

王 慧,毛丹丹,马淑英等. 亚暴期间电离层场向电流的分布特征——CHAMP 卫星观测. 地球物理学报, 2010, **53**(6):1256~1262, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.002

Wang H, Mao D D, Ma S Y, et al. Substorm time ionospheric field-aligned currents as observed by CHAMP. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(6):1256~1262, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.002

## 亚暴期间电离层场向电流的分布特征 ——CHAMP 卫星观测

王 慧<sup>1,2</sup>, 毛丹丹<sup>1</sup>, 马淑英<sup>1</sup>, H. Luehr<sup>3</sup>

1 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430079

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 Helmholtz Centre Potsdam-GFZ, German Research Center for Geosciences, D-14473 Potsdam, Germany

**摘 要** 场向电流在不同的等离子体区之间传递能量、动量和质量, 是磁层与电离层之间的关键耦合过程. 本文利用 CHAMP 卫星高精度的空间磁场测量数据, 研究亚暴期间极区电离层场向电流的统计学分布特征. 研究表明场向电流的大小与所在位置呈现明显的日夜和晨昏不对称性, 具体为: (1) 场向电流的大小与亚暴极光电流指数 (AL) 密切相连, AL 愈大, 电流愈强, 亚暴期间电流强度相对平静期来说可增加约 5 倍, 昏侧和夜侧电流强度与 AL 指数的相关性较好, 晨侧和白天侧两者相关性较差; (2) 电流的峰值密度所在位置与 AL 指数的相关性不高, 昏侧电流所处纬度低于晨侧, 而夜晚电流所处纬度低于白天侧.

**关键词** 亚暴, 极区电离层, 场向电流, CHAMP 卫星

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.002

中图分类号 P352

收稿日期 2010-01-26, 2010-04-27 收修定稿

### Substorm time ionospheric field-aligned currents as observed by CHAMP

WANG Hui<sup>1,2</sup>, MAO Dan-Dan<sup>1</sup>, MA Shu-Ying<sup>1</sup>, H. Luehr<sup>3</sup>

1 Dept. of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Helmholtz Centre Potsdam-GFZ, German Research Center for Geosciences, D-14473 Potsdam, Germany

**Abstract** Field-aligned currents (FACs) play an important role in the energy, momentum, and mass coupling between magnetosphere and ionosphere. This study investigates the statistical characteristics of polar ionospheric FACs during substorms by using high resolution magnetic field measurements on board CHAMP. Obvious day-night and dusk-dawn asymmetries emerge in both FACs density and location. It shows: (1) FACs densities are related to AL index, with larger AL the larger current density. FACs densities during substorm are 5 times of that during quiet period. The duskside and nightside FACs densities correlate well with AL, while the dawnside and dayside FACs densities correlate not well with AL; (2) the locations of peak FACs densities do not correlate with AL. The dusk FACs locate equatorward of the dawn, and the nightside FACs locate equatorward of the dayside.

**Keywords** Substorm, Polar ionosphere, Field-aligned current, CHAMP

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40604017, 40974096)、空间天气学国家重点实验室专项基金和教育部留学回国人员基金资助.

**作者简介** 王 慧, 女, 1977 年生, 湖北武汉人, 武汉大学电子信息学院副教授, 主要从事磁层-电离层耦合方面的研究工作.

E-mail: h. wang@whu. edu. cn

# 1 引言

场向电流是磁层与电离层之间的重要电动力学耦合过程,受太阳风行星际条件的直接控制.自 20 世纪 60 年代<sup>[1]</sup>卫星观测证实了场向电流,又称 Birkeland 电流的存在以来,这一现象在太阳风-磁层-电离层耦合研究中一直很受重视.如诸多研究<sup>[2~7]</sup>所揭示,场向电流涉及日-地空间耦合链的多种重要物理过程,与磁重联、大尺度等离子体对流、能量粒子的沿场加速与输运、极光活动等有着密切关系;作为地球空间电流系的组成部分,场向电流与多种大尺度电流,如越磁尾电流、磁层环电流、极光电急流以及亚暴楔电流等,相互影响和制约,是空间天气学研究的一个重要课题.

亚暴是最经常发生的空间天气现象,发生在磁层夜晚面,通常持续 2~3 h,亚暴能够增强磁层和电离层电流,引起高能电子沉降,产生极光,加热极区电离层和热层,并将能量带电粒子注入环电流和辐射带.因此,亚暴是磁层最基本的全球扰动形式和磁层-电离层空间最重要的能量传输与转化过程.亚暴可分为成长相、膨胀相和恢复相 3 个阶段,通常用极光电急流指数  $AL$  来表示.亚暴活动与行星际磁场南向分量和太阳风动力学压强有关<sup>[8]</sup>.

