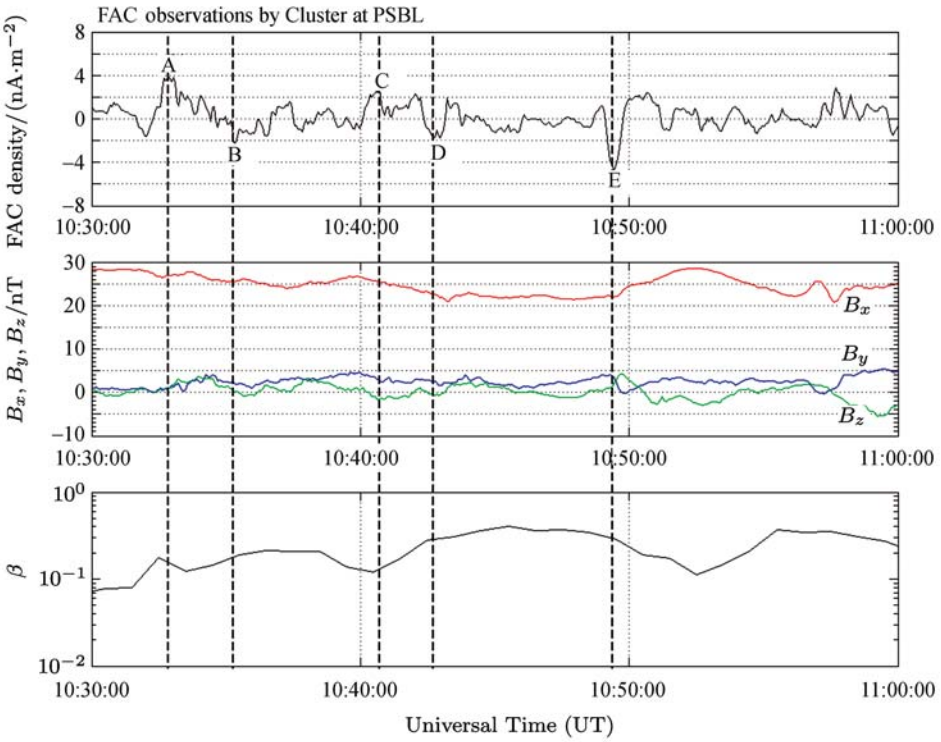


图 2 磁尾等离子体片边界层区场向电流事件的选取

Fig. 2 An example of selection of the FAC cases at the PSBL in magnetotail

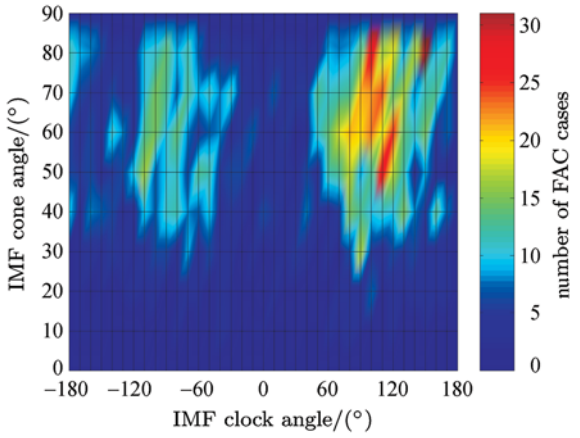


图 3 1839 个磁尾 PSBL 场向电流事件的发生数目随 IMF 时钟角和锥角的分布

Fig. 3 IMF clock angle with IMF cone angle for number of FAC cases at the PSBL

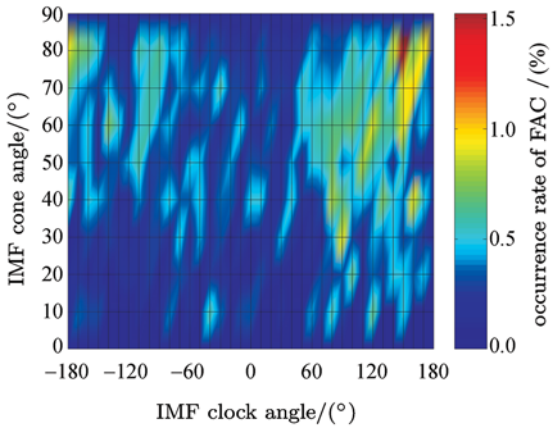


图 4 磁尾 PSBL 场向电流事件的发生率随 IMF 时钟角和锥角的分布

Fig. 4 IMF clock angle with IMF cone angle for occurrence of FAC cases at the PSBL

的数目, 在 $90° < |\Phi| < 180°$ 范围内的数目明显多于 $|\Phi| < 90°$ 范围内的数目, 这表明场向电流的发生数目在昏向 IMF 或南向 IMF 条件下更多. 有研究表明, 内磁层场向电流的发生数目在 IMF 南向条件下更多 [24], 本研究在磁尾也得到了同样的结果.

