科学通报 2010 年 第 55 卷 第 9 期: 820 ~ 826
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于 Cluster 观测对地球磁尾电流片磁场分布的初步统计分析

戎昭金[①②], 沈超[①], LUCEK E[③], BALOGH A[④], 姚丽[①②]

① 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;
② 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049;
③ Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, SW7 2AZ, UK;
④ Imperial College, London, SW7 2AZ, UK
E-mail: zjrong@spaceweather.ac.cn

2009-07-03 收稿, 2009-09-28 接受
国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(批准号: 40621003)、国家自然科学基金(批准号: 40674094)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806305)、中国科学院"百人计划"和国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 利用 Cluster 在 2001~2005 年期间每年 6~11 月 4 s 精度的磁场数据对磁尾电流片的磁场分布特性进行了统计分析. 结果表明, 电流片中心处磁场及其 B_z 分量的强度在磁尾午夜区通常较弱, 而在磁层晨、昏两侧处普遍较强, 这表明午夜区的电流片较薄, 而在晨、昏两侧的电流片较厚. 在晨昏两侧处, 电流片拍动剧烈, 尤以晨侧最甚, 而午夜区的电流片拍动最弱. 在磁地方时 21:00~01:00 范围内, 负 B_z 及扁平电流片出现的几率较大, 磁重联或电流中断等活动比较容易发生. 磁尾电流片中 B_y 分量和磁力线倾斜角的频次分布都近似满足正态分布, 扁平电流片的出现几率约是标准电流片的 1/3; 而磁场强度 $B_{\min}$ 和 B_z 分量则主要分布在 1~10 nT 范围内. 电流片中 B_y 分量的强度近似为 1 AU 处行星际磁场 B_y 分量的两倍, 二者的相关系数以扁平电流片尤其高, 这表明电流片中 B_y 的大小和符号易受行星际 B_y 等外部因素的影响.

关键词
磁层
磁场
磁尾电流片
中性片
晨昏不对称性

越来越多的分析研究表明, 磁尾电流片[1]是磁尾磁场反向的一个薄片区域, 相比尾瓣区, 该处的磁场强度较弱, 电流密度较强, 等离子体密度和温度都较高[2], 比较容易触发磁重联或等离子体不稳定性, 其与地球磁层亚暴活动等现象有着密切的物理联系[3]. 所以磁尾电流片始终是地球磁层空间研究的一个热点区域.

虽然多年来通过单点卫星的观测已使得人们对于磁尾电流片的形态分布[4,5]、等离子体的分布[2,6]、磁场分布[7]以及对行星际条件的响应[8,9]等特性有了一定的了解, 但是由于单点卫星的探测无法区分磁场的时空变化, 这使得人们无法深入认识磁尾的磁场三维结构及其相应物理量的分布特性. 为深入探测地球磁层空间的物理特性, 欧洲太空局(ESA)于 2000 年 7 月 16 日开始了 Cluster 卫星簇探测计划[10], 其中一个重要的科学目标就是探测地球近地磁尾动力学过程. Cluster 的轨道倾角约为 90°, 一般在每年 6 月底到 11 月初在背阳面远地点附近(15~19 R_E)由北半球穿越磁尾电流片进入南半球, 并在晨昏方向上"扫过"整个磁尾电流片. 这为统计研究磁尾电流片物理量的整体分布提供了有利条件.

近年来 Cluster 对磁尾磁场结构的四点同步探测

英文版见: Rong Z J, Shen C, Lucek E, et al. Statistical survey on the magnetic field in magnetotail current sheets: Cluster observations. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0096-4

表明, 磁尾电流片大体可分为标准电流片[11]、扁平电流片[12]以及倾斜电流片[13,14]3 种类型. 对于标准电流片而言, 电流片法向基本沿南北方向, 磁场 B_y 分量远小于 B_z 分量; 扁平电流片则含有较强的 B_y 分量, 磁力线呈螺旋结构; 而倾斜电流片的法向明显偏离南北方向, 一般为电流片拍动所致[13~18].