亚暴电流系是空间天气学研究的一个重要课题,磁层亚暴期间,太阳风磁层能量通过直接驱动或者卸载机制向电离层释放,其主要释放形式是极光粒子沉降和焦耳加热,这两者都与极区亚暴电流系有关.因此,对亚暴期间场向电流的分布特征的研究对于深入理解电离层对太阳风和磁层的响应过程,深入认识亚暴的形成和演化过程,揭示亚暴触发机制之迷都具有重要意义.以往有工作研究过亚暴期间内磁层场向电流随亚暴位相的变化<sup>[9]</sup>,本文利用 CHAMP 星载高精度磁通门磁力仪测量数据,研究亚暴期间电离层场向电流的空间分布特征.

## 2 高空磁场数据及其分析

### 2.1 CHAMP 卫星磁场测量数据

CHAMP 卫星于 2000 年 7 月发射升空,飞行在低高度圆形极轨道,倾角为  $87.3^\circ$ ,偏心率 0.004,初始高度为 456 km,绕地周期约 94 min,每天绕地球 15.4 圈,轨道地方时每 11 天变化 1 h,近 4 个月覆盖所有地方时<sup>[10]</sup>.在所研究的几个亚暴事件期间,

该卫星分别处在磁正午~子夜(约 12:00~24:00 MLT)和晨昏(约 09:00~18:00 MLT)子午圈上.

高空磁场数据由 CHAMP 星载三轴磁通门矢量磁力仪测量得到,本文使用二级数据产品,即在卫星当地地球物理坐标系(坐标轴指向当地北、东、下)中的磁场三分量,精度 0.1 nT,采样率 1 Hz,相应空间分辨率约 7.5 km.

### 2.2 场向电流计算方法

场向电流根据安培定律  $\mathbf{j} = 1/\mu_0 \nabla \times \mathbf{B}$  计算得到.为了提取出对场向电流有贡献的高空磁场数据,采用球谐函数阶数取至 29 的地磁基本场模式  $CO_2$  (CHAMP, Oersted, Oersted 2)<sup>[11]</sup>,从卫星观测值中扣除这一基本磁场,得到的磁场变化在极区上空可认为主要由极光电急流和场向电流引起;假设场向电流为沿极光椭圆分布的面电流,场向电流的密度可从平行于椭圆切线方向的磁场扰动量得到;计算在 MFA 坐标系( $z$  轴沿当地磁场方向, $y$  轴指向磁东, $x$  轴方向遵循右手法则)中进行,并且只考虑卫星轨道与椭圆切线夹角大于  $45^\circ$  情况下的数据.场向电流的计算详见文献<sup>[12]</sup>.

## 3 典型亚暴事例分析

### 3.1 晨昏侧场向电流特征

2007 年 3 月 23 日发生了一系列亚暴事件,我们选取 3 个亚暴进行分析,这 3 个亚暴事件发生时间段分别为 05:00~07:00 HH,10:00~16:00 HH (见图 1 中  $AL$  指数所示),10:00~16:00 HH 这段时间连续发生了两个亚暴.亚暴期间 CHAMP 卫星处于晨昏轨道(09:00~18:00 MLT).

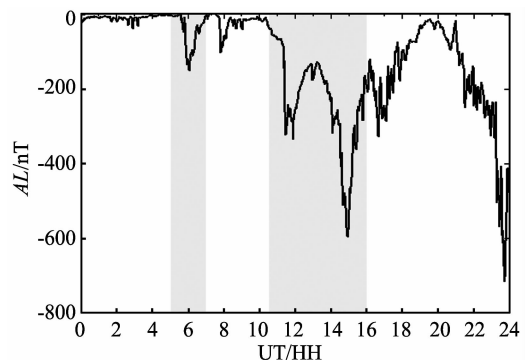


图 1 2007 年 3 月 23 日  $AL$  指数随时间的变化图  
图中阴影部分表示所研究的亚暴事件.

Fig. 1  $AL$  index as a function of UT on 23 March 2007  
The shadow bar indicates the substorm events under study.

