第20卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.2
2000 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2000

大尺度场向电流的控制因素*

焦维新 濮祖荫
(北京大学地球物理系 100871)

摘 要

将 ISEE-1 和 ISEE-2 飞船测量的地球内磁层场向电流作为行星际磁场与极区地磁活动水平 (由 AL 表征) 的函数. 发现大约 75% 的场向电流发生在行星际磁场南向时, 其余 25% 发生在行星际磁场由南向转到北向的半小时内. 而且, 发生在 $AL < -150\,\mathrm{nT}$ 的场向电流也大约是 75%. 场向电流的强度和密度随行星际磁场南向分量及 AL 的负值增加而增大. 由此而得出结论, 内磁层场向电流的产生主要是由行星际磁场控制的, 是太阳风和电离层间电动耦合增加的结果.

关键词 场向电流—行星际磁场— AL 指数

1 引 言

大尺度场向电流 (FACs) 在磁层和电离层间架起了桥梁, 它是太阳风能量、动量传输到磁层-电离层的重要途径, 因而对场向电流的研究引起了国内外学者的注意. 但是, 由于观测上的局限性, 目前, 人们对场向电流在极区电离层高度上的形态 [1,2] 了解得比较清楚, 至于场向电流产生的控制因素, 尽管已提出一些理论模型, 但都因缺乏充分的观测证据而没有为大家公认. 焦维新等 [3,4] 曾利用 ISEE-1 和 ISEE-2 飞船在地球内磁层测量的磁场数据, 研究场向电流与极区地磁活动水平 (以 AL 表征) 的相关性及场向电流随亚暴位相的变化. 结果表明, 约 75% 的场向电流发生在地磁扰动时, 场向电流的强度与密度在亚暴的膨胀相最大. 本文将场向电流作为行星际磁场 (IMF) 南北向分量 B_z 的函数, 并结合文献 [3] 和文献 [4] 的结果, 进一步阐明场向电流产生的原因和在太阳风-磁层-电离层间电动耦合过程中的作用.

2 数 据

我们所用的场向电流数据是 ISEE-1 和 ISEE-2 飞船于 1977 年 11 月到 1980 年 12 月间在地球内磁层测量的, 但大多数数据取自于 1978 年 [3]. 尽管场向电流是持续存在的现象, 但其强度是不断变化的, 因而它在磁层中产生的磁场扰动也不断变化, 在内磁层中运动的飞船并不能连续观测到场向电流. 本文为叙述方便, 将 ISEE-1 和 ISEE-2 飞船均观

* 国家自然科学基金资助项目 49774248
1999-01-12 收到原稿, 2000-01-16 收到修定稿

测到的垂直于磁子午圈方向的磁场 (B_y) 扰动 (一般大于 5 nT) 称为一个事件，文献 [4] 给出场向电流观测的实例及场向电流的计算方法，共计 123 个事件.

在相关分析中使用的 IMF 数据取自于 IMP-8 卫星，极光电集流指数 AL 取自美国加州大学洛杉矶分校的地磁场数据库. 按照每个事件所发生的时间，逐一地确定了相对应的 IMF B_z 和 AL 值，并按 AL 的大小，将极区地磁活动划分为 4 个水平：$|AL| \leqslant 50$ nT、50 nT$< |AL| \leqslant 150$ nT、150 nT$< |AL| \leqslant 300$ nT 和 $|AL| > 300$ nT，分别对应于非常平静、平静、扰动和强烈扰动. 在此基础上，将 123 个事件归入相应的数据组，确定在每个 B_z 范围、每个地磁活动水平场向电流的相对发生率 R(即每个数据组的事件数与总事件之比)、强度和密度的平均值. 这里所用的强度和密度值，已经换算为距地面 110 km 的电离层高度上 [4].

3　结　　果

图 1—4 描述了场向电流的相对发生率 R(以下简称发生率)、强度 (这里为单位长度

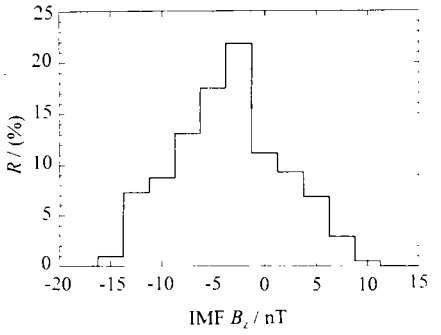


图 1　场向电流相对发生率与 IMF B_z 的关系
Fig.1　The occurrence of FACs as a function of the IMF B_z