虽已有人对磁尾电流片做了大量的相关统计工作[2,4,6,7,9,19], 但随着 Cluster 对磁尾电流片的深入观测, 电流片磁场结构的特性和分布规律不断被发现, 所以结合电流片磁场结构的特性, 利用 Cluster 磁场探测数据对近地磁尾电流片中的磁场分布做统计研究是很有必要的.

为简化研究工作, 结合在 1 AU 处的行星际磁场(IMF)数据(经过适当时间平移后的 ACE level 2 磁场数据[20], 精度为 1 min), 本文利用单颗卫星 Cluster-3(Samba)在 2001~2005 年期间 4 s 精度的磁场数据[21]对磁尾电流片中的磁场分布进行了初步的统计分析. 这有助于从整体上把握近地电流片大尺度的背景磁场分布特性和规律.

1 数据和方法

为准确确定磁尾电流片的位置, 首先利用标准 $B_x(t_i)B_x(t_i+1)<0$ (t_i, t_i+1 为卫星连续两次测量的时间)以及较低的磁场强度($B<80$ nT)来确定电流片的中心[19]. 根据这个标准, 可以首先将南北极尖区处 B_x 反向的区域以及向阳面中性片 B_x 反向的区域排除掉, 因为这些区域磁场强度普遍高达几百 nT; 其次可以更方便地统计卫星穿越磁尾电流片的次数. 然后在 Cluster 位于磁尾侧翼(flanks)附近区域时(在每年 6 月至 7 月初, 10 月底至 11 月), 通过观测排除掉那些伴随有低温度、高密度及等离子体尾向流的穿越, 因为其很可能穿越的就是磁鞘[22]或低纬边界层[23]区域. 规定 $B_x(t_i)$与 $B_x(t_i+1)$之中强度小者及其对应的 B_y, B_z 分量为电流片中心处的磁场分量.

本文采用 GSM 直角坐标系, 并在其相应参照系下定义了球坐标系. 球坐标系下矢量方向的极角定义为该矢量方向与正 z 方向之间的夹角. 从北半球朝 xy 平面看, 其方位角则定义为该矢量在 xy 平面上的投影与正 x 方向之间的夹角, 并且以逆时针的方向增加. 譬如, 对于昏侧(正 y 方向)指向, 其极角为 90°, 方位角为 90°; 而对于晨侧(负 y 方向)指向, 其极角为 90°, 方位角为 270°. 所以电流片在方位方向上, 其尺度范围可估计为 120°~240°.

在本文方位方向上物理量统计分布的直方图中, 方位角的步长皆取为 10°.

2 统计结果

这 5 年共计得到了 12368 次穿越电流片事件, 其中 2001 年是 2505 次, 2002 年是 2528 次, 2003 年是 3214 次, 2004 年是 2439 次, 而 2005 年是 1682 次.

2.1 电流片的空间形态

图 1 分别在 xy 平面和 yz 平面上给出了 Cluster 观测到的电流片中心位置的空间分布. 从图 1 可以看到, Cluster 在午夜侧 x 方向上探测到电流片的范围是−15~−20 R_E, 而在 y 方向上电流片的尺度约为 30 R_E. 探测得到的电流片的空间结构类似横写的“Z”形态, 其在晨侧(6~7 月)向下弯曲而在昏侧(10~11 月)则向上弯曲. 这与 Petrukovich 等人[19]的观测结果是一致的, 并且如其所言, 这是由于电流片本身就具有空间变化结构, 而且其空间结构还受 IMF 条件和偶极倾角的影响[5], 所以将 Cluster 在不同时刻探测到的电流片位置迭加起来自然就会呈现横写的“Z”形态, 实际上这与磁尾电流片形态分布的经验模式[5]是一致的. 探讨电流片的空间形态分布并不是本文的主要目的, 这里不打算深入研究.

2.2 电流片的穿越分布

大量研究表明, 磁尾电流片并不是简单的光滑曲面结构, 电流片不仅能出现上下摆动, 并且还能在晨昏方向上形成拍动波, 从午夜区向晨昏两侧传播[13~18]. 这会造成卫星多次穿越电流片的现象. 拍动的振幅越大或频率越高, 那么卫星在其轨道内穿越电流片的次数就会越多. 所以从某种程度而言, 在某方位角范围内, 卫星穿越电流片的次数可以近似反映在该范围内电流片拍动的剧烈程度. 图 2 给出了在方位方向上电流片穿越次数的直方图.

