

何兆海, 刘振兴, 沈超等. Cluster 探测到磁尾等离子体注入的特征. 地球物理学报, 2008, 51(2): 307~315

He Z H, Liu Z X, Shen C, et al. Characters of the magnetotail plasma injection surveyed from Cluster observation. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(2): 307~315

Cluster 探测到磁尾等离子体注入的特征

何兆海^{1,2}, 刘振兴¹, 沈超¹, 段素平¹, 刘 晓³, 张永存^{1,2},
姚 丽^{1,2}, 宗秋刚⁴, H. Rème⁵, G. Gustafsson⁶

1 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 河南师范大学, 新乡 453007

4 CSP Boston University, Boston MA 02215 USA

5 Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 31028, Toulouse, France

6 Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden

摘 要 利用 Cluster 卫星 2001~2004 年磁尾运行期间 RAPID 仪器的数据, 确定了 115 例磁尾等离子体注入事件, 借助时序叠加法统计研究磁尾等离子体注入现象的特征. 注入事件主要分布于磁地方时夜晚 20 时至凌晨 04 时. 与同步轨道区观测到的粒子注入事件类似, 可以将磁尾粒子注入事件分成五类: (1) 只有离子注入; (2) 离子先于电子注入; (3) 离子和电子同时注入; (4) 电子先于离子注入; (5) 只有电子注入. 磁尾粒子注入时, 质子(能量范围 0~40 keV)的温度和数密度同时显著增加, 沿地球径向的传播速度也明显增大. 统计分析磁尾注入期间同时观测到的晨昏对流电场, 发现电场可分为两类: (A) 注入后电场突然增大, 电场强度为正; (B) 注入后电场突然增大, 电场强度为负. 利用磁层磁场(T89c)和电场(Volland-Stern)模型模拟粒子注入后赤道面的电漂移速度矢量. 模拟结果与统计结果基本一致, 表明晨昏对流电场引起的电漂移是驱动磁尾($-18R_E < R < -10R_E$)等离子体沿地球径向注入的机制之一.

关键词 磁尾等离子体注入, 晨昏对流电场, T89c 磁场, Volland-Stern 电场, 电漂移

文章编号 0001-5733(2008)02-0307-09 中图分类号 P353 收稿日期 2007-07-27, 2007-12-28 收修定稿

Characters of the magnetotail plasma injection surveyed from Cluster observation

HE Zhao-Hai^{1,2}, LIU Zhen-Xing¹, SHEN Chao¹, DUAN Su-Ping¹, LIU Xiao³,
ZHANG Yong-Cun^{1,2}, YAO Li^{1,2}, ZONG Qiu-Gang⁴, H. Rème⁵, G. Gustafsson⁶

1 State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

4 CSP Boston University, Boston MA 02215 USA

5 Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse 31028, France

6 Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden

Abstract The properties of proton ($0 \text{ eV} < E < 40 \text{ keV}$) in the plasma sheet are examined by means of a superposed epoch analysis, using 115 magnetotail plasma injection events which are identified from Cluster magnetotail orbit time in between 2001 and 2004. All events distribute in magnetic local time from 20 p.m. to

基金项目 国家自然科学基金重大项目(40390150), 国家自然科学基金项目(40674094), 国家重点基础研究规划项目(2006CB806305), 优秀国家重点实验室研究项目(40523006)共同资助.

作者简介 何兆海, 男, 1978 年生, 中国科学院空间科学与应用研究中心博士研究生, 主要从事磁层等离子体注入方面的研究.

E-mail: he-zh@cssar.ac.cn

04 a. m. Five classes of magnetotail injection events are found to be similar with the geosynchronous observation: (1) pure ion injections; (2) ion injections followed a few minutes later by an electron injection; (3) simultaneous ion and electron injections; (4) electron injections followed a few minutes later by an ion injection; (5) pure electron injections. Proton shows a significant increase in temperature and density at the onset, and injects earthward with an increasing velocity more than the pre-injection average one. Superposed epoch analysis on the simultaneous observation data of dusk-dawn electric field from the EFW (Electric Field and Waves) instrument, we found two different electric field configurations: (1) electric field increases suddenly at the onset and the value is positive; (2) electric field changes the direction at the onset, and turns into a negative value. The simulation results of velocity vector after injection in equatorial plain, calculated in static magnetic (T89c) and electric (Volland-Stern) field models, agree with the statistical results mostly, and that suggests the electric drift caused by dawn-dusk convection electric field is one of the mechanisms of the particles injected earthward in magnetotail ($-18R_E < R < -10R_E$).

Keywords Magnetotail plasma injection, Dawn-dusk convection electric field, T89c magnetic field, Volland-Stern electric field, Electric drift

1 引言

同步轨道区等离子体注入现象是指不同能量段粒子的通量突然增加,几乎所有的磁层亚暴都伴随着等离子体注入过程,因此粒子注入被认为是磁层亚暴的基本特征之一,也是确定亚暴触发时间的标志之一.早期“等离子体注入边界”概念的提出解决了不同能量段粒子注入时间存在延迟的问题^[1,2],随后注入边界发展到双螺旋结构,解释了更多单螺旋边界无法解释的色散注入现象^[3,4]。“Alfvén 层”的引入更好地解决能量粒子色散注入以及磁层亚暴膨胀相期间电子质子通量减少的问题^[5,6].

