

刘晓灿, 陈化然, 杜爱民等. 2004 年 11 月 7—8 日巨磁暴期间场向电流的分布特征. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2153-2161, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.001.

Liu X C, Chen H R, Du A M, et al. The characteristics of the large-scale field-aligned currents distribution during the great magnetic storm on Nov. 7—8, 2004. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2153-2161, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.001.

2004 年 11 月 7—8 日巨磁暴期间 场向电流的分布特征

刘晓灿¹, 陈化然¹, 杜爱民², 王 源²

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用 CHAMP 卫星磁场数据分析研究了 2004 年 11 月 7 日至 8 日巨磁暴 ($Dst < -200$ nT) 期间大尺度场向电流的分布特征. 把方向相同且时间连续的一段场向电流定义为一个电流片, 分析结果表明, 伴随磁暴的发展, 在卫星飞过的两个扇区 (早上扇区 0200—0400 MLT 及下午扇区 1400—1600 MLT) 中的大尺度场向电流分布呈现不同的纬向分布特征: 随着地磁扰动的增强, 早上扇区电流片分布范围向高纬扩展; 而下午扇区电流片分布范围则显著地向低纬扩展. 与地磁活动 SYM- H 和 AE 指数对比分析得出, 早上扇区的大尺度电流片的分布特征更多地受到亚暴活动的影响, 而下午扇区的电流片分布则明显反映出磁暴环电流活动的特征.

关键词 大尺度场向电流, 分布特征, 磁暴, 亚暴

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.001

中图分类号 P353

收稿日期 2011-09-18, 2012-05-17 收修定稿

The characteristics of the large-scale field-aligned currents distribution during the great magnetic storm on Nov. 7—8, 2004

LIU Xiao-Can¹, CHEN Hua-Ran¹, DU Ai-Min², WANG Yuan²

1 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract Using the high-resolution vector magnetic field data of the CHAMP satellite, we investigate the distribution of large-scale FACs during the great magnetic storm on Nov. 7—8, 2004. The results show that there are different latitudinal distribution characteristics between the morning sector (0200—0400 MLT) and afternoon sector (1400—1600 MLT). In morning sector, the extent of FACs expand to higher latitudes along with increasing geomagnetic disturbance, while the afternoon sector FACs expand to lower latitudes. In terms of SYM- H and AE magnetic indices, we find that the large-scale FACs in morning sector are significantly affected by substorm activities, and in afternoon sector the large-scale FACs mainly indicate the fluctuations of the ring current in storm time.

Keywords Large-scale FACs, Latitudinal distribution, Magnetic storm, Substorm

1 引言

场向电流(FACs)是太阳风-磁层-电离层耦合研究中的一个重要课题. 由于电离层电流和场向电流很难直接测量, 因此有关场向电流强度和分布的大多数信息(特别是连续变化信息)是由地面测量或者卫星测量的磁场值来估计的. 研究场向电流的工作随着电离层高度小卫星的发射得到了极大的发展, 其中最早的该类卫星是 Triad 卫星, Armstrong 以及 Iijima, Zmuda 等人^[1-5] 利用此卫星磁场观测数据进行了许多场向电流的研究工作: Iijima (1976, 1978)^[2-3] 使用 1973 年 7 月至 1974 年 10 月 Triad 磁力仪数据计算得出 800 km 高度的场向电流并总结其空间分布和强度特征(见图 1), 主要结论如下: (1)大尺度场向电流集中分布在环绕地磁极的两个区域: 靠近极侧的 1 区场向电流和靠近赤道侧的 2 区场向电流. (2)在地磁场中等扰动条件下, 即 $2- \leq Kp \leq 4+$, 1 区场向电流的最大密度约为 $2 \mu\text{A}/\text{m}^2$, 且出现在午前 0700—0800MLT 时段, 此时电流流入电离层; 在午后 1500—1600MLT 时段, 电流流出电离层, 最大密度为 $1.8 \mu\text{A}/\text{m}^2$. 1 区场向电流的最大电流密度分布区域与 Sq^p 的焦点位置几乎一致. (3)在地磁场中等扰动条件下, 即 $2- \leq Kp \leq 4+$, 2 区场向电流的最大处位于夜侧, 通常那里是极光电集流最活跃的区域. 在夜晚至子夜前扇区, 电流流入电离层, 最大电流密度约为 $1 \mu\text{A}/\text{m}^2$, 且位于 2100—

2300MLT 时段; 子夜至早晨扇区, 2 区场向电流流出电离层最大电流密度约为 $1.3 \mu\text{A}/\text{m}^2$, 位于 0200—0300MLT 时段. (4)统计得出, 1 区场向电流密度几乎在所有地方时都比 2 区场向电流强, 除了 2100—0300MLT 子夜时段, 此时 2 区场向电流密度能与 1 区相当甚至会稍强. (5)在子夜到早晨扇区, 2 区场向电流与西向电集流的强度相关; 在夜晚到子夜前扇区, 它则与东向电集流的强度相关. (6)1 区场向电流持续存在, 特别是在白天侧, 且在地磁活动非常平静的情况下(即 $Kp=0$)时, 电流密度仍大于 $0.6 \mu\text{A}/\text{m}^2$.