由图 2 可知, 晨侧处的电流片穿越次数最多, 昏侧处次之, 而在午夜附近穿越次数最少. 这说明晨昏两侧翼处的电流片拍动比较剧烈, 尤以晨侧处最甚, 而在午夜区的电流片相对较稳定, 拍动最弱. 考虑到电流片拍动波是从午夜区激发而向晨昏方向传播[13~18], 可推测拍动波在向晨昏方向传播的过程中, 波幅可能出现了增长或频率出现了增加. 由于晨侧

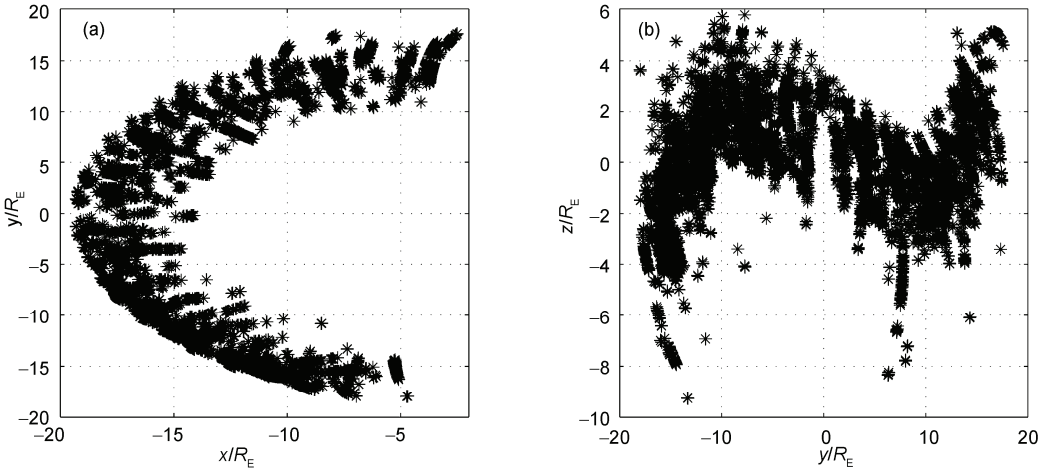


图 1 磁尾电流片的空间位置

(a)和(b)分别为其在 *xy* 平面和 *yz* 平面上的投影

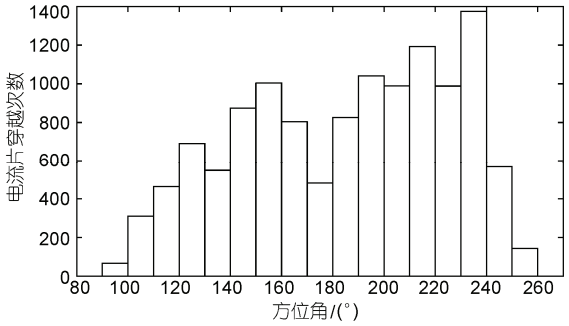


图 2 在方位方向上电流片穿越次数的直方图

处电流片拍动最为剧烈, 因此一般在晨侧处比较容易观测到电流片的拍动现象, 这也与 Shen 等人[14]的结论是一致的.

2.3 中心电流片磁场的分布

下面我们将考察电流片中心处磁场分布的总体特性.

图 3(a)~(c)给出了电流片中心处的磁场强度的大小 $B_{\min}$ 及其对应的 B_y, B_z 分量的频次统计分布, 图 3(d)和(e)相应给出了 B_z 和 $B_{\min}$ 在方位方向上的平均分布. 其中 $B_{\min}=(B_y^2+B_z^2)^{1/2}$.