场向电流的发生数目虽然与 IMF 时钟角和锥角存在明显的关系, 但由于在选取场向电流事件期间 (2001 年和 2004 年 7—10 月), IMF 时钟角和锥角自身的持续时间也存在一个分布, 某些行星际条件下场向电流事件的发生数目多, 可能是由于该条件持续时间相对较长造成的. 所以, 我们进一步研究了场向电流的发生率与 IMF 时钟角和锥角的关系.

首先对 IMF 时钟角和锥角自身持续时间进行统计, 发现 IMF 时钟角和锥角的持续时间有两个十分明显的高值区域, 分别位于 $\Phi = \pm 90°$ 附近. 从 θ 角度看, 分别在 $\theta = 80°$ 和 $\theta = 50°$ 附近. 其分布与场向电流事件数目的分布存在明显差异. 计算场向电流的发生率, 即某一行星际磁场条件下场向电流的发生数目与该行星际磁场取值区间持续时间的比值, 得到了其在 IMF 时钟角和锥角下的分布 (见图 4).

图 4 显示了磁尾场向电流的发生率在 $0° < \Phi < 180°$ 的范围比在 $-180° < \Phi < 0°$ 的范围内更高, 这一结果表明, 磁尾场向电流的发生率在 IMF 昏向和晨向条件下存在明显的差异, 场向电流更易发生在 IMF 昏向条件. 同时, 研究也显示场向电流的发生率在 $90° < |\Phi| < 180°$ 的范围内更高, 这也是首次利用磁尾的观测结果, 支持了大尺度场向电流的发生与南向 IMF 更为密切的观点.

图 4 还显示, 场向电流的发生率在 IMF 锥角 $\theta < 30°$ 的范围内 (无论 Φ 的取值如何) 普遍较低, 且无明显的分布差异, 这主要是由于当 IMF 主要沿日地方向连线时, 行星际磁场对地球磁场位形的影响相对较小, 从而引起磁层磁场 y 方向上的扰动相对较小, 于是场向电流事件的发生率很低. 另外, 图 4 给出了磁尾等离子体片边界层区场向电流发生率最大的行星际磁场条件, 即 $\theta > 70°$, 且 $140° < \Phi < 160°$. 可以看到场向电流发生率最高时, IMF 锥角很大 ($\theta > 70°$), 此时 IMF 的方向主要由其时钟角 ($140° < \Phi < 160°$) 决定, IMF 具有南向和昏向分量.

本文研究结果表明, 在 IMF 昏向条件下, 磁尾等离子体片边界层区场向电流事件的发生率较大. Taguchi[25] 在研究夜侧低高度极光椭圆带附近的场向电流时, 选取的场向电流事件也是在昏向行星际磁场条件下更多. 通常认为, 磁尾等离子体片边界层区场向电流与极区低高度的场向电流是相连的. 由此可看出, 本文结果与以往低高度场向电流研究结果具有很好的一致性. Russell 等 [26−28] 研究显示, 昏向和晨向行星际磁场条件对磁尾磁场产生的扰动会有明显不同, 因此, 磁尾的越尾电流片磁场结构会受到行星际磁场晨昏分量的控制而存在明显的不对称性, 昏向

行星际磁场条件引起的磁场扰动更大. 本文所研究的场向电流位于磁尾等离子体片边界层区, 场向电流片的磁场结构同样会受到行星际磁场晨昏分量的控制, 由于昏向行星际磁场条件下磁场的扰动更大, 因此会出现更多的场向电流事件.

通常认为, 场向电流的发生率受行星际磁场的影响是一个十分复杂的过程, 尤其对于磁尾区域, 场向电流的发生率不可能只与 IMF 某一分量相关. 本文从 IMF 时钟角和锥角的角度, 研究了不同行星际磁场条件下场向电流的发生率, 其结果对了解场向电流发生率的控制因素有一定帮助.

3 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的发生率随 IMF 时钟角和锥角变化的分布规律. 通过对 1839 个场向电流事件的统计发现, 场向电流发生率与 IMF 方向具有明显关系.

(1) 场向电流的发生率在 $0^\circ < \Phi < 180^\circ$ 的范围内更高 (与其在 $-180^\circ < \Phi < 0^\circ$ 范围内的发生率比较), 这表明场向电流更易发生在 IMF 昏向条件.

(2) 场向电流的发生率在 $90^\circ < |\Phi| < 180^\circ$ 的范围内更高 (与其在 $|\Phi| < 90^\circ$ 范围内的发生率比较), 这表明场向电流更易发生在 IMF 南向条件下.

(3) 场向电流的发生率在 IMF 锥角 $\theta < 30^\circ$ 的范围内 (无论 Φ 的取值) 都较低, 且无明显的分布差异. 而在 $\theta > 30^\circ$ 的范围内, 场向电流在 $90^\circ < |\Phi| < 180^\circ$ 的情况下发生率明显增大, 但是当 $|\Phi| < 90^\circ$ 时, 尽管 θ 很大, 场向电流的发生率并未明显增大. 这表明场向电流的发生率与 IMF 锥角也具有重要的关系.