Iijima 等人的工作研究的是地磁场较为平静或中等扰动情况下的场向电流活动特征. 与之相较, 关于强地磁扰动条件下场向电流特征的研究较少. 因此, 本文将对 2004 年 11 月 7 日大磁暴期间 CHAMP 卫星高度(约 400 km)的场向电流进行计算考察, 以期获得强扰动情况下此高度场向电流的活动特征.

磁暴是全球性地磁场的强烈扰动, 徐文耀(2003, 2005, 2009)^[6-8] 指出主相时环电流指数 $Dst < -200 \text{ nT}$ 的磁暴称为巨磁暴. 本工作所要研究的磁暴事件即为巨磁暴类, 研究得出这类磁暴绝大部分由与日冕物质抛射相联系的南向行星际磁场引起, 持续较强的南向磁场使巨大的太阳风能量通过磁重联机制进入地球空间而引发大磁暴. 而场向电流所在的极光卵区域对增强的太阳风输入最明显的响应特征就是向赤道侧的扩展. Meng(1984)^[9] 对三个较强磁暴期间正午及子夜极光卵的纬度变化进行研

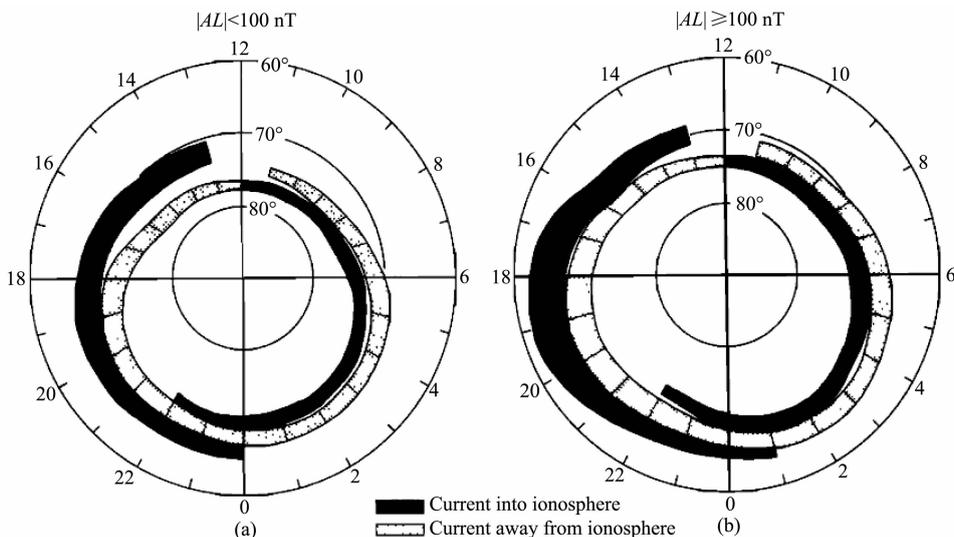


图 1 大尺度场向电流的分布(引自 Iijima 和 Potemra, 1978^[3])

(a) 弱扰动情况; (b) 强扰动情况.

Fig. 1 The distributions of large-scale FACs (By Iijima and Potemra, 1978^[3])

(a) Weak disturbance; (b) Intensive disturbance.

究,发现在磁暴主相期间,正午侧极光椭圆比子夜侧向低纬多偏移了几度,而在磁暴恢复相,子夜椭圆向极侧的恢复速度慢于正午,并得出夜间椭圆在较强的磁暴期间向低纬能扩展到 50°MLat . 在磁暴期间随着极光椭圆的移动流入、流出其中的场向电流会有怎样与平静状态下不同的分布特征,Anderson 等(2002)^[10]利用 Iridium 卫星群观测得出场向电流的恢复过程对于不同的磁暴不尽相同,如果 D_{st} 指数恢复较快,则电流密度在一个小时内就可恢复到磁暴之前的值,且向高纬的回移也很迅速,如果 D_{st} 指数恢复较缓慢,则较强的电流密度将持续一段时间. 陈耿雄等(1995)^[11]利用 KM 模型得出磁扰时极隙区场向电流引起的电场畸变更为明显. 王源等^[12]利用地面地磁台站观测数据,研究了 2000 年 4 月 6 日超级磁暴期间北半球夜侧场向电流变化特征.

本文分析了一次大磁暴事件期间大尺度场向电流的纬度方向分布特征,揭示出地磁强扰动情况下电流片的分布与高低纬地磁活动的关系. 主要包括以下两个方面:一为计算暴时的大尺度场向电流密度;二为分析不同地方时扇区电流片分布特征.

2 数据

CHAMP 卫星是探测地球重力场和地磁场的德国小卫星^[13]. 此卫星于 2000 年 7 月 15 日 11 时在俄罗斯 Plesetsk 卫星发射基地发射升空,轨道为近圆形极轨,倾角为 87.3° ,初始高度为 456 km,2006 年降至约 370 km;轨道周期为 93 min,每天绕地球 15.6 圈,每两天星下点重复覆盖一次,卫星每 11 天地方时行进一个小时,每 4 个月覆盖所有地方时. CHAMP 卫星上装载的磁场测量仪矢量磁通门磁力仪 FGM(Fluxgate Magnetometer)用来测量周围的磁场三分量强度,精度为 0.1 nT,测量范围最大值为 65000 nT. 本文将使用 FGM 的磁场二级数据(CH-ME-2-FGM-NEC)来计算场向电流,数据坐标为局地直角坐标系 NEC,该坐标系中 z 轴垂直向下, x 轴沿地理子午线向北, y 轴沿纬度圈向东.

