



磁尾的等离子体片边界层场向电流密度与地磁活动指数 Kp 的关系分析

程征伟^{①*}, 史建魁^①, ZHANG Tie Long^②, DUNLOP Malcolm^③, 刘振兴^①

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 Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz A-8010, Austria;

③ SST, Rutherford Appleton Laboratory, SW7 2AZ, UK

* E-mail: zwcheng@spaceweather.ac.cn

收稿日期: 2010-06-04; 接受日期: 2011-04-26

国家自然科学基金(批准号: 40804031, 41074114, 40921063)和国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 对 2001 年 7 月~10 月 Cluster 穿越磁尾等离子体片边界层期间观测到的 172 个场向电流事件进行了研究, 主要分析了等离子体片边界层场向电流特性与地磁活动指数之间的关系. 研究结果表明: 1) 等离子体片边界层场向电流的相对发生率随地磁活动的增强而增加; 2) 等离子体片边界层场向电流密度随 Kp 指数的增大而增大; 在磁暴的主相阶段, 场向电流迅速增大, 电流密度最大达到 19.05 nA/m^2 , 同时 Kp 增大至 5; 3) 地磁活动指数 Kp 与等离子体片边界层区场向电流密度有着一致的变化关系. 然而, 当 $AE < 800 \text{ nT}$ 时, 等离子体片边界层场向电流密度随着 AE 的增加而增加, 当 $AE > 800 \text{ nT}$ 时, 场向电流密度随着 AE 的增加而减小. 从而说明, 等离子体片边界层场向电流密度与 Kp 指数的变化关系更为密切.

关键词

场向电流

等离子体片边界层

Kp 指数

AE 指数

场向电流(FAC)首次被卫星观测证实是在 20 世纪 60 年代中期^[1]. 随后的研究表明在极区电离层中存在着两种不同的场向电流结构, 即一区和二区场向电流^[2~6]. 一区场向电流从晨侧流进电离层, 从昏侧流出电离层. 二区场向电流的方向与一区场向电流的方向正好相反. 目前人们对电离层高度场向电流的特性比较了解, 比如确定了一区和二区场向电流的位置、强度大小, 以及它们的季节变化规律等^[7~10].

有研究结果认为, 磁尾等离子体片边界层的场向电流, 与极区电离层中的场向电流一起, 是磁层-电离层耦合电流体系的重要组成部分, 会受到太阳

风和行星际磁场的控制. Zhou 和 Russell 等人^[11]的研究表明场向电流与行星际磁场 B_y 分量有较强的依赖关系. 焦维新等人^[12]的研究结果认为, 场向电流事件有 75% 发生在行星际磁场南向时, 得出场向电流产生是由行星际磁场控制的, 是太阳风和电离层电动耦合的结果.

关于内磁层和电离层高度的场向电流对地磁扰动的响应问题, 已有了一些研究. Chun 和 Russell^[13, 14]的研究认为不同地磁活动水平条件下, 内磁层场向电流的分布会有明显的差异. Sun 和 Akasofu^[15]定义了一个新的场向电流指数 AF , 并且指出极区电离层

高度区的场向电流与地磁活动指数(Dst 指数)之间具有密切的关系. Christiansen 等人^[16]利用 Ørsted 和 CHAMP 卫星, 对磁暴期间的场向电流特性进行过研究, 认为在强磁暴(地磁活动指数 $Dst < -100$ nT)期间 I 区场向电流达到饱和是由于很强的太阳风-磁层-电离层耦合造成的. Robinson 等人^[17]研究了极光区电离层高度场向电流强度与 Kp 指数的关系, 通过数据拟合给出它们之间的关系式. Maltsev 和 Ostapenko^[18]通过数值模拟给出了一区二区总电流强度与 Kp 指数的对应关系, 计算得到当 $Kp=1.5$ 时, 总电流强度为 0.56 MA, 当 Kp 等于 5 时, 总电流强度为 1.2 MA. Artamonov 等人^[19]同样对 Kp 指数与一区二区总电流关系进行了研究, 他们给出的结果是, 当 $Kp=1.5$ 时, 总电流强度为 0.37 MA, 当 Kp 等于 5 时, 总电流强度为 0.94 MA.