同步轨道区等离子体注入现象的统计研究表明粒子无色散注入可分为五类事件,基于五类事件定义了一种新的注入边界,粒子注入时电子和质子温度、动压明显上升,等离子体的各向异性也随之变化,但数密度没有明显变化^[7].等离子体在磁层电磁场的作用下从磁尾向内磁层注入,同步轨道附近注入的速度大概为 24 km/s ^[8],因而部分学者利用地向传播的感应或脉冲电场外加磁场模型,数值模拟重现同步轨道区观测到的注入现象^[9-12].

比较研究磁暴期间和地磁平静期间发生的离子注入事件的能量成分可以提供地球电离层和太阳风参与磁层过程的依据^[13].磁层亚暴期间,粒子沿地球径向注入,同时观测到磁尾(约 $10 \sim 20 R_E$)的等离子体特征表现为温度明显上升,而数密度在磁亚暴触发后逐渐减少^[14,15].目前对等离子体注入的研究主要集中在同步轨道区,但是对磁尾类似于同步

轨道区的等离子体注入现象国内外尚未有见报道.

磁尾等离子体注入定义为:磁层亚暴期间磁尾不同能量段的等离子体通量的突然增加.考虑到磁尾等离子体注入和同步轨道区注入的相似性,本文对注入标准的选择类似于 Birm 研究同步轨道等离子体注入现象的标准^[7].磁尾等离子体注入事件选择基于以下五个标准(1)两相邻能量段的通量水平要高于注入前至少 1 个对数数量级(即注入后要比注入前平均值大 10 倍以上),而且注入持续时间大于 15 min (2)每例注入事件前后 1 小时内没有其他的注入现象发生(3)能确定明显的触发时间(排除色散注入事件,即排除不同能量段的粒子通量增加有时间延迟的事件)(4)注入后通量达到最高值的过程不超过 15 min (5)事件的时间范围选取粒子注入前后各 1 小时.

本文利用 Cluster 卫星(2001~2004)磁尾运行期间的数据,重点研究磁尾探测到的与磁层亚暴有关的等离子体注入现象,包括注入期间质子(能量范围 $0 \sim 40 \text{ keV}$)的变化特征、同时观测到的晨昏对流电场特性,以及晨昏电场对粒子注入的影响.

2 观测分析

磁尾注入事件是通过 Cluster 卫星磁尾运行期间 RAPID (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors) 仪器^[16]的粒子积分通量数据确定的,质子的能量范围分为大于 27 keV 和大于 95 keV 两个能量段,电子的能量范围分为大于 50 keV 和大于 95 keV 两个能量段.

CIS (Cluster Ion Spectrometry) 仪器^[17]主要观测热离子、质子以及重离子的数密度、温度和速度参数。热离子能量的范围为 5 eV ~ 32 keV, 质子的能量范围为 0 eV ~ 40 keV, 主要研究磁尾等离子体注入前后质子的变化特征。