3 场向电流的计算

用安培定律可以由磁场计算电流

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{j} 是电流密度, μ_0 是真空磁导率, \mathbf{B} 是该电流

产生的磁场. 计算场向电流时, \mathbf{B} 是实际的观测磁场减去模型计算的背景磁场后的部分,以往计算背景磁场时多采用 CO2 即 CHAMP 卫星数据的专属模型、IGRF 模型等常用模型. 研究场向电流的工作中通常使用如下坐标系: z 轴沿着磁力线方向, y 轴垂直于磁正午且向东为正, x 轴完成右手系. 由(1)式得场向电流

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right), \quad (2)$$

式中 B_x 和 B_y 为地球外部电流体系产生的垂直于主磁场的磁场分量,在计算极区顶部电离层高度的场向电流时,一般作适当简化假设. 如 Iijima 和 Potemra(1976)^[2]利用 Triad 卫星的磁场数据研究场向电流分布特征时得出,在此电离层高度场向电流区,磁南北分量 B_x 沿 y 方向的梯度通常比磁东西分量 B_y 沿 x 方向的梯度小得多($<10\%$),故可近似假设,场向电流为沿东西向延伸的电流片,单点观测时场向电流由卫星穿越电流片时观测到的磁场 y 分量沿飞行轨道的变化近似求出. 假定卫星穿越电流片期间电流片不发生显著变化,已知卫星飞行速度为 7.8 km/s,将空间变化转换为随时间的变化,可得到:

$$j_z = \frac{1}{\mu_0 v_x} \frac{\Delta B_y}{\Delta t}. \quad (3)$$

在卫星速度一定的情况下, μ_0 、 v_x 、 Δt 均为常数, j_z 则随 ΔB_y 变化而变化.

关于大尺度场向电流的定义,Iijima 和 Potemra(1976)^[2]总结了如下标准:电流片产生的磁场变化 ΔB 的不变纬度范围超过 0.5° ,经度跨度在地方时一个小时内,且电流密度 $>0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$ (即 1° 不变纬度范围内磁场变化要大于 40 nT). 此外还指出, ΔB 的变化形态有两种,一种是渐进的短时间内大幅度的变化,此类变化主要发生在垂直于主磁场大致沿地磁东西方向. 正如 Zmuda 及 Armstrong(1974)^[14]所述,这种变化几乎总发生在不变纬度 60° — 80° 的高纬区,该区域与 Feldstein(1966)^[15]统计学上提出的极光卵的位置一致. 此外,有时还会记录到 ΔB 三分量长时间($>5 \text{ min}$)的正弦变化,此类变化则是由卫星高度的变化引起的. 因此,在判断场向电流时应只考虑前者,即短时间($<5 \text{ min}$)大幅度的变化.

总结前人的研究,本工作以磁场 y 分量的 5 min 平滑值为背景进行扣除,即去掉了时间尺度大于场向电流的低频变化,消去背景磁场后,利用公式(3)计

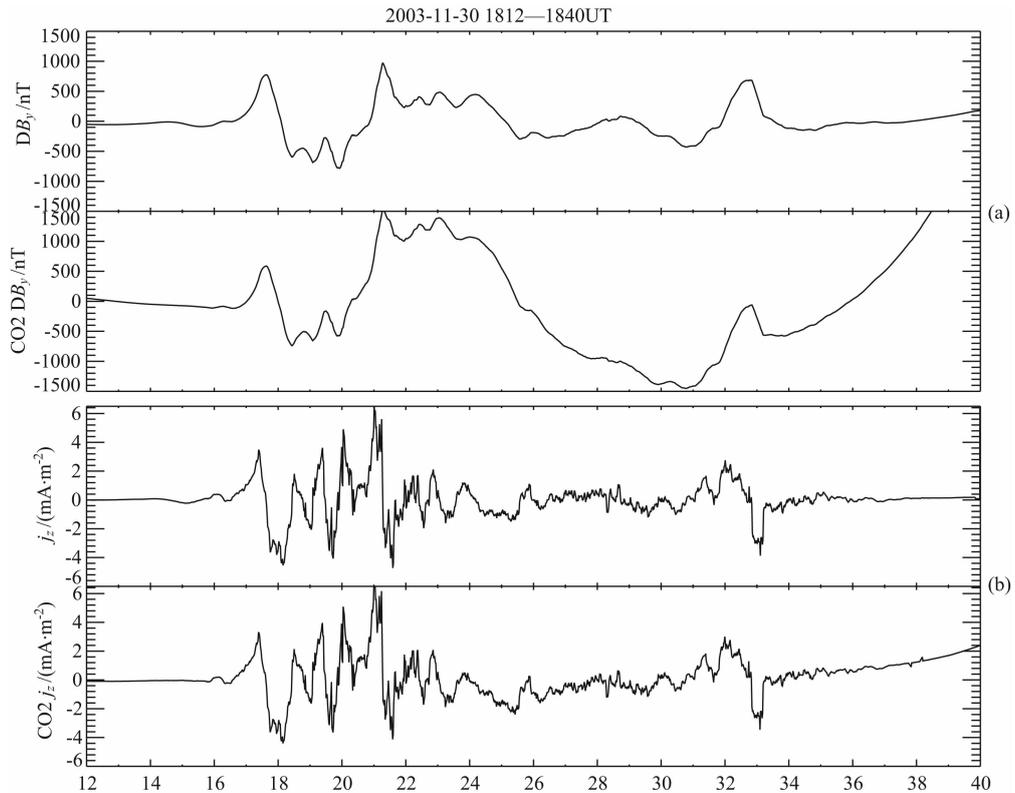


图2 (a)去除背景后 B_y 的变化:本文结果(上图);CO2 模型结果(下图);
(b)与(a)对应的场向电流密度:本文结果(上图),CO2 模型结果(下图)