Ohtani 等人^[20]利用 ISEE 飞船的数据, 对近磁尾等离子体片边界层的场向电流事件做了统计研究, 结果发现在地磁活动越剧烈(AE 越大), 场向电流事件(即场向电流强度大于 3 mA/m 的事件)的发生几率就越大. 但目前还没有文章对磁尾等离子体片边界层区场向电流密度与地磁活动指数 Kp 的关系进行过统计研究. Kp 指数是描述全球尺度地磁活动的指数, 与太阳风和行星际磁场有着密切的联系, 研究磁尾等离子体片边界层区场向电流与 Kp 指数的关系对于正确认识场向电流在空间天气因果链中的作用有着重要的意义.

本文将采用 ClusterII 四颗卫星的磁场数据, 采用“curlometer”技术计算场向电流, 从中选取磁尾等离子体片边界层场向电流事件, 分析了磁尾等离子体片边界层场向电流分别与地磁活动指数 Kp 和 AE 的关系. 结果认为, 磁尾等离子体片边界层场向电流密度与 Kp 指数有着更直接的关系.

1 场向电流的计算及事件的选取

1.1 场向电流的计算方法

ClusterII 由四颗卫星所组成, 形成了空间 4 点的立体探测, 利用四颗卫星的磁场数据, 根据“curlometer”方法^[21, 22]可以计算磁场的旋度, 进而得到电流密度. 此计算方法基于安培定律, 并且对三颗卫星相对于另外一颗卫星间的磁场做了线性假设, 于是就可以通过数值积分的方法直接计算得到电流密度. 由于

2001 年 Cluster 卫星穿越磁尾等离子体片边界层时, 四颗卫星相互间的距离是 2000 km, 并且四颗卫星间的空间位形保持较好, 所以可以利用“curlometer”方法计算电流密度. 为了使计算的场向电流较为准确, 在研究中还要考虑卫星的数据质量 Q :

$$Q = |\nabla \cdot \mathbf{B}| / |\nabla \times \mathbf{B}|. \quad (1)$$

Rober 和 Dunlop^[21]对于空间电流计算的误差和数据质量做过详细的研究, 认为 Q 值可以作为数据质量好坏的判据. 理论上 Q 越小, 探测数据质量越高. 但在实际应用过程中, 根据研究对象空间尺度的不同, 需要选取不同的 Q 值. 在本研究中, 我们首先选取不同 Q 值进行比较, 结果表明选取 Q 等于 0.3, 能有效的去除噪音数据并尽可能多的保留有效数据^[23].

1.2 等离子体片边界层的确定

本研究利用 ClusterII 四颗卫星的自旋平均磁场数据计算场向电流, 时间范围为 2001 年 7 月至 10 月, 在这段时间内, ClusterII 卫星穿越磁尾. 图 1 显示了 ClusterII 卫星穿越磁尾时所经过区域的结构, 黑色的粗线条就是我们所研究的区域, 等离子体片边界层.

在以往的研究中, 确定等离子体片边界层一般有两种方法. 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^[20]. 这种方法可以大致确定 PSBL 区域, 但是在地磁活动比较强烈, 磁场扰动大时判断起来就相对困难, 准确性也差些. 另一种是根据卫星的粒子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做判定. 其具体方法是: 当 $0.01 \leq \beta \leq 1$ 时为等离子体片边界层区; 当 $\beta < 0.01$ 时为等离子体瓣区; 当 $\beta > 1$ 时为等离子体片区^[24].