图 2 为 UT = 10 : 00 ~ 12 : 00 HH 之间场向电流强度大小的变化, 其中负值表示流入电离层的电流, 正值表示流出电离层的电流. 图 2a 和 2c 为亚暴成长相期间, 晨侧场向电流峰值为  $0.28 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $70.8^\circ$ , 谷值为  $-0.48 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬

$78.1^\circ$ , 昏侧场向电流最大值为  $1.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $72.0^\circ$ , 最小值为  $-0.43 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $69.3^\circ$ . 图 2b 和 2d 为亚暴膨胀相期间, 晨侧场向电流最大值为  $1.41 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 此时磁纬为  $70.1^\circ$ , 最小值为  $-1.04 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $73.9^\circ$ , 昏侧场向电流最大值为

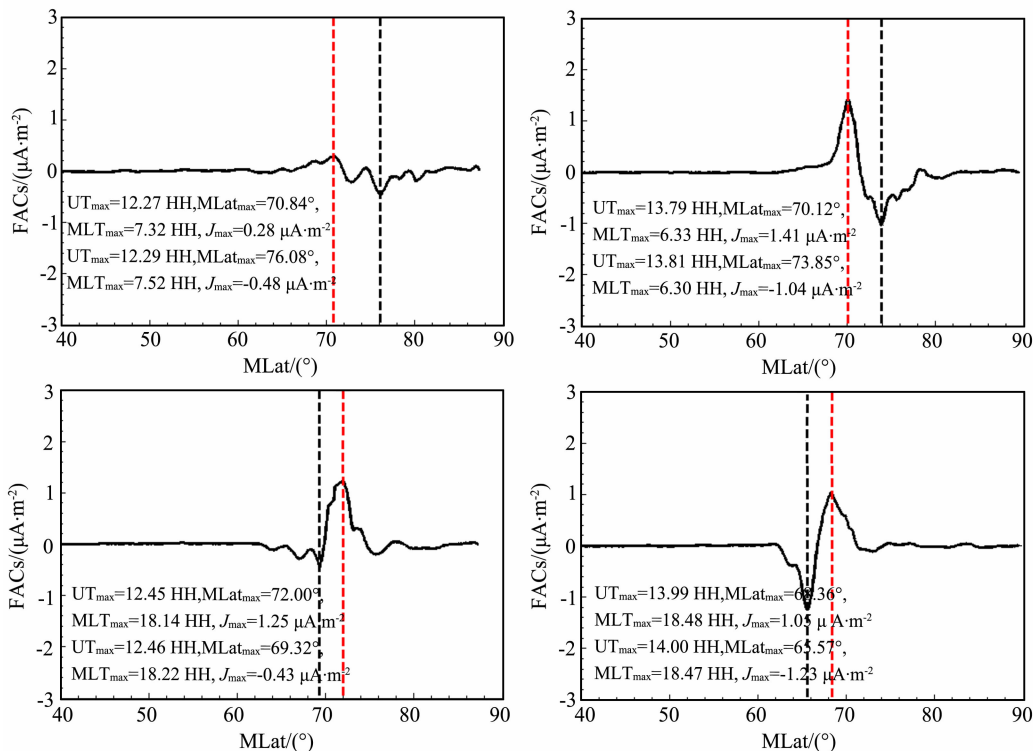


图 2 亚暴期间晨昏侧场向电流随磁纬的变化图

场向电流极大和极小值轨道所在 UT 时间、磁地方时、磁纬和电流大小值已在图中给出, 正值为流出电离层的场向电流, 负值为流入电离层的场向电流. 图中红色(黑色)竖直虚线标示出流出(流入)电离层的场向电流的极值.

Fig. 2 Substorm time field-aligned currents as a function of MLat

The FACs maximum and minimum, time and location are given. Positive means currents flowing out of the ionosphere, negative into the ionosphere. The red (black) vertical dashed line indicates the maximum (minimum) current density.

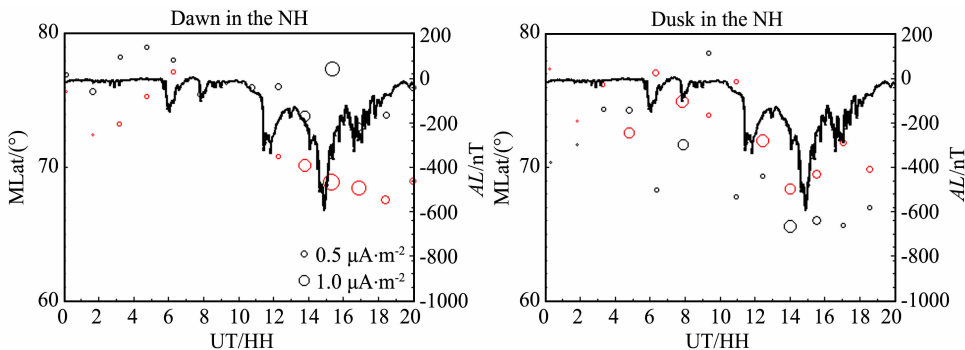


图 3 2007 年 3 月 23 日 CHAMP 卫星观测到北半球晨昏侧场向电流极值和 AL 指数随时间和磁纬的变化图 AL 变化曲线为黑色, 场向电流的大小用圆圈的大小来表示, 红色表示流出电离层的电流, 黑色表示流入电离层的电流.