Fig. 2 (a) B_y residuals after subtracting the background part; result in this work (upper panel); result of CO2 model (lower panel),
(b) corresponding FACs density of (a), result in this work (upper panel); result of CO2 model (lower panel)

算电流密度.此外,为了去除几公里小波长剪切 Alfvén 波的影响^[16],进行 20 s(空间尺度 150 km)的平滑滤波.为了对此扣除背景磁场方法的有效性进行验证,与 CO2 模型的结果进行对比,见图 2a 中 1830UT 时刻附近,本工作方法去背景的结果要优于 CO2 模型.由图 2b 可以看出,两种方法计算的电流密度结果非常吻合.扣除背景后,本工作将按照上段所述 Iijima 等的标准选取大尺度场向电流进行分析.计算得到的电流密度的方向定义为:北半球向下(流入)为正,向上(流出)为负;南半球向上为正,向下为负.为便于描述,把方向相同时间连续的一段场向电流定义为一个电流片.

4 大尺度场向电流片暴时时空分布特征

图 3 给出了 2004 年 11 月 7—8 日磁暴主相期间的太阳风参数和地磁指数的变化,图中从上至下依次为 IMF B_z 、IMF B_y 、太阳风动压、AL 和 AU 指数、ASY-D 和 ASY-H 指数、SYM-D 和 SYM-H 指数.从 SYM-H 指数看出,7 日到 8 日发生了一个急始型磁暴, T_1 为急始时刻(7 日 1830UT 左右), T_2 为最

大相时刻(8 日 0600UT 附近),此时环电流指数达到了 -380 nT,表明该磁暴是一个巨型磁暴,其恢复相持续了很长时间至 11 日.

图 4 给出了主相期间(左图,7 日 1909UT—8 日 0600UT)和恢复相期间(右图,8 日 0600—1350UT)北半球(上图)和南半球(下图)各自大尺度场向电流的分布,该图为磁地方时-不变纬度坐标系,图中最外圈大圆表示磁纬 50° ,向内每圈间隔 10° .由于 CHAMP 卫星轨道基本固定在 0200(1400)MLT 磁子午圈上,所以看到的电流片主要分布在 0200—0400MLT 和 1400—1600MLT 两个扇区.

由图 4 得出:

(1)磁暴主相期间,北半球早晨侧(见图 4a)高纬 75° 附近场向电流流入电离层(红色所示),基本对应着 1 区场向电流^[3],相邻的低纬区($65^\circ \sim 70^\circ$)流出(蓝色所示)电离层的场向电流区域基本对应着 2 区场向电流,其中蓝色区较红色区范围更广,这是由于大磁暴主相期 2 区场向电流较 1 区场向电流有可能发展得更为迅速和强大.由于磁暴期间整个地球空间环境扰动更为复杂,且在本事件中只考虑了电流密度 $0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 以上的大尺度场向电流.故