由图 3 可以看到, B_y 的频次分布近似满足正态分布(实线为拟和正态分布曲线, 在置信水平 95%的条件下, 拟和分布的数学期望为–0.62 nT, 方差为 5.68 nT), 而 B_z 和 $B_{\min}$ 则一般小于 20 nT, 主要分布在 1~10 nT 之间. 一般在午夜区电流片中心处 B_z 为~5 nT, $B_{\min}$ 为~7 nT, 在晨昏两侧翼处, B_z 和 $B_{\min}$ 的强度都逐渐增强, 分别达到~9 和~11 nT, 这与 Petrukovich 等人[19]得到的结果是一致的(见其文中图 5). 这说明电流片在午夜区较薄, 而在晨昏两侧翼处则相对较厚, 与 Kaufman 等人[24]的结论相符. 此外在晨侧处的 B_z 要比相应昏侧处的 B_z 强些, 这说明相比在晨侧处而言, 昏侧处的电流片相对较薄, 磁场拉伸较为明显.

在电流片中 B_z 一般都是正值, 但是由于在电流片中可能发生磁场重联、电流中断或者磁场湍动等(尤其是在亚暴活动过程中), 经常也能观测到 B_z 为负值[25]的情况. 所以从某种程度上而言, 负值 B_z 的区域分布实际上就反映了电流片活动区域的分布. 图 4 给出了电流片中负 B_z 出现的几率在方位方向上的分布.

由图 4 可知, 在方位角 140°~190°也就是磁地方时 21:00~01:00 范围内, 负 B_z 出现的几率较高. 这个范围同磁尾薄电流片的主要分布区域是一致的. 如果我们认为电流片中心处的负 B_z 信号仅由磁重联过程产生, 那么可以推测磁重联在磁地方时 21:00~01:00 范围内的薄电流片中相对容易发生.

2.4 扁平电流片的分布

在磁尾电流片中, B_z 一般要比 B_y 强很多, 磁场方向基本沿 *z* 轴, 磁力线所在密切平面基本垂直于电流片平面[11]. 但有时 B_y 会变得很强, 使得磁场方向偏离 *z* 轴, 磁力线成为螺旋结构, 被“压扁”躺在电流片平面内[12]. 为描述磁力线在电流片中被“压扁” 的程