Fig. 3 The time and location of the peak field-aligned currents observed by CHAMP

in the dawn and dusk sectors in the north pole on 23 March 2007

Overplotted is the AL black curve. The FACs densities are indicated by circle size.

Red indicates currents flowing out of the ionosphere, black into the ionosphere.

1.05  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $68.4^\circ$ , 最小值为  $-1.23 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $65.6^\circ$ . 从以上分析可看出, 从成长相到膨胀相, 场向电流强度可增大约 5 倍.

图 3 给出 2007 年 3 月 23 日场向电流极值和 AL 指数随时间和纬度的变化. 前两个亚暴期间 (05:00~07:00 HH, 10:00~13:00 HH), 晨侧场向电流 (图 3a) 幅度和所处位置没有很明显的变化, 后一个亚暴期间 (13:00~16:00 HH), 晨侧场向电流幅度在 AL 达到谷值时增强, 所在纬度随 AL 的减小而向低纬移动; 昏侧场向电流 (图 3b) 在 3 个亚暴期间几乎都在膨胀相增强, 且向上流出电离层的电流强度比流入电离层的电流强度绝对值大, 后两个亚暴期间, 电流峰值所在纬度在亚暴膨胀相向低纬移动; 亚暴期间昏侧电流所在纬度略低于晨侧.

### 3.2 日夜侧场向电流特征

2001 年 9 月 3 日发生了一系列亚暴事件, 我们也选取 3 个亚暴进行分析, 这 3 个亚暴事件发生时间段分别为 08:00~15:00 HH, 21:00~23:00 HH (见图 4 中 AL 指数所示), 其中 08:00~15:00 HH 这段时间连续发生了两个亚暴. 亚暴期间 CHAMP 卫星处于日夜轨道 (约 12:00~24:00 MLT).

图 5 为 UT = 08:00~10:00 HH 期间日夜侧场向电流的变化情况. 图 5a 和 5c 为亚暴成长相期间, 白天侧场向电流峰值为  $2.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $77.9^\circ$ , 谷值为  $-2.21 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $76.3^\circ$ , 昏侧场向电流最大值为  $0.97 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $66.6^\circ$ , 最小值为  $-1.40 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $69.1^\circ$ . 图 5b 和 5d 为亚暴膨胀相期间, 晨侧场向电流最大值为  $2.24 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 此时磁纬为  $76.0^\circ$ , 最小值为  $-3.90 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $74.2^\circ$ , 昏侧场向电流最大值为  $1.94 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $67.5^\circ$ , 最小值为  $-1.39 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , 处于磁纬  $70.7^\circ$ . 从图中可看到场向电流幅度随亚暴的发展而逐渐增强.

图 6 给出 2001 年 9 月 3 日 00:00~24:00 UT 期间场向电流极值和 AL 指数随时间和磁纬度的变化. 白天侧 (图 6a), 对第 1 个亚暴而言 (08:00~12:00 HH), 电流强度随 AL 指数减小而增强, 对后两个亚暴来说 (12:00~15:00 HH, 21:00~23:00 HH), 电流强度随 AL 指数减小而减弱, 前两个亚暴期间, 场向电流的极值所在纬度随 AL 指数减小而向低纬移动, 后一个亚暴期间电流所在位置变化不是很明显; 夜晚侧 (图 6b), 对第 1 和第 3 个亚暴而言, 电流强度随 AL 指数减小而增强, 对第 2 个亚暴来说, 电流强度随 AL 指数减小而减弱, 当

AL 指数减小时, 场向电流向低纬移动.

## 4 结果和讨论

我们将 2007 年 3 月 23 日 (共挑选出 3 个亚暴事件) 以及 2001 年 9 月 3~5 日发生的亚暴事件 (共挑选出 9 个亚暴事件) 作统计学分析, 挑选出亚暴期间 CHAMP 卫星所观测到的场向电流峰值密度以及极值所在纬度, 从而得到电流峰值密度、所在纬度与 AL 指数的关系, 如图 7~图 8 所示.