ClusterII 卫星携带有磁通门磁强计(FGM)、离子谱仪(CIS)和等离子体电子和电流实验仪器(PEACE),

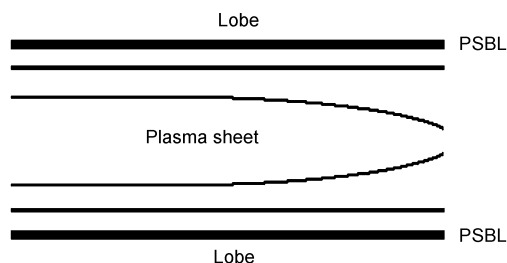


图 1 磁尾等离子体片边界层示意图

所以既可以获得磁场数据, 又能获得电子以及高能粒子的数据, 并计算得到等离子体 β 值. 因此, 我们结合以上介绍的两种方法, 通过磁场和 β 值共同确定等离子体片边界层. 如果 CIS, PEACE 仪器的数据缺失不全, 我们以磁场判断为准. 另外我们对场向电流的大小, 事件的时间尺度也做了相应的规定: 规定场向电流密度大于 3.00 pT/km , 即 2.38 nA/m^2 . 两个独立的场向电流事件间的间隔大于 10 min . 这里需要说明的是, 通过“curlometer”方法计算得到的是磁场变化, 单位为 pT/km , 它与电流密度 nA/m^2 之间关系的导出, 基于安培定律 $|\nabla \times \mathbf{B}| = \mu_0 \mathbf{j}$, 其中 $\mathbf{B}$ 为磁场, $\mathbf{j}$ 为电流密度, μ_0 为真空中磁导率. 从而可以得到 $1 \text{ nA/m}^2 \sim 1.26 \text{ pT/km}$. 为方便比较, 研究中单位均换算成了 nA/m^2 .

图2中(A)和(B)为所选取的两个符合条件的等离子体片边界层场向电流事件. 事件(A)发生时, B_x 值约 -25 nT , B_y 和 B_z 都非常小, β 约为 0.1 , 表明卫星位于南半球的等离子体片边界层内部, 场向电流密度的大小约为 6.35 nA/m^2 . (B)事件与(A)事件发生间隔约 30 min , 其电流密度大小也约为 6.35 nA/m^2 , β 值略大于瓣和等离子体片边界层的临界值 0.01 , 表明

(B)事件发生在等离子体片边界层的外边界, 更靠近瓣区附近.

1.3 卫星数据和地磁活动指数 Kp 的获取

ClusterII 卫星的磁场数据, 电子及高能粒子数据取自 Cluster 卫星数据中心. Kp 指数取自世界资料中心日本京都大学 C2 地磁中心.

2 场向电流与 Kp 指数的关系分析

Kp 指数是北纬 $47^\circ \sim 63^\circ$ 之间 13 个地磁台站测得 K 指数的平均值, 其值在 $0 \sim 9.0$ 之间共分为 28 级, 相邻级别之间相差 $1/3$, 例如 $0+$ 为 $1/3$, $1-$ 为 $2/3$. Kp 指数主要用来表征 3 h 时间间隔的全球性地磁活动变化. 以往的研究表明极区场向电流与 Kp 指数存在一定的关系, 当 Kp 指数变大时, 极区场向电流密度和总电流强度也变大. 通常认为极区电离层的一区电流与磁尾等离子体片边界层的场向电流相连, 所以研究磁尾等离子体片边界层场向电流与 Kp 指数的关系也就尤为重要.