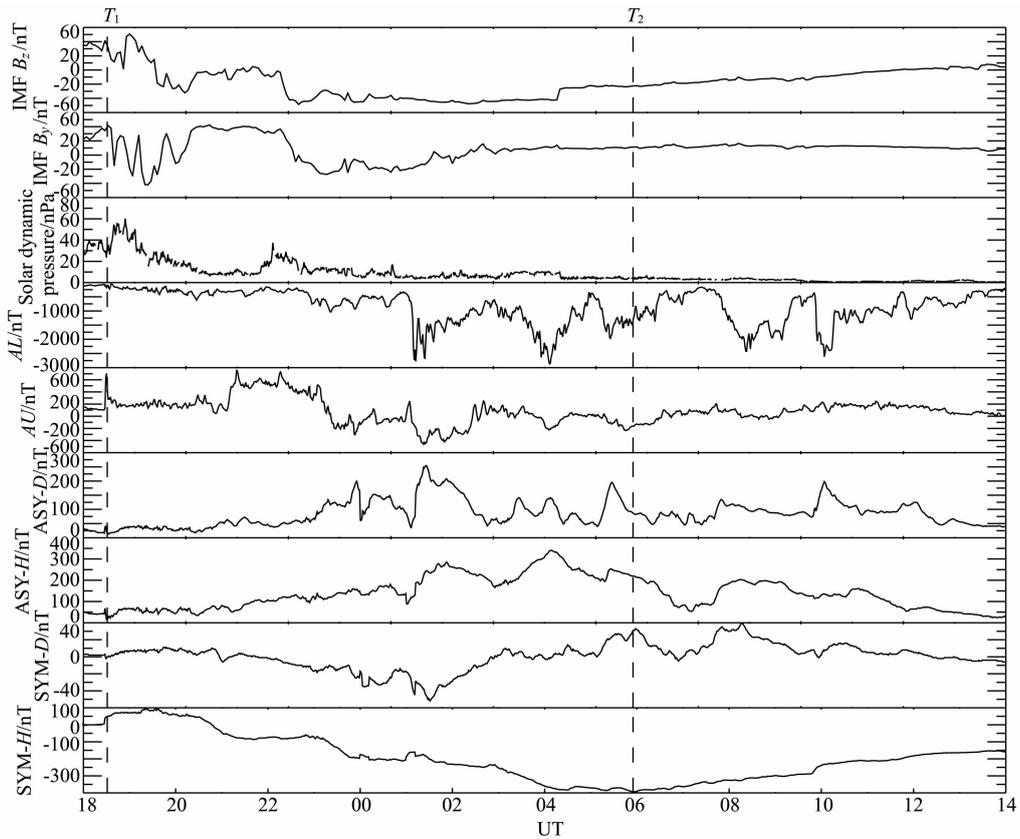


图 3 从上至下依次为 2004 年 11 月 7 日 18 时至 8 日 14 时磁暴主相期间的 IMF B_z 、 B_y 、太阳风动压、AL 和 AU 指数、ASY-D 和 ASY-H 指数、SYM-D 和 SYM-H 指数

Fig. 3 From top to bottom, panels represent IMF B_z , IMF B_y , solar dynamic pressure, AL and AU indices, ASY-D, ASY-H, SYM-D, SYM-H indices during 7th 1800UT to 8th 1400UT Oct. 2004

图中流入流出电离层的场向电流片数增加,且它们散布的范围和形态并不完全符合 1、2 区场向电流两相的统计分布特征。

(2) 对比图 4a 与 4b 以及图 4c 与 4d,可以看出主相期间大尺度场向电流片的个数要多于恢复相期间,且早上扇区(0200—0400MLT)的电流片个数明显多于下午扇区(1400—1600MLT)的。

(3) 以往研究总结指出在地磁平静时期,场向电流主要分布在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的极光带范围内。此次磁暴主相期间(见图 4a,4c)电流片分布的纬度范围约在 $50^\circ \sim 80^\circ$,这表明大磁暴主相期间电流片分布范围较地磁平静时要显著地向低纬和高纬扩展。而在恢复相期间(图 4b 和图 4d),电流片分布的纬度范围开始收缩,其中早上扇区电流片分布集中在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 纬度范围,下午扇区则集中在磁纬 $50^\circ \sim 70^\circ$ 范围内,表明与流入流出这两个扇区内的场向电流相联系的磁层位置和过程不同。

(4) 恢复相期间(见图 4b,4d)南北半球两个扇区电流片的经向分布范围略微变宽,且都向子夜扇

区扩展,而主相期间子夜扇区未有大尺度场向电流片存在。

分析北、南半球各自的大尺度场向电流在暴时的 UT 分布,同时对比 SYM-H 指数和 AE 指数,如图 5 所示,图中每个红色星号代表一个电流片,右侧的 y 轴表示电流片的密度,黑色曲线代表 SYM-H (或 AE)指数,左侧 y 轴表示其大小。可以看出南北半球,大尺度场向电流片密度都基本随着环电流指数 SYM-H 的减小而增大,尤其是南半球(下图)在 8 日 0200—0900UT 时段,SYM-H 减小到 -200 nT 以下,电流片密度显著增大,部分密度超过了 $5 \mu\text{A}/\text{m}^2$,最大达到了 $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 左右。

为了揭示不同扇区大尺度场向电流分布特征的不同,下面详细给出此磁暴事件中南、北半球早上、下午扇区各自的大尺度场向电流的时空分布及其与 SYM-H 和 AE 指数的关系分布。图 6 给出南、北半球电流片的不变纬度分布,其中每个红色星号同样代表一个电流片,左侧的 y 轴表示电流片所在的不不变纬度,黑色曲线代表 SYM-H 指数,右侧 y 轴表示