图 7 为晨昏侧和日夜侧场向电流峰值大小与 AL 指数的对比图, 可以看到 AL 愈大, 电流变强, 昏侧和夜侧电流强度与 AL 指数的相关性较好, 晨侧和白天侧较差. 我们知道, 西向电急流的最大值一般发生在约 03:15 MLT<sup>[13]</sup>, 而 AL 指数表征西向电急流的最大强度, 因此可以预见 AL 指数与子夜后的电流强度相关性要好于白天侧和晨侧, 这与我们的观测结果一致. 另一方面, 亚暴通常发生在磁子夜附近, 亚暴发生时, 越尾电流片坍塌, 通过流入和流出电离层的场向电流与电离层电流形成亚暴电流楔, 因此夜间场向电流相对于其他地方时与亚暴过程更直接相关.

利用单颗卫星磁场数据反演场向电流存在误差: (1) 我们假定卫星穿越电流片期间电流片不发生显著变化, 利用已知的卫星飞行速度 (约 7.8 km/s), 可将随空间的变化转换为随时间的变化, 即  $j_z = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dx} = \frac{1}{\mu_0 v_x} \frac{dB}{dt}$  ( $\mu_0$  为磁导率), 如果电流片在卫星穿越过程中发生了变化, 则计算结果必然存在误差; (2) 我们计算中假设场向电流为无限大沿极光椭圆分布的无限电流片<sup>[14]</sup>, 在磁暴期间这个假设可能不成立, 但是, Lühr 等人<sup>[15]</sup> 研究结果表明, 如果卫星轨道与电流片存在夹角, 或电流片不是无穷大分布, 会导致计算的电流值偏小, 但对确定场向电流的位置影响不大.

图 8 给出晨昏、日夜侧场向电流最大与最小值所在纬度与 AL 指数的对比图, 日夜侧电流极值所在纬度与 AL 指数相关性不强, 晨昏侧流出电离层的电流所在纬度与 AL 指数的相关性较好, 而流入电离层的场向电流与 AL 指数相关性不强. 另外, 昏侧电流所处纬度略低于晨侧, 昏侧电流最低可到达磁纬  $64^\circ$ , 而晨侧电流当 AL 指数小于  $-300 \text{ nT}$  时, 停留在磁纬  $68^\circ$  附近, 似乎出现饱和状态, 夜侧电流所处纬度最低可到达磁纬  $60^\circ$ , 白天侧则到达磁纬

70°左右.如果把场向电流所在位置看作极光椭圆的平均位置,可以得到以下结论:亚暴期间极光椭圆应为不规则椭圆分布,呈现出地方时不对称性.夜间场向电流的峰值所在位置与 AL 指数相关性不高,这说明亚暴电流系随着亚暴的发展不一定向低纬移动. IMAGE 卫星 FUV 观测表明,极光爆发(代表亚暴初始)通常发生在子夜附近,接下来 20~30 min 内增亮的极光会向极侧和晨昏侧扩展<sup>[16]</sup>.以往研究表明子夜附近向上流出电离层的场向电流(亚暴电流楔)与极光爆发的位置基本重合<sup>[17]</sup>,因此亚暴电流楔有可能与增亮的极光的运动方向相一致,即随着

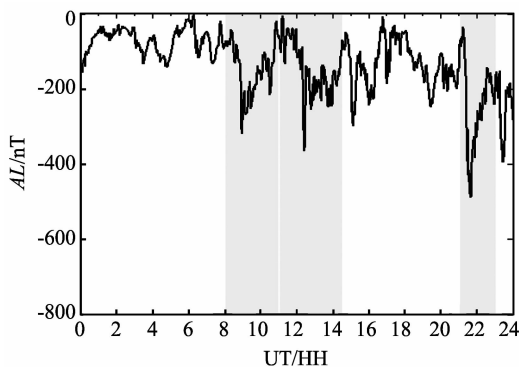


图 4 同图 1, 但为 2001 年 9 月 3 日事件  
Fig. 4 Same as Fig. 1, but for 3 September 2001 event