EFW (Electric-Field and Wave experiment) 仪器^[18]主要记录晨昏向电场的强度、电场变化的方差以及

电场谱密度。利用 EFW 仪器提供的晨昏向电场数据来研究注入期间电场的特性, 以及晨昏对流电场对磁尾等离子体注入的影响。本文所用数据的时间分辨率均为 60 s。

2.1 Cluster 卫星探测到的五类注入事件

根据上述事件选择的标准, 从 Cluster 卫星磁尾轨道期间 RAPID 仪器的通量数据确定了 115 例磁尾

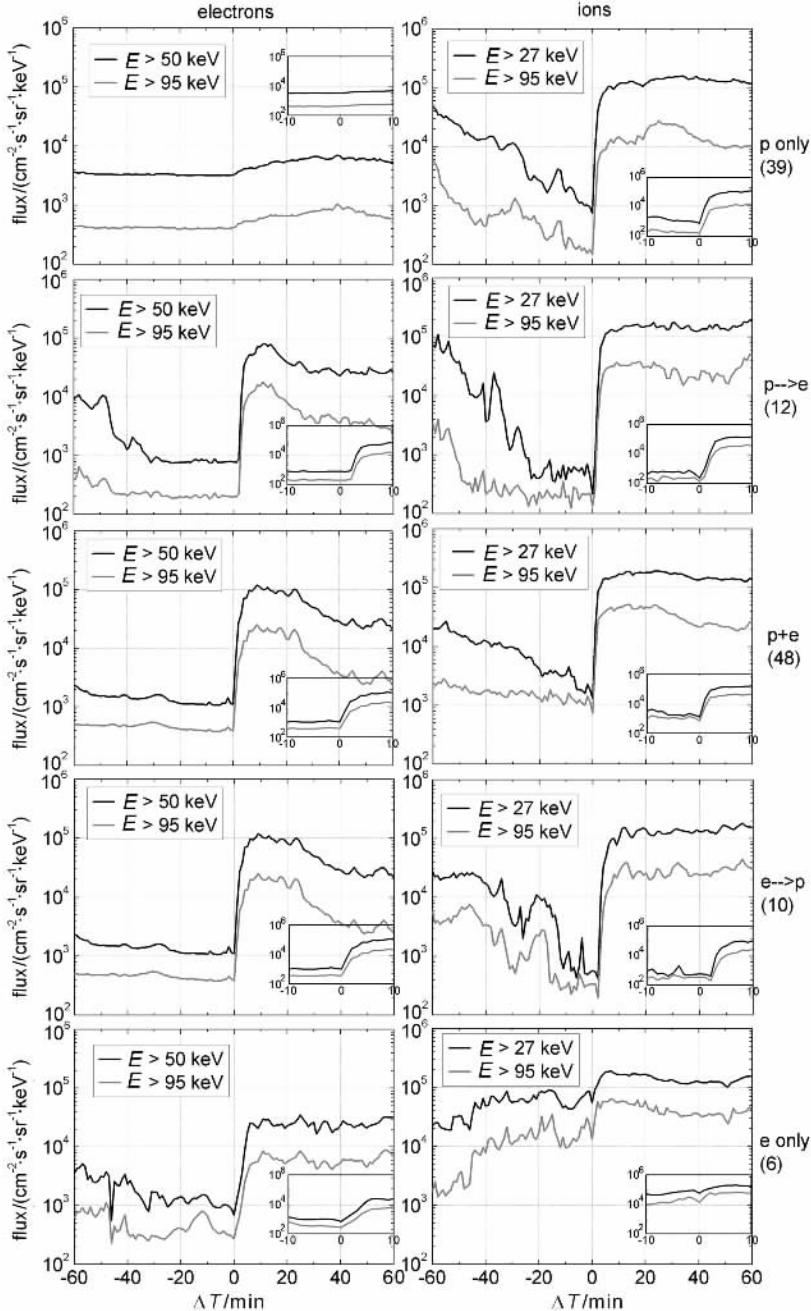


图 1 115 例注入事件时序叠加后电子(左)和离子(右)的平均通量。时序叠加的零点为通量突然增加的时刻, 垂直的五幅图对应于文中的五类事件。每幅图所配对的小图是等离子体注入前后 10 min 的放大图。

Fig. 1 Average fluxes of electrons (left) and ions (right) from superposed epoch analysis of 115 injection events. The zero epoch time is defined as the onset of the flux increase in text. The five vertical plots correspond to the five categories of events defined in text. The small pictures attached are the expanded view of ten minutes before and after the injection onset.

等离子体注入事件,而且把这些事件分为五类 (A) 39 例离子注入事件,只有离子符合选择标准 (B) 离子先注入,随后电子注入,时间延迟为 2 min,这类事件有 12 例 (C) 48 例离子和电子同时注入事件,没有时间延迟 (D) 电子先注入,离子落后电子约 3 min 后注入,这类事件有 10 例 (E) 6 例电子注入事件,只有电子符合选择标准.图 1 从上至下依次表示时序叠加后磁尾五类注入事件电子和离子通量的平均变化,每幅图所配对的小图是等离子体注入前后 10 min 的放大图.

时序叠加的零点定义为粒子通量突然增加的触发时间 (A)(B)和(C)三类事件的时序叠加零点为离子注入的触发时间 (D)和(E)两类事件的零点为电子注入的触发时间.对于(A)类纯粹的离子注入事件,离子通量在零点突然增大两个量级,电子通量只有很细微的抬升 (B)(C)和(D)三类事件电子和离子的通量都增大两个量级 (E)类为纯粹的电子注入事件,电子通量的变化很明显,离子通量有变化,但在零点没有明显的突增.整体上看,电子在注入前,通量变化不是很明显,相对维持一个水平不变,而离子通量在注入前有逐渐减少的趋势.注入后的粒子通量基本上都要比注入前大两个量级(100倍)左右.

图 2 表示五类注入事件随磁地方时变化的分布情况,空心条形表示所有注入事件,其磁地方时分布集中于夜晚 20 时至凌晨 04 时;实心条形表示五类不同注入事件随磁地方时的分布情况.(A)(C)和(E)类事件随磁地方时的分布发现存在电子东漂和离子西漂所引起的注入边界的漂移,类似于同步轨道区粒子注入现象的研究结果^[7,49].

2.2 磁尾注入期间质子的特征

将时序叠加法应用于质子的温度和数密度参数,结果如图 3 所示.除了(E)类事件外,质子的温度和数密度在注入前后都有明显变化;注入前质子温度平均低于 5.0 MK,注入后急剧上升至 40.0 MK;注入前质子数密度约 0.02 cm^{-3} ,注入后增加到 0.06 cm^{-3} 甚至更高.对于(E)类纯粹的电子注入事件,图 3 底图显示注入时质子温度和数密度都没有明显的变化趋势,但质子数密度在注入前后都有震荡,而且平均水平要明显大于前四类的注入事件;温度在注入前后维持在 20.0 MK 左右.