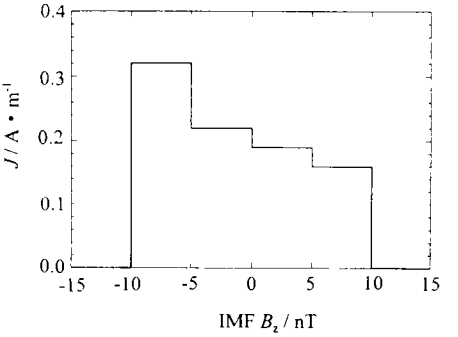


图 2　场向电流强度随 IMF B_z 的变化
Fig.2　FACs intensity versus the IMF B_z component

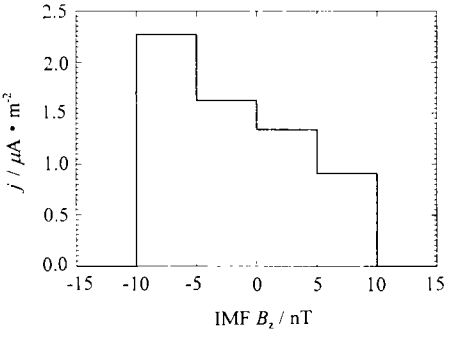


图 3　场向电流密度随 IMF B_z 的变化
Fig.3　FACs density versus the IMF B_z component

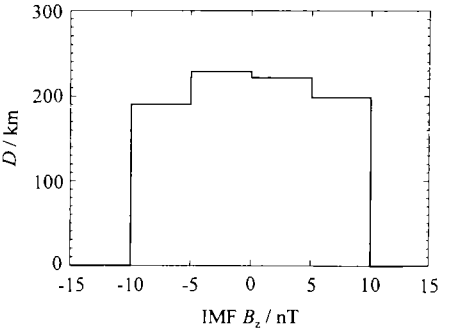


图 4　电流片厚度随 IMF B_z 的变化
Fig.4　FACs current sheet thickness versus the IMF B_z component

的电流强度)、密度及电流片厚度与 IMF B_z 的关系. 图 1 表明, 在总共 123 个事件中, 75.0% 的事件发生在 IMF 南向时. 在图 2—4 中, B_z 从 $-10\,\mathrm{nT}$ 到 $-5\,\mathrm{nT}$ 的数据组包括了 $B_z < -10\,\mathrm{nT}$ 的情况. 图 2—4 的结果显示, 场向电流的强度和密度都随 IMF 南向分量的增加而增大, 随北向分量的增加而减小, 而电流片厚度的变化不大. 因为电流强度 J、密度 j 和电流片厚度 D 三者间的关系为:

$$j = J/D$$

只要 D 接近于恒定, j 将与 J 成正比.

4 讨论与结论

本文及文献 [3] 的结果可归纳为两方面: (1) 场向电流的发生率在 IMF 南向及极区地磁扰动时都大约为 75%; IMF 北向及地磁活动非常平静时的发生率都很小; (2) 场向电流的强度和密度都随 IMF 南向分量和极区地磁活动水平的增大而增加. 两方面变化趋势的一致性, 表明大尺度场向电流主要是由行星际磁场控制的.

从广义上来说, 任何一个电流系的变化都是由电源和负载两方面决定的. 我们说行星际磁场是大尺度场向电流的主要控制因素, 正是因为它能对这两方面产生决定性的影响.

从源的角度看, 当行星际磁场南向时, 太阳风等离子体在南北磁层顶边界层中运动产生的电流 j_{sw}(东向) 与太阳风电场 (西向) 近于反平行 [5], 因而太阳风 - 磁层相互作用像一台磁流体力学 (MHD) 发电机, 向电离层负载输送能量. 在太阳风与磁层相互作用区的边界, j_{sw} 发散, 向电离层提供了场向电流. 这是大尺度场向电流产生的主要来源.

通常根据在磁层或在极区电离层测量到的磁场剪切和速度剪切计算场向电流. 当行星际磁场南向时, 在磁层顶和磁尾发生磁场重联, 太阳风的粒子、电场输入到磁层. 太阳风中电场的大小为 vB_z[6], 这里 v 是太阳风速度, B_z 是行星际磁场南向分量. 因而大的、南向的行星际磁场, 将在磁层或电离层中产生强的对流, 引起磁场剪切和速度剪切, 进而产生大的场向电流 [7,8].