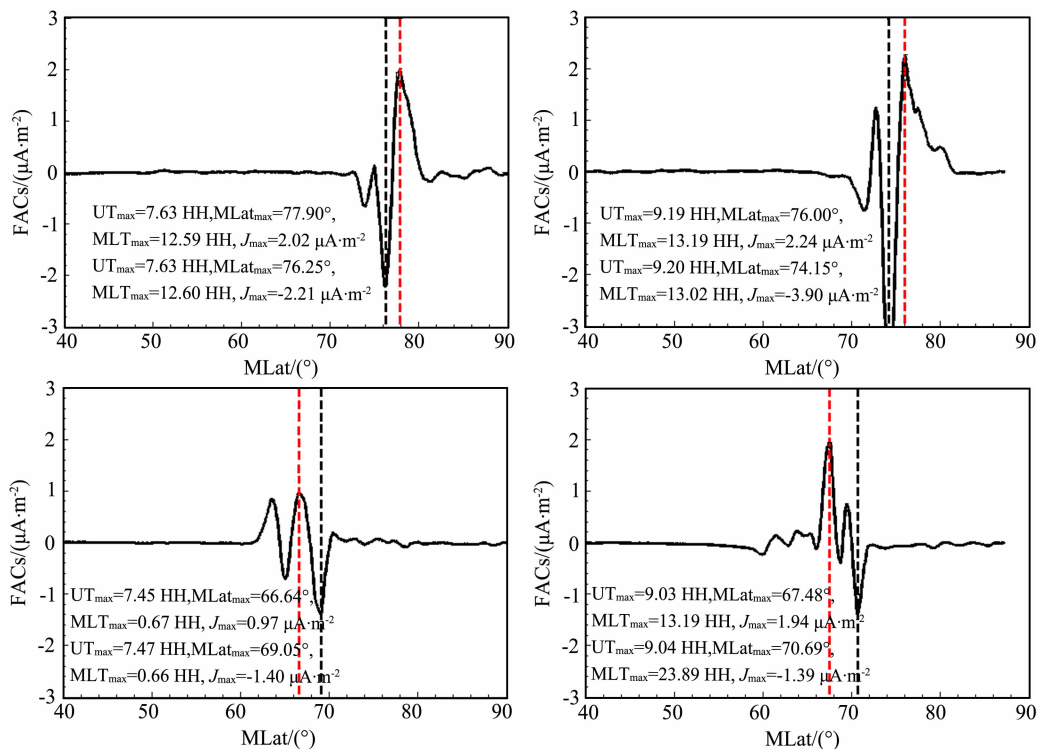


图 5 同图 2, 不过亚暴事件发生在 2001 年 9 月 3 日, 卫星为日夜轨道  
Fig. 5 Same as Fig. 2, except that the substorm events occur on 3 September 2001 and CHAMP was on the dayside-nightside orbit

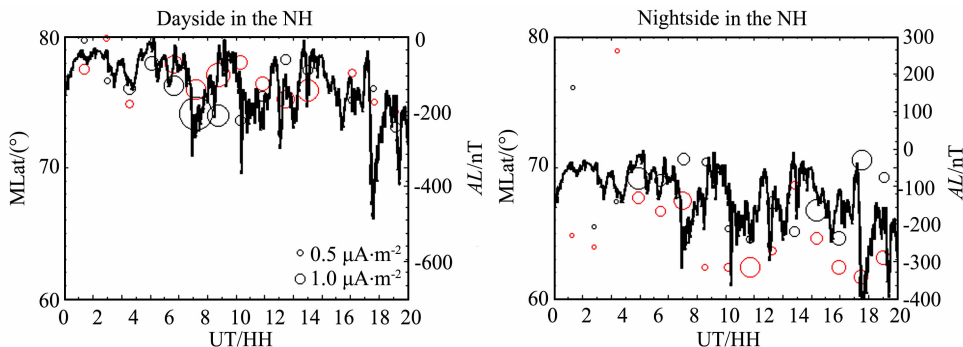


图 6 同图 3, 但为 2001 年 9 月 3 日事件  
Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the 3 September 2001 event