图 3 中质子数密度和温度有微弱的时间偏移可能是由于等离子体参数与通量变化有时间延迟造成的,但能反映粒子通量变化与质子温度、数密度的变

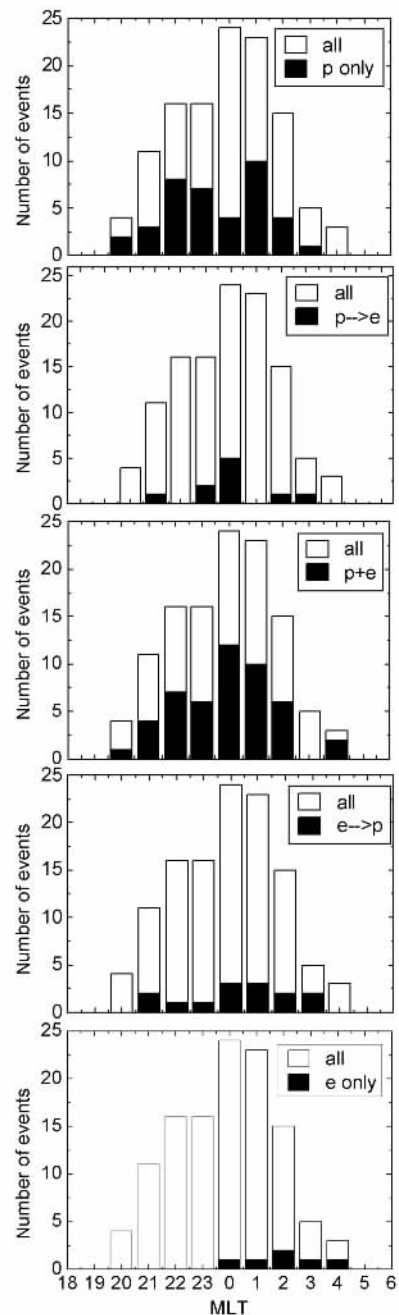


图 2 115 例磁尾无色散注入事件随磁地方时分布情况. 实心条分别表示五类注入事件,由上至下分别为:离子注入;离子先注入电子后注入;离子和电子同时注入;电子先注入离子后注入;电子注入.空心条表示所有注入事件随磁地方时分布情况.

Fig. 2 Magnetic Local Time distribution of 115 injections observed by Cluster

The solid bar in the five plots correspond to five categories of events, as mentioned in text, (from top to bottom) pure ion injections, ion injections followed a few minutes later by an electron injection ($p \rightarrow e$), simultaneous ion and electron injections ($p + e$), electron injections followed a few minutes later by an ion injection ($e \rightarrow p$), pure electron injections. The open bars show the total number of events in each Magnetic Local Time.

化存在良好的相关性.

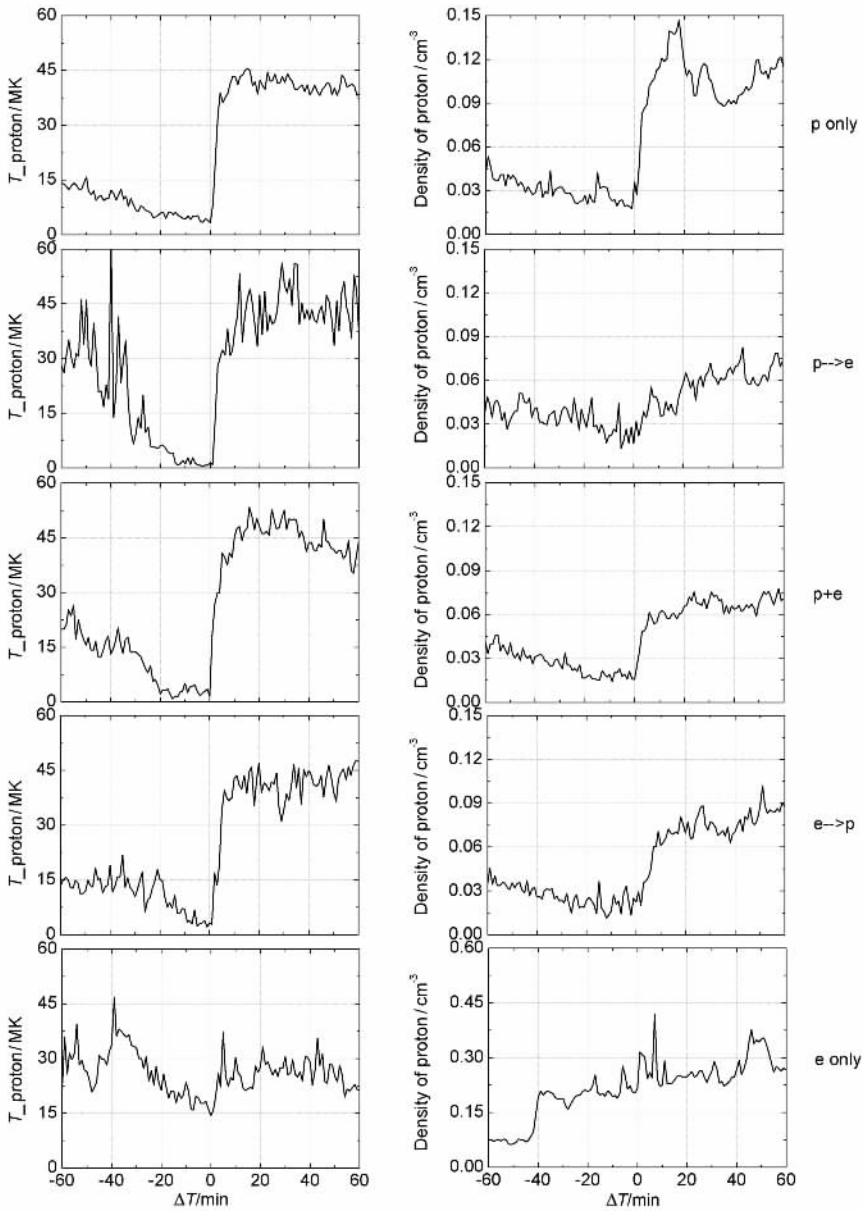


图 3 五类注入事件时序叠加后质子平均温度(左)和平均数密度(右)

Fig. 3 Average temperature(left) and density(right) of proton from the superposed epoch study
The five plots in each column again represent the five categories as indicated at the right of density figure.