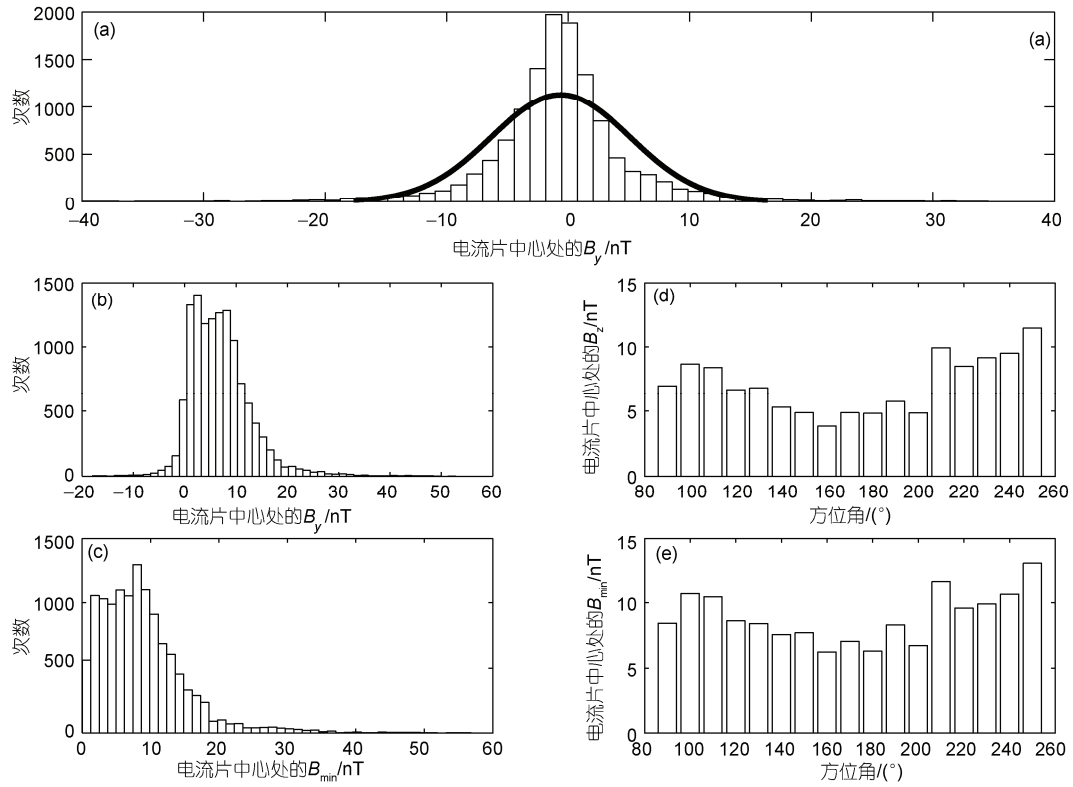


图 3　电流片中心处的 B_y, B_z 分量及磁场强度 B_{min} 的频次统计分布以及 B_z 和 B_{min} 在方位方向上的平均分布

(a)~(c)分别为电流片中心处的 B_y, B_z 分量及磁场强度 B_{min} 的频次统计分布; (d)和(e)分别为 B_z 和 B_{min} 在方位方向上的平均分布

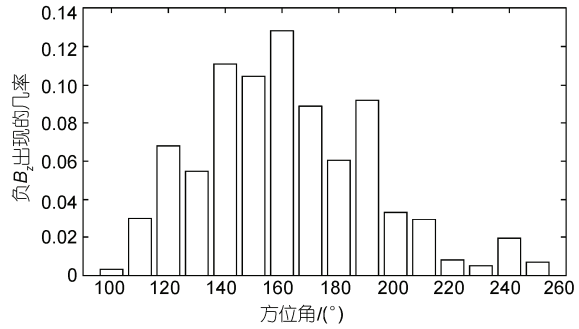


图 4　电流片中心处负 B_z 出现的几率在方位方向上的分布

度,可定义磁力线倾斜角 $\alpha=\tan^{-1}(B_y/|B_z|)$. 正的 α 代表磁力线为左旋结构, 其磁力线所在密切平面的副法线方向指向南向, 而负的 α 则代表磁力线为右旋结构, 其副法线方向指向北向. $|\alpha|$ 越大, 表明磁场方向愈加偏离 z 轴, 而磁力线愈加“躺”在电流片平面内. 为便于分析, 本文规定当倾斜角的大小 $|\alpha|<45°$ 时, 电流片称为标准电流片[11]; 当 $|\alpha|\geqslant 45°$ 时, 电流片称为扁平电流片[12]. 统计结果得到 9238 次标准电流片穿越和 3130 次扁平电流片穿越, 这说明扁平电流片的出现几率是标准电流片的 1/3. 图 5(a)给出了电流片中心处磁力线倾斜角的频次分布, 图 5(b)给出了扁平电流片($|\alpha|\geqslant 45°$)在方位方向上的几率分布.

由图 5(a)可知, 电流片中心处磁力线倾斜角的频次分布也如 B_y 一样是接近正态分布的(在置信水平 95% 的条件下, 拟和正态分布的数学期望为–3.8°, 方差为 37.8°). 而根据图 5(b)扁平电流片在方位方向上出现的几率分布可知, 在方位角 140°~200°也就是磁地方时 21:00~01:00 范围内, 扁平电流片比较容易出现. 这也与负 B_z 出现的主要区域范围是一致的.

2.5　电流片 B_y 与 IMF B_y 的统计关系

大量统计研究表明, 磁尾电流片中的 B_y 分量与行星际磁场(IMF)的 B_y 分量具有较好的相关性[9,12,26,27]. 为深入分析不同类型电流片中 B_y 与 IMF B_y 的相关性, 图 6 分别给出了总的电流片、标准电流片以及扁平电流片中 B_y 分量与 IMF B_y 的统计关系.