根据我们的研究需要, 按照 Kp 值的大小, 将地

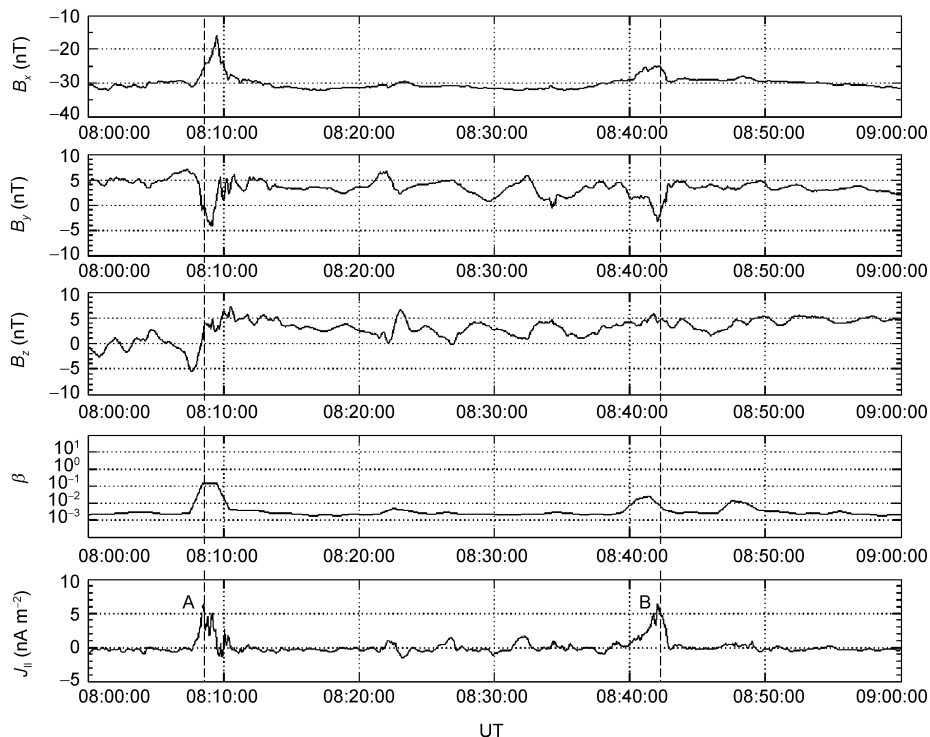


图2 选取的两个磁尾等离子体片边界层场向电流事件

磁活动分成了三个不同的水平, 即地磁相对宁静($0 \leq Kp < 2$), 弱扰动($2 \leq Kp < 5$), 强扰动($Kp \geq 5$). 表 1 为根据 Kp 指数划分的不同地磁活动水平条件下的场向电流发生数目和相对发生率.

表 1 显示, 绝大部分 FAC 事件发生在弱磁扰动 ($2 \leq Kp < 5$) 的条件下, 在相对宁静期间 ($0 \leq Kp < 2$) 和强磁扰动期间 ($Kp \geq 5$) FAC 事件的发生数目较少. 我们还对观测时间段内不同地磁活动水平的发生率进行了统计, 上述 3 个地磁活动水平分别占总观测时间的 26.67%, 67.73% 和 5.60%. 于是计算得到了每个地磁活动水平条件下场向电流的相对发生率. 如表 1 所示, 随着地磁活动的增强, 场向电流的相对发生率是增加的. 这说明场向电流变化与磁场扰动有着密切的关系, 地磁活动越剧烈, 与之相对应的场向电流也就越活跃, 不仅是场向电流密度会有明显的增强, 而且场向电流也会出现多层结构, 于是观测到的场向电流事件的几率也就越大.

图 3 为 2001 年 8 月 12 日, 8 月 17 日和 8 月 22 日这三天 ClusterII 卫星观测到的场向电流事件, 横坐标表示按事件出现先后排列的序号. 纵坐标分别给出了每个事件所对应的场向电流密度和相应的 Kp 指数. 通过图 3 看出, 2001 年 8 月 17 日 Kp 指数随场向电流密度增大而增大, 当 Kp 指数达到 5 (有磁暴发生, 同时伴有亚暴) 时, 场向电流密度也迅速增大至约 19.05 nA/m^2 . 2001 年 8 月 12 日和 8 月 22 日场向电流密度变化虽然不大 (最大不超过 5.56 nA/m^2), 但同样可以看出 Kp 指数大小与场向电流密度大小存在对应关系.

接下来, 我们对所选取的 172 个场向电流事件进行统计分析. 具体方法是按照 Kp 指数的大小把 FAC 事件分成不同的区间, 计算 FAC 密度的平均值, Kp 指数步长定为 1. 图 4 为 Kp 指数与场向电流密度大小的变化关系曲线. 可以看到当 $Kp < 4$ 时, 场向电流密度大小变化并不大, 其平均值都在 3.97 nA/m^2 附近.

表 1 根据 Kp 指数划分的不同地磁活动水平下的场向电流发生数目和相对发生率

Geomagnetic activity	Quiet	Weak disturbance	Strong disturbance
Kp index	$0 \leq Kp < 2$	$2 \leq Kp < 5$	$Kp \geq 5$
FACs cases number	19	137	16
Relative occurrence (%)	12.7	36.2	51.1