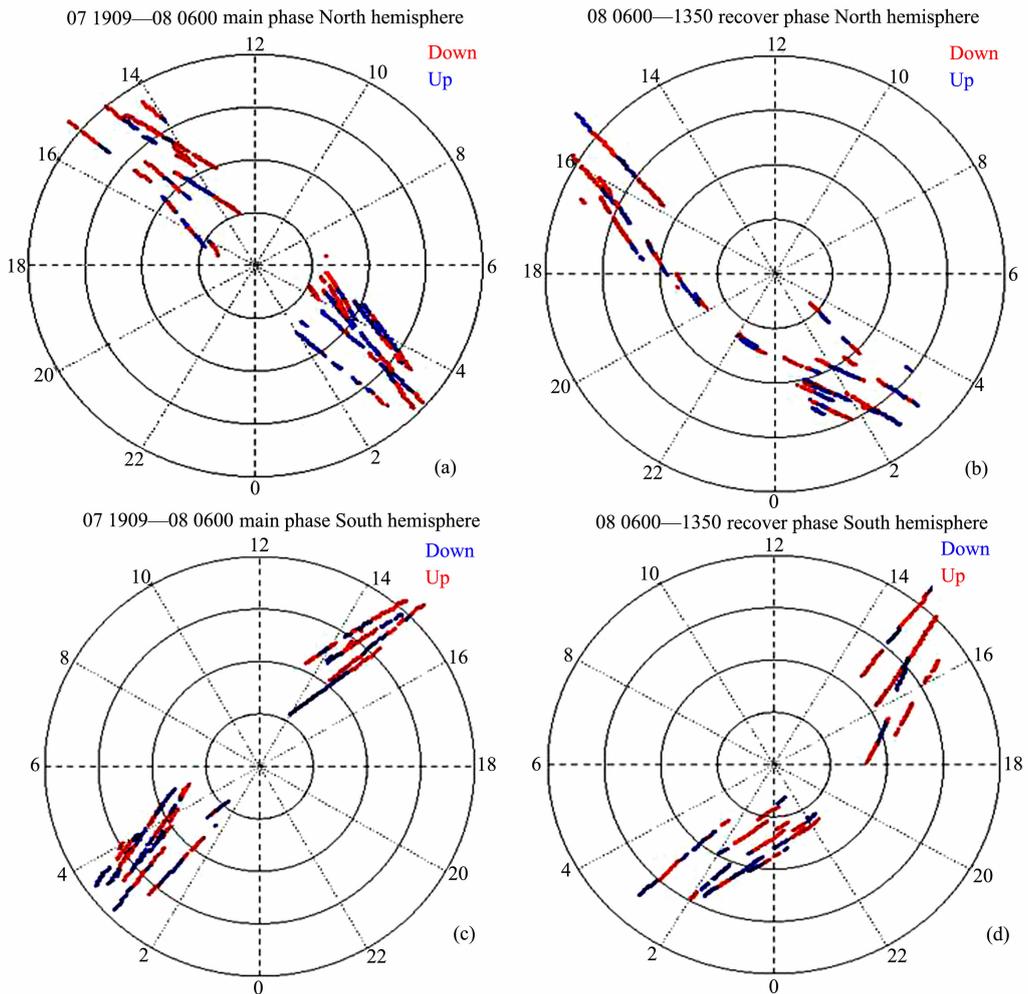


图 4 磁暴期间大尺度场向电流的分布
Fig. 4 The distributions of FACs in this storm

其大小. 由图 6a 可以看出北半球早上扇区电流片分布范围随着 SYM- H 的减小向高纬扩展, 7 日 1900—2300 UT 主相开始时, 大尺度电流片分布范围集中在 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的纬度范围, 8 日 0100—0800 UT 最大相附近电流片则分布在 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 8 日 0800 UT 之后即恢复相后期主要分布在 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 的范围, 早上扇区对应亚暴电流楔区域, 而作为电流楔的一部分, 场向电流的分布范围能反映出磁尾中性片电流中断区域的暴时 UT 演化特征. Iijima 等人的结果(见图 1)也得到在地磁强扰动情况下, 上午扇区大尺度场向电流略微向高纬扩展的分布特征. 焦维新等(1997, 2000)^[17-18] 同样得出场向电流发生率、强度和密度随地磁活动增强而增大. 同时, 南半球场向电流分布有类似的特征, 如图 6b 所示, 南半球早上扇区电流片分布范围随着 SYM- H 的减小(或增加)略有向高纬(或低纬)扩展的趋势, 整个主相期间, 大尺度电流片都基本分布在 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的纬

度范围内.

图 6c 表明磁暴期间北半球下午扇区场向电流片的分布范围随 SYM- H 的降低而显著地向低纬扩展: 主相开始时(7 日 1900—2300 UT)大尺度电流片分布范围集中在 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的纬度范围, 主相极大附近(8 日 0100—0800 UT)场向电流分布在 $45^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 恢复相后期(8 日 0800 UT 之后)场向电流主要分布在 $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的范围. 由图 1b 同样可以看出, 在地磁强扰动情况下, 下午扇区大尺度电流明显向低纬扩展. 下午扇区场向电流的分布与 SYM- H 指数的相关性较好表明这个扇区场向电流分布与环电流活动关系密切. 图 6d 显示, 南半球下午扇区大尺度电流片的分布范围随 SYM- H 的减小而向低纬扩展, 这与北半球的分布情况相同. Xu 等(2008)^[19] 得出 AE 指数增加时, 极区 DP2 电流夜晚侧电流涡关键点 K2 和 K4 向赤道移动, 而早上侧电流涡关键点 K1 和 K3 极向移动.