场向电流的负载是极光区电离层. 当行星际磁场南向时, 在极光区电离层发生的重要现象之一是极光电集流的增强. 极光电集流的形成是由于在极光卵区高能粒子的沉降使电离率增强, 局地电导率增高, 当对流电场通过磁力线映射到极光卵区的电离层时, 驱动了局地的强电流, 这就是极光电集流. 在磁静时, 对流电场所驱动的极光电集流称 "对流电集流", 而与亚暴活动相对应的极光电集流称 "亚暴电集流", 这种电集流的大部分是由场向电流供应的 [9]. 根据电集流的流向, 还可以将其分为东向电集流和西向电集流. 东向电集流主要是源于中午前后的霍尔电流, 它由向下的净场向电流 (即沿一个子午圈方向没有平衡的场向电流) 输送. 东向电集流终止在哈朗间断区, 在那里, 它部分沿磁力线向上流动, 部分转向北, 加入西向电集流. 西向电集流的主体从黎明前流向午夜扇区, 典型情况是沿极光卵的极向边界扩展到黄昏扇区, 在那里, 它也发散成为向上的场向电流 [10]. 本文在相关分析中所用的 AL 指数, 就是西向电集流产生的最大磁场扰动的量度.

西向极光电集流是亚暴膨胀相的主要特征, 它常常起始于午夜前后, 平均来说, 在 0300 LT 最大. 这种电集流主要由午夜扇区高电导率控制. 电导率的增加, 特别是由加速

电子引起的 HMI 电导率的增加，反映了存贮在磁尾的能量卸载．而在黎明前的西向电集流，主要由南向电场控制 [11].

亚暴通常是在行星际磁场南向或由南向转为北向不久发生的．在亚暴发生期间，电离层电流以两种方式受到影响：一方面，前面描述的对流极光电集流中的霍尔电流增强，这直接与进入磁层的太阳风能量相关 (即所谓直接驱动过程)，另一方面，早先贮存在磁尾的能量的阵发性释放，导致亚暴电流楔的形成．亚暴电流楔是越尾电流沿磁力线转向造成的．转向的越尾电流沿东侧磁力线进入电离层，加强西向极光电集流，再沿西侧磁力线返回磁层．亚暴电流楔的形成使得场向电流和西向电集流大大增强，因而 AL 指数增加.

McPherron 曾给出在由多个亚暴构成的磁暴期间行星际电场晨昏分量与 AL 指数的关系 [6]，如图 5 所示．图中的 E_{sw} 为行星际电场晨昏分量，下图为 AU 和 AL 指数．因行星际电场的晨昏分量是由南向的行星际磁场产生的，因此，该图显示了 AL 指数随南向 IMF 增大而增加的关系．本文的结果则具体说明了行星际磁场控制 AL 指数的机制.

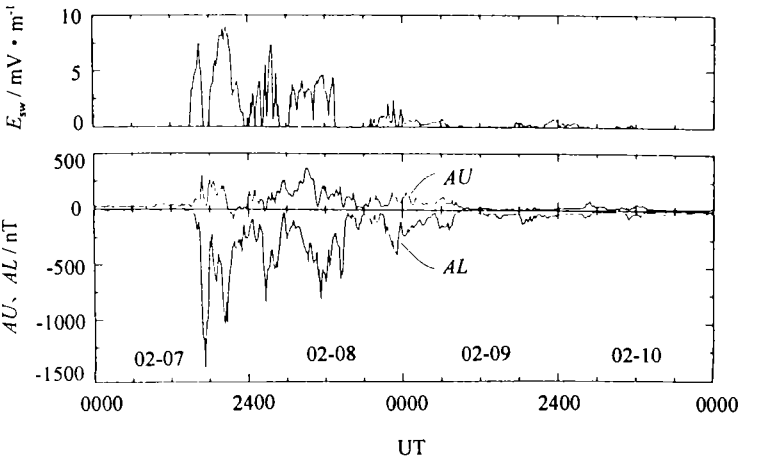


图 5　AL 指数随行星际电场晨昏分量的变化 [6]

Fig.5　The component directed from dawn to dust of IMF electric field versus the AL index

根据场向电流的发生率、强度和密度随行星际磁场南向分量及 AL 指数变化趋势的一致性，可使我们更清楚地了解太阳风-磁层-电离层电动耦合过程.