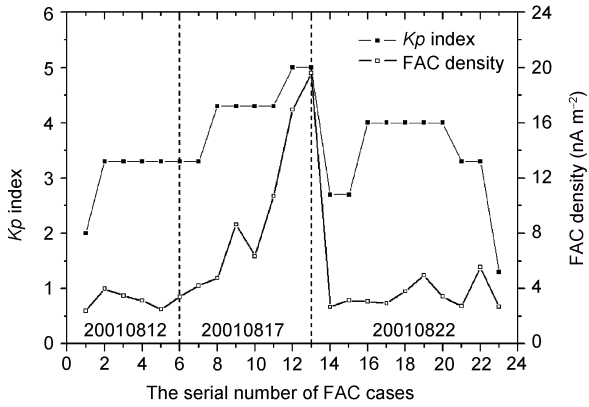


图 3 2001 年 8 月 12 日, 8 月 17 日和 8 月 22 日 ClusterII 卫星观测到的场向电流事件, 两条曲线分别为场向电流密度大小和 Kp 指数

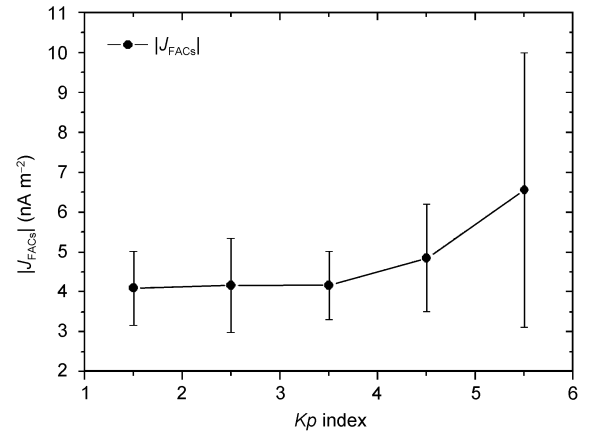


图 4 Kp 指数与场向电流密度大小变化关系曲线

当 $4 \leq Kp < 5$ 时, FAC 密度有了明显的增大, 大小约为 4.76 nA/m^2 . 当 $Kp \geq 5$ 时, 场向电流密度增幅更大, 电流密度约为 6.35 nA/m^2 .

通常认为, 数值大的 Kp 往往对应极区扰动. 图 4 显示, $Kp \geq 4$ 时, 对应磁尾等离子体片边界层的场向电流明显增大. 等离子体片边界层的场向电流与一区场向电流相连, 所以造成极区扰动及电流密度增加的一部分原因直接来自磁尾, 尤其当有磁暴和亚暴发生时, 集聚在磁尾的能量会通过场向电流、粒子沉降和对流电场等方式向地球两极传输, 产生极光, 引起电离层暴.

以往的一些研究, 往往根据极光光电集流指数 AE , AL 把地磁活动分成不同的水平, 研究不同地磁活动水平条件下场向电流的特性. 于是我们也按照 AE 指

数, 每 100 nT 作为一个统计区间, 计算每个区间内场向电流密度的平均值, 以及这些场向电流所对应 Kp 指数的平均值, 如图 5 所示.

图 5 显示, AE 指数在 $[0, 800)$ nT 范围内, 场向电流密度基本随 AE 指数的增大而增大, 尤其当 AE 指数在 $[600, 800)$ nT 范围内, 场向电流密度迅速增大, 在 $[700, 800)$ nT 范围内场向电流密度达到峰值. 但是当 AE 指数进一步增加大于 800 nT 时, 场向电流密度又降低了. 场向电流密度变化趋势和 AE 指数的变化趋势存在一定的差异, 表明二者之间并非存在简单的正相关关系. 图 5 还显示 Kp 指数平均值的变化与场向电流密度大小的变化符合的很好, 场向电流密度达到峰值时, Kp 指数也达到了最大值, 随后 Kp 指数下降, 场向电流密度大小也随之降低. 图 5 反映出, 磁尾等离子体片边界层场向电流与 Kp 指数的关系比与 AE 指数的关系更为密切, 主要是因为 Kp 是描述全球尺度地磁活动的指数, 而 AE 是仅仅描述极区地磁活动的指数.

3 结论和讨论

本文采用 ClusterII 四颗卫星的多点磁场数据, 采用“curlometer”技术计算场向电流, 从中选取了磁尾等离子体片边界层区 172 个场向电流事件, 研究了磁尾等离子体片边界层场向电流分别与地磁活动指数 Kp 和 AE 的关系, 并进行了分析比较, 结果如下.