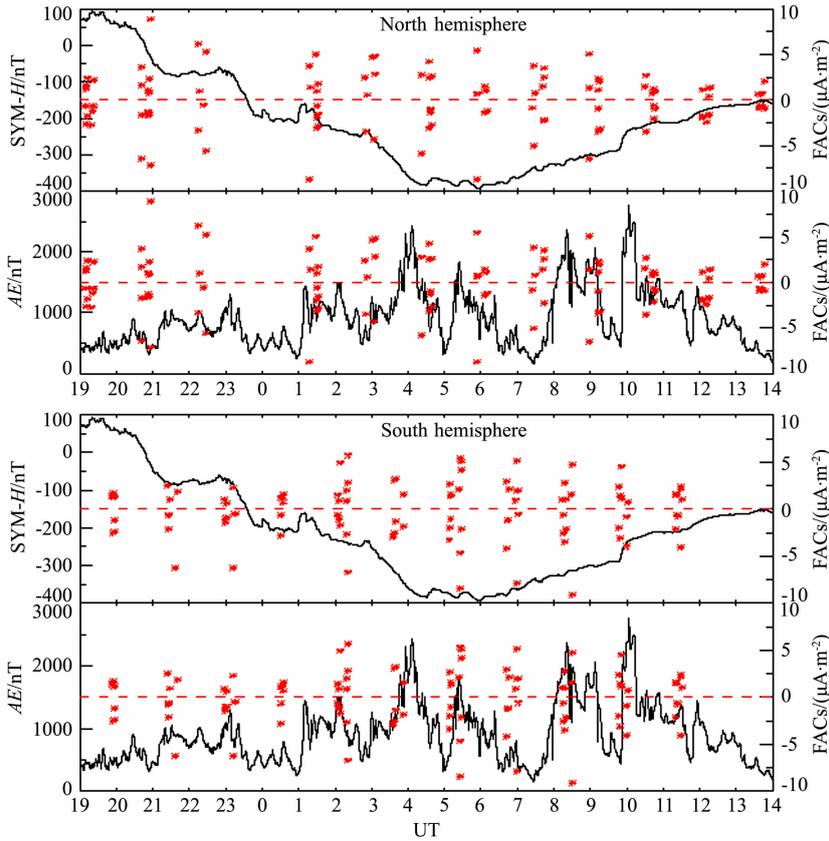


图 5 南北半球电流片密度的 UT 变化及对应的 SYM-H 和 AE 指数

Fig. 5 UT variations of FACs densities in north and south hemisphere individually, and corresponding SYM-H and AE indices

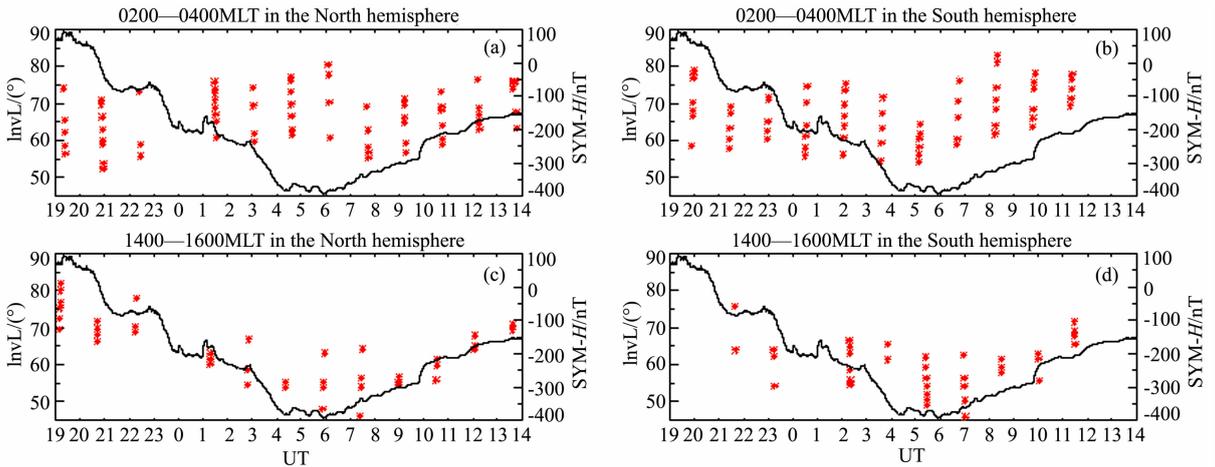


图 6 大尺度场向电流片的不变纬度分布与 SYM-H 指数的对比

Fig. 6 Invariable latitude distributions of FACs and corresponding SYM-H index

图 7 给出了此次磁暴事件期间大尺度场向电流片纬度位置的 UT 分布及其与 AE 指数的对比, 图中每个红色星号同样代表一个电流片, 左侧 y 轴表示该电流片对应的不变纬度位置; 黑色曲线代表 AE 指数, 右侧 y 轴对应其大小. 可以看出, 在早上

扇区, 南北半球的电流片分布和 AE 指数的变化有很好的对应, 电流片的纬度分布与 AE 指数的起伏变化基本一致, 再次说明早上扇区对应着亚暴电流楔的出现位置, 这里的电流片分布特征更多地受到亚暴活动的控制.