结果表明，约 75% 的场向电流发生在极光区地磁扰动时．由于西向电集流主要发生在夜间，且是磁层亚暴的重要特征，因此自然联想到场向电流的时间分布及伴随亚暴情况．事实上，本文所涉及的事件大多数发生在夜间，特别是在午夜前后发生率最高 [11]．而夜间场向电流有 65.5% 伴随亚暴 [4]．由此我们可得到太阳风-磁层-电离层电动耦合的图像：当行星际磁场具有较大的南向分量时，在磁层顶和磁尾发生磁场重联，在磁层和极区电离层产生对流．一方面，太阳风-磁层相互作用 —— 直接驱动过程在磁层中产生电流 j_{sw}, j_{sw} 在边界的发散产生场向电流 (FAC)．另一方面，太阳风-磁层的装卸载过程，使存储在磁尾的能量阵发式释放，导致亚暴电流楔的形成，使极光区西向电集流增强．同时，极光区的电导率也大大增加，这是越尾电流向内运动的结果．弥散极光和相应的电离是由来自中心等离子体片的粒子沉降产生的．当越尾电流向地球移近以平衡太阳风拽力时，

造成粒子沉降率增加. 电导率的增加进一步使极光电集流增强. 而电离层电场的散度或电导率的梯度都会使电流沿磁力线发散, 导致场向电流进一步增加. 这种相互作用过程的结果, 在基本上以 I 区和 II 区场向电流为边界的极区出现增强的极光, 地磁站观测到强烈的地磁活动, 即 AL 指数增加.

本文的结论可概括为以下几方面:

(1) 在 IMF $B_z < 0$ 和地磁场扰动情况下, 大尺度场向电流的发生率基本相同, 大约为 75%;

(2) 场向电流的强度和密度随 IMF 南向分量及地磁活动水平的增加而增大;

(3) 行星际磁场是大尺度场向电流的主要的确控制因素. 场向电流的产生是太阳风与电离层间电动耦合增加的结果.

参 考 文 献

[1] Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents in northern high latitudes observed by TRIAD. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**:2 165—2 174

[2] Potemra T A. Sources of large-scale Birkeland currents. In: Holter J A *et al.* ed. Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1994. 3—27

[3] 焦维新. 场向电流与地磁和亚暴活动的相关性. 北京大学学报 (自然科学版),1996, **32**(3):354—360

[4] 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

[5] Kelley M C. The Earth's ionosphere. Academic Press Inc., San Diego, Calif., 1989. 1—30

[6] McPherron R L. Physical processes producing magnetospheric substorms and storms. In: Jacobs J A ed. geomagnetism, Academic Press, New York, 1991, **4**:593—739

[7] Xiaoming Z. The relationship between magnetospheric convection and ionospheric heating. *J. Geophys Res.*, 1994, **99**: 11 327—11 330

[8] Kamide Y. The relationship between field-aligned currents and the auroral electrojets: a review. *Space. Sci. Rev.*, 1982, **31**:220—230

[9] Kamide Y, Baumjohann W. Magnetosphere-ionosphere Coupling. New York: Springer-Verlag, 1993. 1—20

[10] 焦维新, 萧佐. 地球内磁层场向电流的统计特征. 地球物理学报, 1997, **40**:453—459

[11] Kamid Y, Kokubun S. Two-component auroral electrojet: Importance for substorm. *J. Geophys. Res.*, 1996, **10**(6):13 027—13 046

DEPENDENCE OF FIELD-ALIGNED CURRENTS ON THE ORIENTATION OF THE INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD

JIAO Weixin PU Zuyin

(*The Department of Geophysics, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

Field-aligned currents (FACs) measured in the inner magnetosphere by the ISEE-1 and -2 spacecraft are investigated as a function of the Interplanetary Magnetic Field (IMF) orientation and the level of geomagnetic activity, as indicated by the *AL* index. It is found that ~75% of the FACs observed are associated with southward IMF. The remaining 25% occur during the period of IMF turning from southward to northward. Very few are associated with sustained intervals of northward IMF. Approximately 75% of the FACs occur when the *AL* index is < -150 nT. The current intensity and density are higher for both southward IMF and high geomagnetic activity. These results show that the occurrence of FACs within the inner magnetosphere is controlled mainly by the IMF, with the actual occurrence being a consequence of enhanced electrodynamic coupling between. the solar wind and the magnetosphere-ionosphere system.

Key words Field-aligned currents, Interplanetary magnetic field, *AL* index