(4) 在 $\theta > 70^\circ$ 且 $140^\circ < \Phi < 160^\circ$ 的行星际磁场条件下, 场向电流的发生率最大.

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]. *J. Geophys. Res.*, 1966, **66**:5033-5045

[2] Cummings W D, Dessler A J. Field-aligned currents in the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**:1007-1013

[3] Yamauchi M, Araki T. The interplanetary magnetic field by-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:2684-2690

[4] Zhou X W, Russell C T, Le G. Local time interplanetary magnetic field by dependence of field-aligned currents at high altitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:2533-2539

[5] Iijima T, Shibaji T. Global characteristics of northward IMF associated (NBZ) field-aligned currents [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:2408-2424

[6] Erlandson R E, Zanetti L J, Potemra T A, *et al.* IMF B_y dependence of region 1 Birkeland currents near noon [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:9804-9814

[7] Weimer D R. Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived from Dynamics Explorer 2 data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:12 889-12 902

[8] Le G, Russell C T, Kuo H. Flux transfer events: Spontaneous or driven [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**:791-794

[9] Kullen A, Brittnacher M, Cumnock J A, *et al.* Solar wind dependence of the occurrence and motion of polar auroral arcs: A statistical study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11), 1362, doi:10.1029/2002JA009245

[10] Grocott A, Milan S E, Yeoman T K. Interplanetary magnetic field control of fast azimuthal flows in the nightside high-latitude ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**, L08102, doi:10.1029/2008GL033545

[11] Le G, Russell C T. Solar wind control of upstream wave frequency [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:2571-2575

[12] Chi P J, Russell C T, Bloom R M, *et al.* Solar wind control of ultralow-frequency wave activity at $L = 3$ [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A12):29 467-29 477

[13] Chi P J, Russell C T, Le G. Pc 3 and Pc 4 activity during a long period of low interplanetary magnetic field cone angle as detected across the Institute of Geological Sciences array [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:11 127-11 139

[14] Hu Hongqiao, Liu Ruiyuan, Yang Huigen, *et al.* Dependence of the postnoon auroral intensity upon the IMF [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2002, **45**(4):445-452. In Chinese (胡红桥, 刘瑞源, 杨慧根, 等. 午后极光强度与行星际磁场的相关 [J]. 地球物理学报, 2002, **45**(4):445-452)

[15] Shi J K, Cheng Z W, Zhang T L, *et al.* Properties of field-aligned current in plasma sheet boundary layers in magnetotail: Cluster observation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(2):029401

[16] Cheng Z W, Shi J K, Zhang T L, *et al.* The relations between density of FACs in the plasma sheet boundary layers and Kp index [J]. *Sci. Chin. Tech. Sci.*, 2011, **54**:2987-2992, doi: 10.1007/s11431-011-4545-3

[17] Cheng Z W, Shi J K, Zhang T L, *et al.* Field-aligned currents at the PSBL on 17 August 2001 storm: Relationships with solar wind conditions [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(9):099401

[18] Dunlop M W, Balogh A, lassmeier K H. Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: The Cur-

lometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11):1384-1397

[19] Robert P, Dunlop M W. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data [M]. Netherlands: ESA Publications Division, 1998. 395-418

[20] Xiao Chijie, Pu Zuyin, Huang Zongying, *et al.* Multiple flux rope events at the high latitude magnetopause on January 26, 2001: Current density calculating [J]. *Chin. J. Geophys.* 2004, **47**(4):555-561. In Chinese (肖池阶, 濮祖荫, 黄宗英, 等. 2001 年 1 月 26 日磁层顶多重磁通量管事件的观测研究—空间电流密度计算及分析 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(4):555-561)

[21] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:9709-9720

[22] 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]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A07228, doi:10.1029/2009JA014446

[23] Ueno G, Ohtani S, Saito Y, *et al.* Field-aligned currents in the outermost plasma sheet boundary layer with Geotail observation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:1399-1408

[24] Jiao Weixin, Pu Zuyin. Dependence of field-aligned currents on the orientation of the interplanetary magnetic field [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):144-149. In Chinese (焦维新, 濮祖荫. 大尺度场向电流的控制因素 [J]. 空间科学学报, 2000, **20**(2):144-149)

[25] Taguchi S. By-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A8):12 231-12 243

[26] Russell C T. The configuration of the magnetosphere [C]// Critical Problems of Magnetospheric Physics. Madrid: IUCSTP, Nat Acad, 1972. 116

[27] Kaymaz Z, Siscoe G L, Luhmann J G, *et al.* Interplanetary magnetic field control of magnetotail magnetic field geometry: IMP 8 observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 11 113-11 126

[28] Yan G Q, Shen C, Liu Z X, *et al.* A statistical study on the correlations between plasma sheet and solar wind based on DSP explorations [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **90**:2961-2966