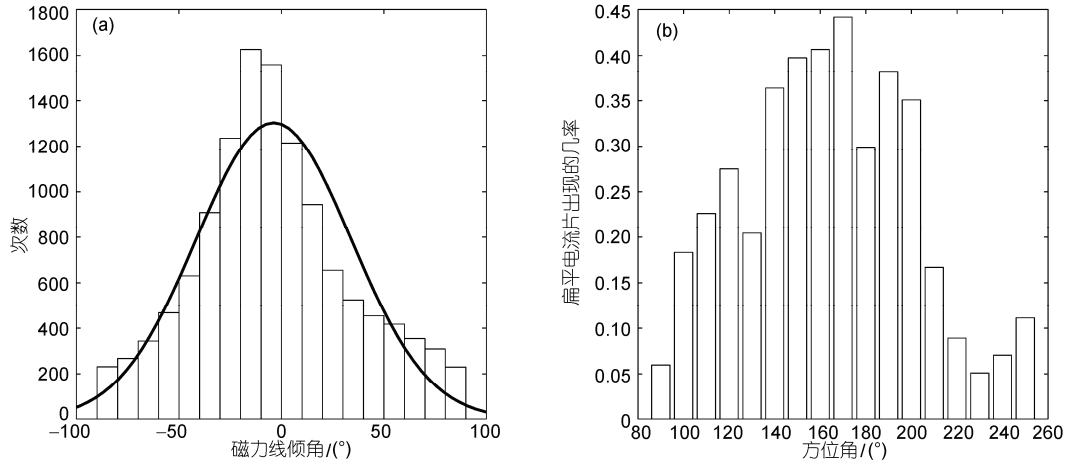


图 5　电流片中心处磁力线倾斜角的频次统计分布以及扁平电流片在方位方向上的几率分布

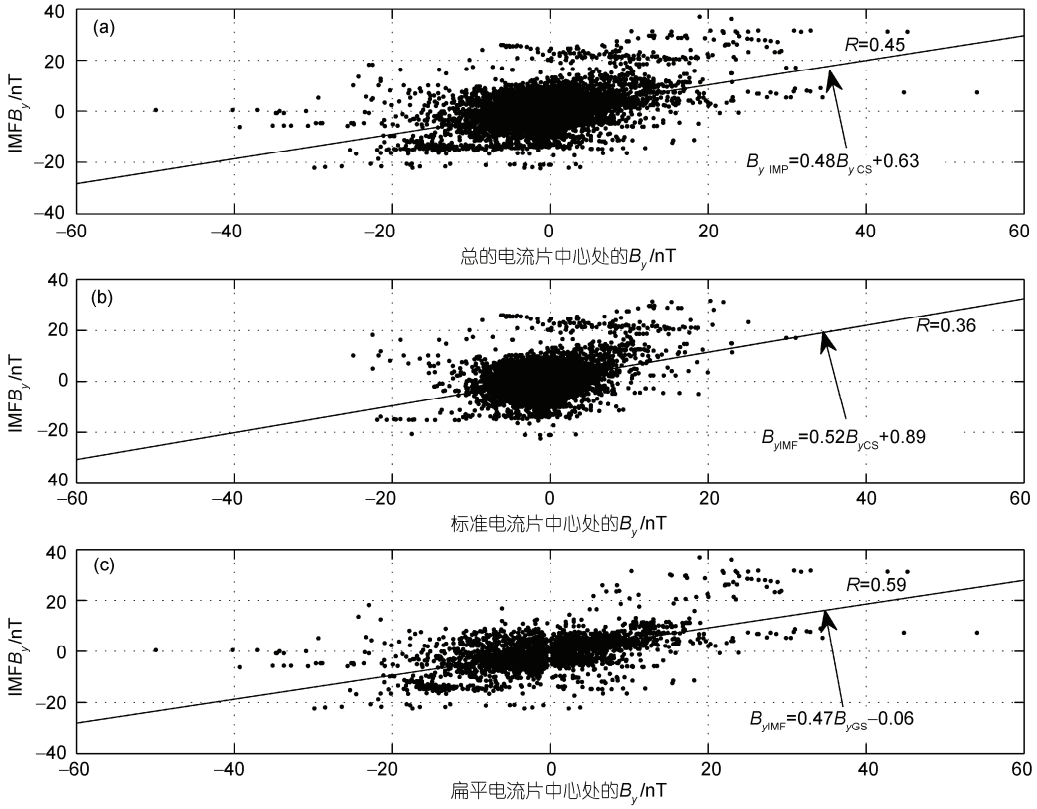


图 6　总的电流片、标准电流片以及扁平电流片的 B_y 分量与行星际磁场 B_y 分量的统计关系

(a) 总的电流片中心处的 B_y 分量与行星际磁场 B_y 分量的统计关系; (b) 标准电流片中心处的 B_y 分量与行星际磁场 B_y 分量的统计关系; (c) 扁平电流片中心处的 B_y 分量与行星际磁场 B_y 分量的统计关系