图 4 是磁尾注入事件期间时序叠加质子 x 方向(指向太阳)速度的结果,注入前质子持续沿尾向运动,速度基本维持在 50 km/s 以内;注入后粒子沿地球径向运动,质子的平均速度约 200 km/s,注入后速度恢复到注入前的水平大概需要 20 min 左右.对于 x 方向速度而言,磁尾粒子注入事件与 BBF 高速流事件很类似,但注入速度与 BBF 高速流($V_i > 400$ km/s)还是有一定的差距,很可能是 BBF 传播一定距离后演化而成.

2.3 磁尾注入期间晨昏对流电场的特征

图 5 是全部 115 例磁尾等离子体注入前后晨昏

电场时序叠加后的结果.注入前晨昏电场基本维持在 0~1 mV/m 之间作震荡变化,注入后电场有两种变化:(A)电场突然增大,电场强度为正,幅值达到 3.0 mV/n(图 5a);(B)电场突然反向,电场强度为负,幅值降至 -1.5 mV/n(图 5b).注入前后晨昏对流电场变化显著,下面将具体讨论晨昏电场对磁尾等离子体注入的贡献.

3 晨昏对流电场对磁尾注入的影响

注入前后晨昏电场的变化与粒子注入有良好的

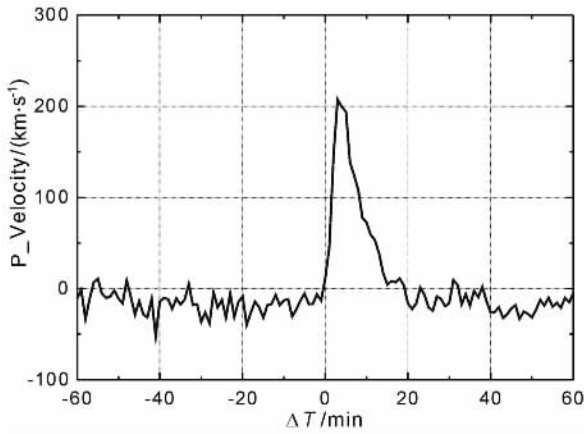


图 4 注入前后 1 小时内质子沿 x 方向速度时序叠加的平均值

Fig. 4 Average x-direction velocity by method of superposed epoch analysis on proton data prior to and after injection for an hour each

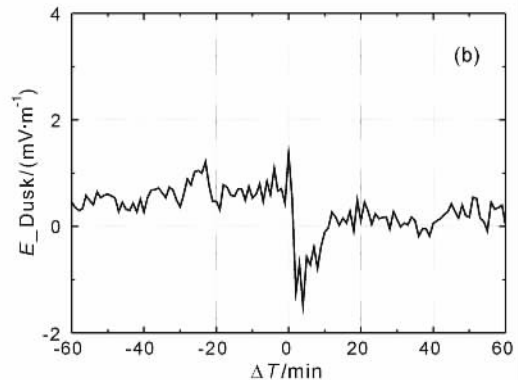
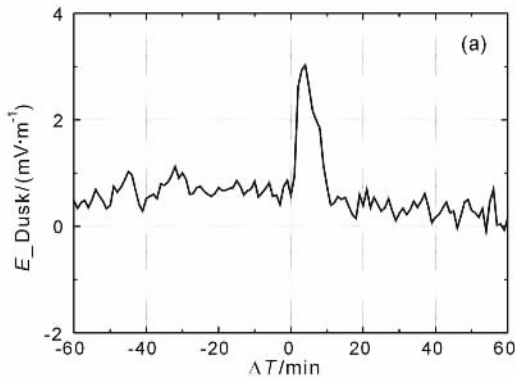


图 5 磁尾粒子注入期间时序叠加后的两种不同的电场结构

Fig. 5 The two different configurations of electric field from superposed epoch analysis on EFW instrument of Cluster

化. 图 6c 反映注入后质子赤道面速度矢量的结果, x 方向速率明显增加, 大部分质子在强电磁场的作用下以约 200 km/s 的速率沿地球径向注入.

3.2 注入后赤道面速度矢量的数值模拟结果

利用磁层磁场 (T89c)^[23] 和电场 (Volland-Stern)^[24] 模型模拟计算粒子注入后赤道面的电漂移速度矢量场. T89c 磁场包括磁层和电离层电流体系产生的外部磁场和地球发电机电流产生的内部磁场.

Volland-Stern 电场是由旋转的高层大气促使电离层等离子体共转导致离子和电子中性碰撞而产生的共转电场和屏蔽的越尾电场叠加而成, 表达式为

$$U(r, \varphi) = \frac{C}{r/R_E} - A \left(\frac{r}{R_E} \right)^\gamma \sin \varphi, \quad (1)$$

式中共转常数 $C = \Omega_E B_E R_E^3 = -92.4 \text{ kV}$; R_E 为地球

相关性, 本文利用粒子在晨昏对流电场外加磁层磁场模型作用下的漂移特征去探讨磁尾等离子体注入的物理过程^[20, 21], 讨论晨昏电场对粒子注入的贡献究竟有多大.