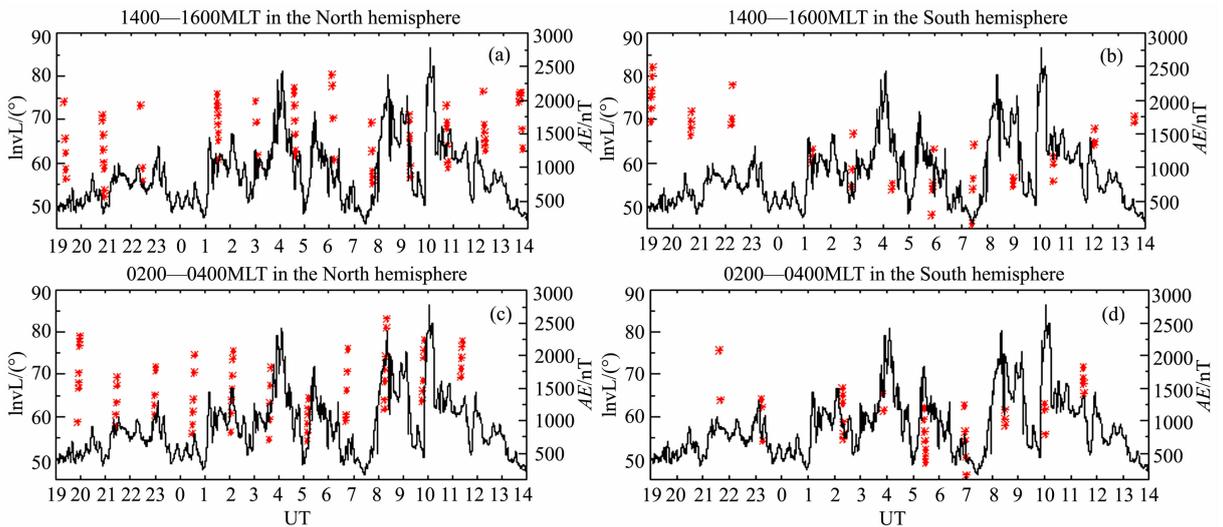


图7 大尺度场向电流片的不变纬度分布与 AE 指数的对比

Fig. 7 Invariable latitude distributions of FACs and corresponding AE index

5 结论

本文利用德国极轨卫星 CHAMP 的高精度磁场三分量测量数据计算分析了 2004 年 11 月 7 日至 8 日大磁暴事件过程中大尺度场向电流的密度及其时空分布,主要结果如下:

(1)无论北半球还是南半球,主相期间大尺度场向电流片的个数和密度要多于和大于恢复相期间,早上扇区的电流片个数明显多于下午扇区。

(2)在该磁暴事件中早上扇区电流片分布范围随着地磁扰动的加强向高纬扩展;而下午扇区电流片分布范围则随着地磁活动的增强显著地向低纬扩展。

(3)早上扇区的大尺度场向电流的分布特征更多地受到亚暴活动的影响,而下午扇区场向电流的分布更多反映了暴时环电流的活动特征。

参考文献(References)

- [1] Armstrong J C, Zmuda A J. Triaxial magnetic measurements of field-aligned currents at 800 kilometers in the auroral region: Initial results. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78(28): 6802-6807.
- [2] Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, 1976, 81(13): 2165-2176.
- [3] Iijima T, Potemra T A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83(A2): 599-615.
- [4] Zmuda A J, Martin J H, Heuring F T. Transverse magnetic

disturbances at 1100 kilometers in the auroral region. *J. Geophys. Res.*, 1966, 71(21): 5033-5045.

- [5] Zmuda A J, Heuring F T, Martin J H. Dayside magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral oval. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72(3): 1115-1117.
- [6] 徐文耀. 地磁学. 北京: 地震出版社, 2003.
- [7] 徐文耀. 地球电磁现象物理学. 合肥: 中国科技大学出版社, 2009.
- [8] 徐文耀. 磁层-电离层耦合. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] Meng C I. Dynamic variation of the auroral oval during intense magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(A1): 227-235.
- [10] Anderson B J, Takahashi K, Kamei T, et al. Birkeland current system key parameters derived from Iridium observations: Method and initial validation results. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(A6): 11-13.
- [11] 陈耿雄, 徐文耀, 师恩琦. 极隙区场向电流对高纬电离层电场和电流体系的影响. *地球物理学报*, 1995, 38(5): 571-580.
- [12] 王源, 洪明华, 陈耿雄等. 2000 年 4 月 6 日磁暴夜侧场向电流变化特征. *科学通报*, 2010, 55(14): 1409-1415.
- Wang Y, Hong M H, Chen G X, et al. Nightside field-aligned current during the April 6, 2000 superstorm. *Chinese*

- Sci. Bull.* (in Chinese), 2010, 55(14): 1409-1415.
- [13] Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. CHAMP mission status. *Adv. Space Res.*, 2002, 30(2): 129-134.
- [14] Zmuda A J, Armstrong J C. The diurnal variation of the region with vector magnetic field changes associated with field aligned currents. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(16): 2501-2502.
- [15] Feldstein Y I. Peculiarities in the auroral distribution and magnetic disturbance distribution in high latitudes caused by the asymmetrical form of the magnetosphere. *Planet Space Science*, 1966, 14(2): 127-130.
- [16] Lühr H, Warnecke J, Zanetti L J, et al. Fine structure of field-aligned current sheets deduced from spacecraft and ground-based observations: Initial FREJA results. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 95(17): 1883-1886.
- [17] 焦维新, 肖佐, Russell C T. 地球内磁层场向电流的统计特征. *地球物理学报*, 1997, 40(4): 453-459.
Jiao W X, Xiao Z, Russell C T. The statistical characteristics of field-aligned current in the earth's inner magnetosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, 40(4): 453-459.
- [18] 焦维新, 濮祖荫. 大尺度场向电流的控制因素. *空间科学学报*, 2000, 20(2): 144-148.
Jiao W X, Pu Z Y. Dependence of field-aligned currents on the orientation of the interplanetary magnetic field. *Chinese J. Space Sci.*, 2000, 20(2): 144-148.
- [19] Xu W Y, Chen G X, Du A M, et al. Key points model for polar region currents. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: A03S11, doi: 10.1029/2007JA012588.

(本文编辑 何 燕)