由图 6 可以看到, 总的来说, 电流片中心处 B_y 分量的强度是 IMF B_y 分量的两倍. 但是在标准电流片中心处的 B_y 分量与 IMF B_y 分量的相关性并不高(相关系数 R 仅为 0.36). 而对于扁平电流片而言, 电流片中心处的 B_y 分量与 IMF B_y 分量相关性较高(相关系数 R=0.59). 这说明扁平电流片中的 B_y 很可能来

源于 IMF B_y 分量, 并且其强度得到了放大. 但其放大机制尚不清楚. Lui[26]从统计上得出电流片中心处的 B_y 强度大约为 IMF B_y 的 50%, 然而其统计数据点(大约 110 个数据点)相比本文要少很多. 有学者[28,29]研究认为, 磁尾电流片中的某些物理过程, 如地向流压缩等, 会造成电流片中心处 B_y 强度的增强. Lui 利用的是 IMP6 磁场数据, 考察的是在磁尾下游 30 多个 R_E 处的磁尾电流片, 而本文考察的是近地 15~19 R_E 范围内的磁尾电流片, 所以很可能地向流的压缩会使得本文研究的区域内 B_y 强度相对要强些. 当然这还需要更进一步的工作去研究沿尾向方向 B_y 的大尺度分布.

3 结论

本文利用 Cluster 近 5 年来的磁场数据对近地磁尾电流片中磁场的分布特性进行了初步的统计研究. 所得结果表明, B_z 分量及磁场强度 B_{min} 在午夜电流片中相对较弱, 而在晨昏侧翼处较强, 这说明午夜区电流片中的磁场拉伸比较明显, 磁力线曲率半径较小[30], 电流片厚度较薄. 总体而言, 电流片中的 B_y 分量和磁力线倾斜角的频次分布都近似满足正态分布, 而相应 B_z 分量与磁场强度 B_{min} 则主要分布在 1~10 nT 之间, 这说明 B_y 的分布具有相对较强的随机性, 这可能是由于电流片中的 B_y(尤其是在扁平电流片中)与 IMF B_y 有较强的相关性.

此外, 本文的统计分析还表明, 磁尾电流片是存在明显的晨昏不对称性的. 在午夜及偏昏侧的区域范围内(磁地方时约 21: 00~01: 00), 电流片相对稳定(拍动较弱), 电流片厚度相对较薄, 负 B_z 和扁平电流片出现的几率较大. 但其不对称性的原因目前还不完全清楚, 可能反映了相应背阳面磁层顶是晨昏不对称的.

本文对磁尾电流片磁场的统计分析工作还需进一步结合 AE 指数、IMF 条件以及 TC-1[31]的数据, 以便更深入地挖掘电流片中大尺度的磁场分布特性以及其与亚暴活动和行星际条件的关系.

致谢 感谢 Cluster FGM 团队、匈牙利数据中心以及 ACE 科学数据中心分别提供的 Cluster 4s 磁场数据、Cluster 空间位置数据以及 ACE level 2 数据.