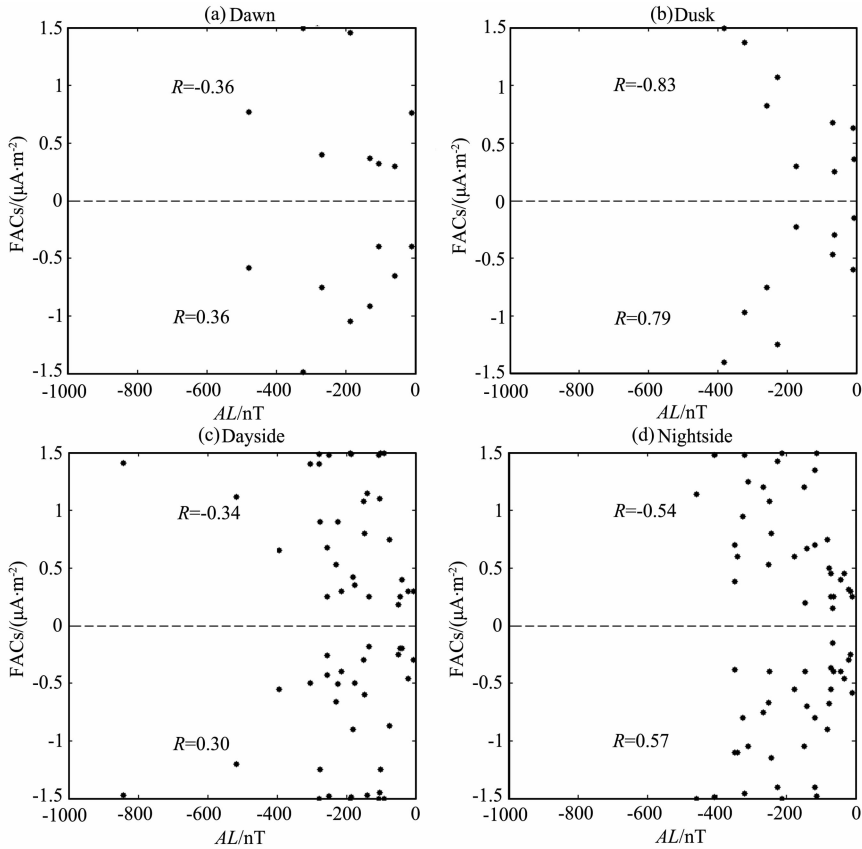


图 7 CHAMP 卫星观测到晨昏侧(a, b)和日夜侧(c, d)场向电流的极大(正值,代表流出电离层的电流)和极小值(负值,代表流入电离层的电流)随  $AL$  指数的变化图,  $R$  为相关系数。

Fig. 7 The peak FAC densities observed by CHAMP in the dawn-dusk (a, b) and day-night (c, d) versus  $AL$  index.

Positive means those flowing out of the ionosphere, negative into the ionosphere.  $R$  is the correlation coefficient.

亚暴的发展向晨昏侧移动,这点也被以往的观测所证实,即亚暴发生后电流楔的确向昏侧方向运动<sup>[18]</sup>。

提供,地磁指数由 ISTP 有关课题 PI 与工作人员通过国际互联网络提供,在此一并表示衷心感谢。

## 5 结 论

以上对 CHAMP 卫星在 2007 年 3 月 23 日晨昏轨道以及 2001 年 9 月 3 日~5 日白天夜晚轨道观测到的亚暴期间场向电流变化特征进行了分析,结论总结如下:

(1)场向电流的大小与亚暴的位相有密切的关系, $AL$  愈大,电流愈强,电流强度相对平静期来说可增加约 5 倍,昏侧和夜侧电流强度与  $AL$  指数的相关性较好,晨侧和白天侧两者相关性较差。

(2)场向电流的极值出现区域在晨侧约为  $68^{\circ}\sim 80^{\circ}$  磁纬,在昏侧约为  $64^{\circ}\sim 80^{\circ}$  磁纬,在白天约为  $70^{\circ}\sim 82^{\circ}$  磁纬,在夜晚约为  $60^{\circ}\sim 78^{\circ}$  磁纬;电流的纬度位置与  $AL$  指数相关性不高,昏侧电流所处纬度略低于晨侧,而夜晚电流所处纬度低于白天侧。

致 谢 CHAMP 卫星数据由德国地学研究中心

## 参考文献(References)

- [1] Zmuda A J, Martin J H, Heuring F T. Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region. *J. Geophys. Res.*, 1966, **66**: 5033~5045
- [2] Kivenlson M G. The current systems of the Jovian magnetosphere and ionosphere and predictions for Saturn. *Space Sci. Rev.*, 2005, **116**(1-2): 299~318
- [3] Sergeev V A, Sauvaud J -A, Reme H, et al. Sharp boundary between the inner magnetosphere and active outer plasma sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(15): doi 10.1029/2003GL017095
- [4] Mauk B H, Zanetti L J. Magnetospheric electric fields and currents. *Rev. Geophys.*, 1987, **25**: 541~554
- [5] Bythrow P, Potemra T, Zanetti L. Variation of the auroral Birkeland current pattern associated with the north-south component of the IMF. In: *Magnetospheric Currents*. AGU, Washington, DC, GM, 1984, **28**: 131~136
- [6] Sato T, Walker R J, Ashour-Abdalla M. Driven magnetic reconnection in three dimensions-Energy conversion and field-