3.1 注入前后赤道面速度矢量的统计特征

选取 GSM 坐标系, 统计的空间尺度为赤道面 $2R_E \times 2R_E$ 网格, 时序叠加注入前后 10 min 的速度矢量如图 6 所示. 图 6a 表示注入前质子在赤道面速度矢量场的分布情况; 注入前大部分质子沿 y 方向运动的速率要比 x 方向大, 说明质子几乎沿晨昏向运动, 质子流的速率大概 50 km/s 左右; 图 6b 是 Angelopoulos (1996) 利用 AMPTE/IRM 卫星数据统计磁静、没有 BBF 高速流期间粒子流在赤道面速度矢量的结果^[22]; 两者差异较大, 注入前粒子状态可能已经偏离磁静期, 磁层电磁场的扰动使得磁静期规则的等离子体流已经向注入前不规则的粒子流演

半径; $A = \frac{0.045}{(1 - 0.159K_p + 0.0093K_p^2)} \text{ kV}$; K_p 为地磁活动指数; $\varphi = 0^\circ$ 定义为指向太阳, $\varphi = 90^\circ$ 指向昏侧. 本文取 $\gamma = 1$, $K_p = 5.0$. 地磁指数 $K_p = 5.0$ 时对应的 $A = 1.94 \text{ kV}$.

赤道面电漂移速度矢量场的模拟结果如图 6d 所示, $-18R_E < x < -10R_E$ 部分, 电漂移速度模拟结果与统计结果有很好的—致性; $x > -10R_E$ 部分, 模拟的速率结果小于统计结果; $x < -18R_E$ 部分, 模拟的速率结果大于统计结果. 造成这个结果的原因可能是 Volland-Stern 电场模型随径向距离的增加而单调递增, 与实际观测电场有差异. 模拟的结果说明磁尾 $-18R_E < x < -10R_E$ 范围内, 晨昏对流电场所引起的电漂移速度足以驱动粒子沿地球径向注入.

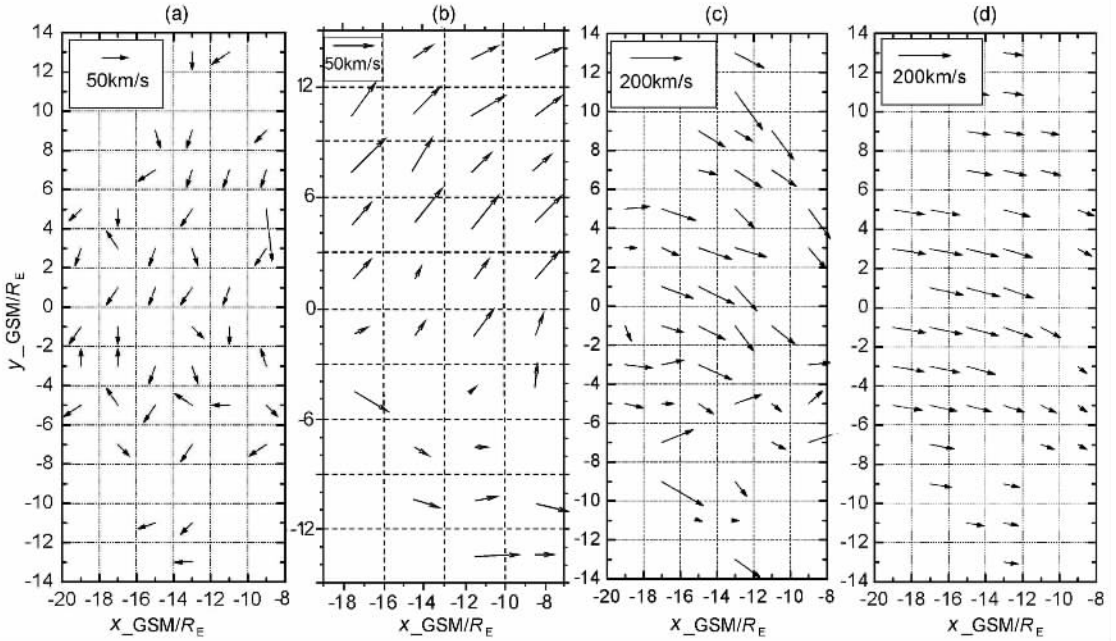


图 6 (a) 粒子注入前赤道面速度矢量时序叠加的结果 (b) 磁静期间赤道面速度矢量统计的结果

[参考 Angelopoulos(1996)图 5](c) 粒子注入后赤道面速度矢量时序叠加的结果;

(d) 利用 T89c 磁场和 Volland-Stern 对流电场模拟粒子注入后赤道面电漂移速度分布情况

Fig. 6 (a) Results of the velocity vector distribution in equatorial plain prior to the injection

by means of a superposed epoch analysis;(b) Statistical results of velocity vector in equatorial plain in quiet time and non-BBF period referred from Angelopoulos(1996) Fig. 5;

(c) Velocity vector distribution in equatorial plain after the injection;(d) Simulation result of $E \times B$ velocity vector distribution with the T89c magnetic field model and Volland-Stern dawn-dusk electric field model

4 讨论

磁尾等离子体注入事件与同步轨道区注入事件有相似性,但也存在差异.磁尾注入事件的磁地方时分布集中于夜晚 20 时至凌晨 04 时,而同步轨道区注入分布于夜晚 18 时至凌晨 06 时,这主要取决于卫星的轨道.磁尾注入前后通量增加的幅度一般是两个量级,即注入后粒子通量是注入前的 100 倍;同步轨道增加的幅度通常为一个量级,也就是注入后粒子通量是注入前的 10 倍左右.