参考文献

1 Ness N F. The Earth's magnetic tail. J Geophys Res, 1965, 70: 2989—3005
2 Baumjohann W, Paschmann G, Cattell C A. Average plasma properties in the central plasma sheet. J Geophys Res, 1989, 94: 6597—6606
3 Baker D N, Klimas A J, Vassiliadis D, et al. Re-examination of driven and unloading aspects of magnetospheric substorms. J Geophys Res, 1997, 102: 7169—7177
4 Fairfield D H. A statistical determination of the shape and the position of the geomagnetic neutral sheet. J Geophys Res, 1980, 85: 775—780
5 Tsyganenko N A, Fairfield D H. Global shape of the magnetotail current sheet as derived from Geotail and Polar data. J Geophys Res, 2004, 109: A03218
6 Huang C Y, Frank L A. A statistical survey of the central plasma sheet. J Geophys Res, 1994, 99: 83—95
7 Fairfield D H. On the average configuration of the geomagnetic tail. J Geophys Res, 1979, 84: 1950—1958
8 Sibeck D G, Siscoe G L, Slavin J A, et al. The distant magnetotail's response to a strong interplanetary magnetic field by: Twisting, flattening, and field line bending. J Geophys Res, 1985, 90: 4011—4019
9 Kaymaz Z, Siscoe G L, Luhmann J G, et al. Interplanetary magnetic field control of magnetotail magnetic field geometry: IMP 8 observations. J Geophys Res, 1994, 99: 11113—11126
10 Escoubet C P, Fehringer M, Goldstein M. The Cluster mission. Ann Geophys, 2001, 19: 1197—1200
11 Shen C, Li X, Dunlop M W, et al. Analyses on the geometrical structure of magnetic field in the current sheet based on cluster measurements. J Geophys Res, 2003, 108: 1168—1181
12 Shen C, Liu Z X, Li X, et al. Flattened current sheet and its evolution in substorms. J Geophys Res, 2008, 113: A07S21
13 Petrukovich A A, Zhang T L, Baumjohann W, et al. Oscillations of flux tube slippage in the quiet plasma sheet. Ann Geophys, 2006, 24: 1695—1704
14 Shen C, Rong Z J, Li X, et al. Magnetic configurations of the tilted current sheets in magnetotail. Ann Geophys, 2008, 26: 3525—3543

15 Zhang T L, Baumjohann W, Nakamura R, et al. A wavy twisted neutral sheet observed by Cluster. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1899—1902
16 Sergeev V A, Runov A, Baumjohann W, et al. Current sheet flapping motion and structure observed by Cluster. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1327—1330
17 Sergeev V A, Runov A, Baumjohann W, et al. Orientation and propagation of current sheet oscillations. Geophys Res Lett, 2004, 31: L05807
18 Runov A, Sergeev V A, Baumjohann W, et al. Electric current and magnetic field geometry in flapping magnetotail current sheets. Ann Geophys, 2005, 23: 1391—1403
19 Petrukovich A A, Baumjohann W, Nakamura R, et al. Cluster vision of the magnetotail current sheet on a macroscale. J Geophys Res, 2005, 110: A06204
20 Smith C W, L'Heureux J, Ness N F, et al. The ACE magnetic fields experiment. Space Sci Rev, 1998, 86: 613—632
21 Balogh A, Carr C M, Acuña M H, et al. The Cluster magnetic field investigation: Overview of in-flight performance and initial results. Ann Geophys, 2001, 19: 1207—1217
22 Lucek E A, Constantinescu D, Goldstein M L, et al. The magnetosheath. Space Sci Rev, 2005, 118: 95—152
23 Fujmoto M, Terasawa T, Mukai T. The lower-latitude boundary layer in the tail-flanks. In: Nishida A, Baker D N, Cowley S W H, eds. New Perspectives on the Earth's Magnetotail. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998. 33—44
24 Kaufmann R L, Ball B M, Paterson W R, et al. Plasma sheet thickness and electric currents. J Geophys Res, 2001, 106: 6179—6193
25 Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. J Geophys Res, 1996, 101: 13067—13088
26 Lui A T Y. Characteristics of the cross-tail current in the Earth′s magnetosphere. In: Potemra T A, ed. Magnetosphere Currents. Washington, DC: American Geophysical Union, 1984. 158—170
27 Sergeev V A. Penetration of the by component of the interplanetary magnetic field into the tail of the magnetosphere. Geomagn Aerono, 1987, 27: 612—615
28 Hau L -N, Erickson G M. Penetration of the interplanetary magnetic field By into earth's plasma sheet. J Geophys Res, 1995, 100: 21745—21751
29 Nakamura R, Baumjohann W, Fujimoto M, et al. Cluster observations of an ion-scale current sheet in the magnetotail under the presence of a guide field. J Geophys Res, 2008, 113: A07S16
30 Büchner J, Zelenyi L M. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotaillike field reversals: 1. Basic theory of trapped motion. J Geophys Res, 1989, 94: 11821—11842
31 Liu Z X, Escoubet C P, Pu Z, et al. The double star mission. Ann Geophys, 2005, 23: 2707—2712