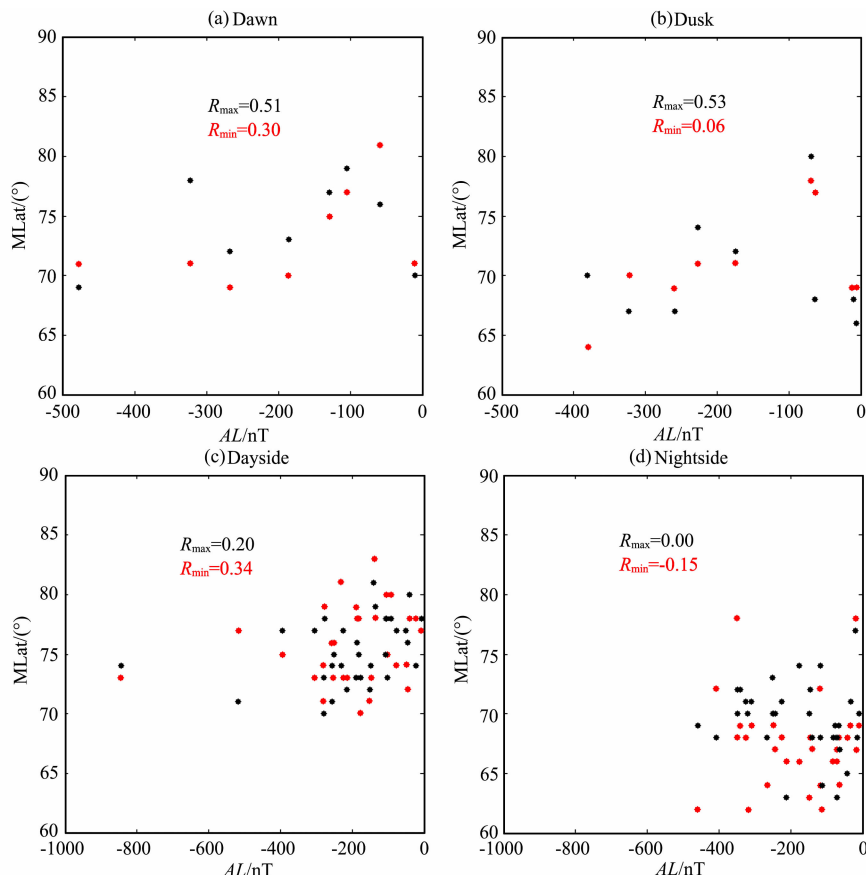


图 8 CHAMP 卫星观测到晨昏侧 (a, b) 和日夜侧 (c, d) 场向电流峰值所在纬度随  $AL$  指数的变化图  
红色代表流出电离层的场向电流 (正值), 黑色代表流入电离层的场向电流 (负值),  $R$  为相关系数。

Fig. 8 The MLat of the peak FACs observed by CHAMP versus  $AL$  index  
in the dawn-dusk (a, b) and day-night (c, d) sectors

Red indicates the currents flowing out of the ionosphere, black into the ionosphere.  $R$  is the correlation coefficient.

aligned current generation. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(1): 9761~9769

- [7] Anderson H R, Vondrak R R. Observations of Birkeland currents at auroral latitudes. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1975, **13**: 243~262
- [8] Lyons L R, Lee D Y, Wang C P, et al. Global auroral responses to abrupt solar wind changes: dynamic pressure, substorm, and null events. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110** (A08); doi:10.1029/2005JA011089
- [9] 焦维新. 场向电流随亚暴位相的变化. *空间科学学报*, 1996, **16**(2): 140~144  
Jiao W X. Variation of field-aligned currents with substorm phases. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 1996, **16**(2): 140~144
- [10] Reigber C, Luehr H, Schwintzer P. CHAMP mission status. *Adv. Space. Res.*, 2002, **30**: 129~134
- [11] CO<sub>2</sub> model, Champ, Oersted, Oersted 2
- [12] Wang H, Luehr H, Ma S Y. Solar zenith angle and merging electric field control of field-aligned currents: a statistical study of the southern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**; doi: 10.1029/2004JA010530

- [13] Allen J H, Kroehl H W. Spatial and temporal distributions of magnetic effects of auroral electrojets as derived from AE indices. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**: 3667~3677
- [14] Iijima T, Potemra T. Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**: 5971~5979
- [15] Lühr H, Warnecke J, Rother M K A. An algorithm for estimating field-aligned currents from single spacecraft magnetic field measurements; a diagnostic tool applied to Freja satellite data. *Geosci. Remote Sens.*, 1996, **34**: 1369~1376
- [16] Frey H U, Mende S B, Angelopoulos V, et al. Substorm onset observations by IMAGE-FUV. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**; doi:10.1029/2004JA010607
- [17] Wang H, Lühr H, Ma S Y, et al. Statistical study of the substorm onset: its dependence on solar wind parameters and solar illumination. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**: 2069~2079
- [18] Wang H, Ma S Y, Lühr H, et al. Global manifestations of a substorm onset observed by a multi-satellite and ground station network. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**: 3491~3496