1) 弱地磁扰动期间, 观测到的磁尾等离子体片边界层区场向电流事件数目最多. 但总的来说, 磁尾等离子体片边界层区场向电流的相对发生率却随地

磁活动的增强而增加的.

2) 等离子体片边界层区场向电流密度随 Kp 指数的增大而增大. 在磁暴的主相阶段, 场向电流迅速增大, 电流密度最大达到 19.05 nA/m^2 , 同时 Kp 增大至 5.

3) 地磁活动指数 Kp 与等离子体片边界层区场向电流密度有着一致的变化关系. 然而, 当 $AE < 800$ nT 时, 等离子体片边界层区场向电流密度随着 AE 的增加而增加; 当 $AE > 800$ nT 时, 场向电流密度随着 AE 的增加而减小.

本文的研究结果表明, 等离子体片边界层区场向电流密度与 Kp 指数的变化规律符合得很好. 从而说明, 等离子体片边界层场向电流密度与 Kp 指数的变化关系更为密切. 主要是因为 Kp 是描述全球尺度地磁活动的指数, 而 AE 是仅仅描述极区地磁活动的指数.

Maltsev 等人^[18]和 Artamonov 等人^[19]通过数值模拟的方法, 计算得到当 Kp 等于 5 时一区二区总电流强度大约为 $Kp=1.5$ 时总电流强度的两倍. 我们的研究表明, 强地磁扰动时等离子体片边界层场向电流的平均密度较地磁相对宁静时明显增大, 增大约 60%, 尤其在磁暴主相阶段更是观测到了非常大的场向电流密度, 电流密度达到了 19.05 nA/m^2 , 这时的 $Kp=5$. 这说明, 很强的场向电流发生在强磁扰动期间.

AE 指数表示东向电流引起的最大磁场扰动与西向电流引起最大磁场扰动绝对值之和. 导致 AE 指数变化的主要途径有以下三种: 行星际磁场与磁层顶磁场发生重联, 通过磁层顶场向电流等通道将太阳风的能量传输到电离层; 太阳风的能量通过极尖区直接进入电离层; 太阳风能量通过磁尾场向电流等通道进入电离层. 我们研究的磁尾等离子体片边界层的场向电流与极区电离层的一区电流相连, 磁尾等离子体片边界层的场向电流迅速增大, 必然使一区场向电流密度增大, 同时极区东西向电流强度也会随之增强, 造成极区磁场的强烈扰动. 从图 5 中可以看到, 当 AE 指数进一步增大, 大于 800 nT 时, 场向电流的密度并没有增大, 反而是降低的. 这说明此时导致 AE 指数增大的主要因素并不来自磁尾, AE 指数的增大可能是通过我们上面提到的另外两种途径. AE 指数仅反映极区扰动, 它和磁尾的场向电流密度并不存在单调递增的关系. 而结合图 4 和图 5, 可以看出磁尾等离子体片边界层场向电流与 Kp 指数的关系是单调递增的, 这主要是因为 Kp 指数用来描述

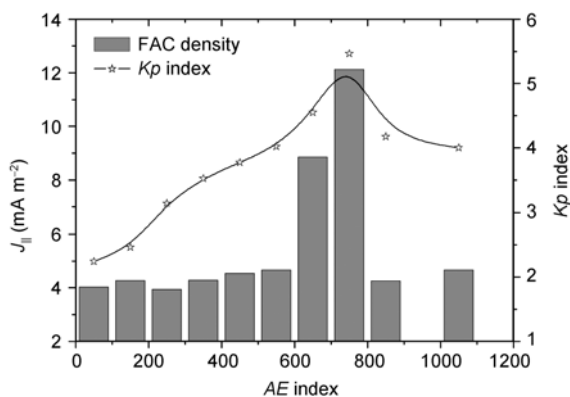


图 5 不同 AE 指数范围内场向电流密度大小及 Kp 指数的大小

全球尺度的地磁活动,而在磁尾磁场的扰动变化,特别是 B_y 的变化,会引起场向电流的变化,因而,较 AE 而言, Kp 的变化与等离子体片边界层区场向电流的变化有着直接的关系. Robinson 等人^[17]曾指出电离

层高度场向电流与 Kp 指数呈现出一种线性增加的关系. 而我们的研究表明, Kp 越大,磁尾等离子体片边界层的场向电流密度越大. 这与 Robinson 等人在电离层高度得出的结论基本是一致的.