磁尾注入期间质子温度大幅度增加类似于同步轨道区的观测结果,但质子数密度显著增加,与同步轨道观测到的注入前后粒子的数密度变化不大^[7]的结果有明显区别;而且与 ISEE 卫星在磁尾观测到的磁亚暴膨胀相期间中心等离子体片密度减少^[14,15]的结论也不一致.可能的解释是磁层亚暴期间,中心等离子体片密度减少,大量粒子在晨昏电场和磁层磁场作用下沿地向运动被 Cluster 观测到,因而表现出数密度增加.粒子继续向内磁层注入,至同步轨道区

的过程中有很多机制包括粒子散射、波粒相互作用等使得粒子的注入和散射达到一个平衡.

注入期间观测到晨昏电场的倒转,即(B)类电场位形(图 5b).假设电场 $E = E_B + \delta E e^{-i\omega t}$, E_B 是等离子体片对太阳风响应的背景电场, δE 是空腔调制.磁层亚暴膨胀相期间, $E_B \approx 0.2 E_{sw}$, E_{sw} 是太阳风进入尾瓣区的电场,当背景电场 E_B 随着 E_{sw} 的减小而减小,那么 δE 很容易就增大使电场翻转.电场的翻转可能是由电漂移驱动的不稳定性或气球模不稳定性造成的,也可能是 Kelvin-Helmholtz 不稳定性造成的^[25,26].

卫星观测到注入前晨昏电场在 $0 \sim 1$ mV/m 之间变化,而粒子主要沿尾向运动.考虑到 $V = \frac{E \times B}{B^2}$,

其中 $V_x = \frac{E_y B_z - E_z B_y}{B^2}$,因此只有在 $E_y B_z < E_z B_y$ 情

况下才能得到粒子沿尾向运动的结果.粒子流速度和磁场数据的分析结果表明存在电场 z 分量而其满足上述情况,所以注入前存在 z 方向上的电场分量可能是导致粒子沿尾向运动的主要原因.

晨昏电场的关系式可表示为 $E_y = -(V \times B)_y$, $= V_x B_z - V_z B_x$, 要得到图 5a 所示的电场位形, 且当 V_x 沿地向逐渐增大, 需要满足条件 $V_x B_z > V_z B_x$, 对磁场和粒子数据分析结果表明满足上述的条件; 同样, 当 V_x 增大时, 且满足关系式 $V_x B_z < V_z B_x$, 可以得到与图 5b 一致的电场位形, 数据计算结果吻合关系式 $V_x B_z < V_z B_x$, 而且发现电场反向时, 粒子 V_z 速度分量更大, 有些注入事件 V_z 要比 V_x 大 3~4 倍. 因此两种不同位形的电场可能对应于不同的磁尾注入机制. 电场为正时, 利用磁层磁场 (T89c) 和电场 (Volland-Stern) 模型模拟计算发现赤道面大部分粒子电漂移运动的方向和大小与统计的结果都比较吻合, 晨昏对流电场所引起的电漂移可以解释部分磁尾粒子注入. 电场为负时, 由于粒子 z 方向的速度分量明显增大, 说明粒子沿磁力线的沉降作用可能是电场反向时磁尾注入的机制. 计算注入时 β 值 ($\beta = \frac{2\mu_0 P}{B^2}$, μ_0 表示真空磁导率, P 指的是热压, B 表示磁场强度) 的变化, 发现部分事件 (约占所有事件的 1/3) 发生时, β 值的特征由等离子体片变化到等离子体边界层, 这可能是由于等离子体片拍动, 使卫星穿越等离子体片边界层进入等离子体片, 导致粒子通量显著增加. 这类事件严格来说不是注入事件, 它们是卫星穿越不同磁层结构的结果.

5 结 论

利用 Cluster 卫星在磁尾运行期间的数据, 统计研究磁尾等离子体注入现象, 结果表明注入事件的磁地方时分布集中于夜晚 20 点至凌晨 04 点; 与同步轨道区观测到的粒子注入事件类似, 可以将磁尾粒子注入事件分成五类: (1) 只有离子注入; (2) 离子先于电子注入; (3) 离子和电子同时注入; (4) 电子先于离子注入; (5) 只有电子注入. 注入前后粒子通量的增幅比同步轨道观测到的高 10 倍; 质子的温度、数密度伴随着粒子注入同时增加. 注入前晨昏对流电场主要表现为 0~1 mV/m 之间的震荡变化, 注入后电场有两种变化: (A) 电场突然增大, 电场强度为正, 幅值达到 3.0 mV/m; (B) 电场突然反向, 电场强度为负, 幅值降至 -1.5 mV/m.

注入前后沿 x 方向的速度变化明显: 注入前质子持续沿尾向运动, 速率基本维持在 50 km/s 以内, 注入后质子沿地向运动, 质子的平均速率约 200 km/s, 注入后速度恢复到注入前的水平大概需要 20 min

左右.

五类磁尾注入事件可能有三种不同的物理机制. 电场为正时, 观测到的赤道面速度矢量表明注入前大部分粒子沿晨昏向运动, 注入后大部分粒子沿地向偏晨侧方向运动. 本文利用磁层磁场 (T89c) 和电场 (Volland-Stern) 模型模拟计算粒子注入后赤道面的速度矢量分布, 发现大部分粒子电漂移运动的方向和大小与观测统计的结果都比较吻合, 说明晨昏对流电场所引起的电漂移是磁尾粒子注入的机制之一; 电场反向时, 粒子 z 方向的速度分量明显增大, 而且要大于 x 方向的速度分量, 这类事件的注入机制可能是粒子沿磁力线沉降导致大量粒子堆积. 等离子体 β 值论证发现 1/3 事件的 β 值特性由等离子体片变化到等离子体边界层, 这可能是由于等离子体片拍动, 使卫星穿越等离子体片边界层进入等离子体片, 导致粒子通量显著增加. 本文的研究主要基于质子, 关于注入时电子的特征、磁尾注入过程与同步轨道区注入的联系, 以及后两种可能的磁尾等离子体注入机制我们将在后续的工作中深入地讨论.