致谢 中国 Cluster 数据中心提供 FGM, PEACE, CIS 仪器的探测数据,世界资料中心日本京都大学 C2 地磁中心提供地磁活动指数数据.

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 Geophys Res*, 1966, 66: 5033–5045
- 2 Schield M A, Freeman J W, Dessler A J. A source for field-aligned currents at auroral latitudes. *J Geophys Res*, 1969, 74(1): 247–256
- 3 Jaggi R V, Wolf R A. Self-consistent calculation of the motion of a sheet of ions in the magnetosphere. *J Geophys Res*, 1973, 78(16): 2852–2866
- 4 Lyatsky W B, Maltsev Y P, Leontyev S V. Three-dimensional current system in the different phases of a substorm. *Planet Space Sci*, 1974, 22(8): 1231–1247
- 5 Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by TRIAD. *J Geophys Res*, 1976, 81(A13): 2165–2174
- 6 Iijima T, Potemra T A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. *J Geophys Res*, 1978, 83(A2): 599–615
- 7 Iijima T, Potemra T A, Zanetti L J, et al. Large-scale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: A new Birkeland current system. *J Geophys Res*, 1984, 89(A9): 7441–7452
- 8 Potemra T A, Zanetti L J, Bythrow P F, et al. By-dependent convection patterns during Northward interplanetary magnetic field. *J Geophys Res*, 1984, 89(A11): 9753–9760
- 9 Erlanson R E, Zanetti L J, Potemra T A, et al. IMF By dependence of region 1 Birkeland currents near noon. *J Geophys Res*, 1988, 93(A9): 9804–9814
- 10 Fujii R, Iijima T, Potemra T A, et al. Seasonal dependence of large-scale Birkeland currents. *Geophys Res Lett*, 1981, 8(10): 1103–1106
- 11 Zhou X W, Russell C T, Le G. Local time interplanetary magnetic field by dependence of field-aligned currents at high altitudes. *J Geophys Res*, 2000, 105: 2533–2539
- 12 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
- 13 Chun F K, Russell C T. The evolution of field-aligned currents as a function of substorm phase. *J Geophys Res*, 1991, 96(A9): 15801–15810
- 14 Chun F K, Russell C T. Field-aligned currents in the inner magnetosphere: Control by geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 1997, 102(A2): 2261–2270
- 15 Sun W, Akasofu S I. A new field-aligned current index AF and its relation to the storm-time ring current and energetic neutral atom (ENA) emissions. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(10): 1480
- 16 Christiansen F, Papitashvili V O, Neubert T. Seasonal variations of high-latitude fieldaligned currents inferred from Ørsted and Magsat observations. *J Geophys Res*, 2002, 107(A2): 1029
- 17 Robinson R M. Kp Dependence of auroral zone field aligned current intensity. *J Geophys Res*, 1984, 89(A3): 1743–1748
- 18 Maltsev Yu P, Ostapenko A A. Fieldaligned currents in the ionosphere and magnetosphere. *Proc. of the Int. Symposium “Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations”*. Space Research Institute, Moscow, Russia, 2003
- 19 Artamono I V, Vasilyeva E V, Namgaladze A A, et al. On the electric potential pattern corresponding to region 2 field-aligned currents derived from the DE2 satellite measurements. *Physics of Auroral Phenomena: Proceedings of 29th Annual Seminar–Apatity*, 2006
- 20 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 Geophys Res*, 1988, 93: 9709–9720
- 21 Robert P, Dunlop M W. Accuracy of current density determination. In: Gotz P, Daly P W, eds. *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. Netherlands: ESA Publications Division, 1998. 395–418
- 22 Dunlop M W, Balogh A, Lassmeier K H. Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: the Curlometer. *J Geophys Res*, 2002, 107(A11): 1384
- 23 Shi J K, Cheng Z W. South-north asymmetry of field-aligned currents in the magnetotail observed by Cluster. *J Geophys Res*, 2010, 115(A07): 228
- 24 Ueno G, Ohtani S, Saito Y, et al. Field-aligned currents in the outermost plasma sheet boundary layer with Geotail observation. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1399