参考文献 (References)

- [1] McIlwain C E. Substorm injection boundaries. In: McCormac B M ed. Magnetospheric Physics. D Reidel, Norwell, Mass., 1974. 143~154
- [2] Mauk B H, McIlwain C E. Correlation of K_p with the substorm-injected plasma boundary. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**: 3193~3196
- [3] Konradi A, Semar C L, Fritz T A. Substorm-injected protons and electrons and the injection boundary model. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**: 543~552
- [4] Mauk B H, Meng C I. Characterization of geostationary particle signatures based on the "injection boundary" model. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 3055~3071
- [5] Kivelson M G, Kaye S M, Southwood D J. The physics of plasma injection events. In: Akasofu S I ed. Dynamics of the Magnetosphere. D Reidel, Hingham, Mass., 1980. 385~405
- [6] Hultqvist B, Borg H, Holmgren L, et al. Quiet-time convection electric field properties derived from KeV electron measurements at the inner edge of the plasma sheet by means of GEOS 2. *Planet. Space Sci.*, 1982, **20**: 261~283
- [7] Birn J, Thomsen M F, Borovsky J E, et al. Characteristic plasma properties during dispersionless substorm injections at geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 2309~2324
- [8] Reeves G D, Henderson M G, McLachlan P S, et al. Radial propagation of substorm injections. In: Proceedings of the Third International Conference on Substorms, Versailles, France, 12-17 May 1996. Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-389, 1996.

579 ~ 584

- [9] Li X , Roth I , Temerin M , et al. Simulation of the prompt energization and transport of radiation particles during the March 23 , 1991 SSC. *Geophys. Res. Lett.* , 1993 , **20** : 2423 ~ 2426
- [10] Li X , Baker D N , Temerin M , et al. Simulation of dispersionless injections and drift echoes of energetic electrons associated with substorms. *Geophys. Res. Lett.* , 1998 , **25** : 3763 ~ 3766
- [11] Li X , Sarris T E , Baker D N , et al. Simulation of energetic particle injections associated with a substorm on August 27 , 2001. *Geophys. Res. Lett.* , 2003 , **30** : doi :10.1029/2002GL015967
- [12] Zaharia S , Bim J , Friedel R H W , et al. Substorm injection modeling with non-dipolar , time-dependent background field. *J. Geophys. Res.* , 2004 , **109**(A10) , A10211 , 2004JA010464
- [13] 傅绥燕 , 宗秋刚 , 濮祖荫等. 地磁活动与太阳活动对于环电流离子成分与位置的影响. *地球物理学报* , 2003 , **46**(6) : 725 ~ 730
Fu S Y , Zong Q G , Pu Z Y , et al. Effect of geomagnetic activity and solar-cycle variation on the ring current ions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2003 , **46**(6) : 725 ~ 730
- [14] Baumjohann W , Paschmann G , Nagai T , et al. Superposed epoch analysis of the substorm plasma sheet. *J. Geophys. Res.* , 1991 , **96** : 11605 ~ 11608
- [15] Huang C Y , Frank L A , Rostoker G , et al. Nonadiabatic heating of the center plasma sheet at the substorm onset. *J. Geophys. Res.* , 1992 , **97** : 1481 ~ 1495
- [16] Wilken B , Afford W I , Daglis I , et al. RAPID : the imaging energetic particle spectrometer on Cluster. *Space Sci. Res.* , 1997 , **79** : 399 ~ 473
- [17] Reme H , Bosqued J M , Sauvaud J A , et al. The Cluster Ions Spectrometry (CIS) experiment. *Space Sci. Rev.* , 1997 , **79** : 303 ~ 350
- [18] Gustafsson G , Boström R , Holback B , et al. The electric field and wave experiment for the Cluster mission. *Space Sci. Rev.* , 1997 , **79** : 137 ~ 156
- [19] Reeves G D , Belian R D , Fritz T A. Numerical tracing of energetic particle drifts in a model magnetosphere. *J. Geophys. Res.* , 1991 , **96** : 13997 ~ 14008
- [20] Roederer J G , Zähringer J. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Berlin : Springer-Verlag , 1970
- [21] Wang C , Lyons L R , Chen M W , et al. Modeling the quiet time inner plasma sheet protons. *J. Geophys. Res.* , 2001 , **106**(A4) : 6161 ~ 6178
- [22] Angelopoulos V. The role of impulsive particle acceleration in magnetotail circulation. In : Proceedings of the Third International Conference on Substorms (ICS - 3) , Eur. Space Agency Spec. Publ. , ESA SP-389 , 1996. 17 ~ 22
- [23] Tsyganenko N A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail plasma sheet. *Planet. Space Sci.* , 1989 , **37** : 5 ~ 20
- [24] Volland H. A semiempirical model of large-scale magnetospheric electric fields. *J. Geophys. Res.* , 1973 , **78** : 171 ~ 180
- [25] Pu Z Y , Kang K B , Korth A , et al. Ballooning instability in the presence of a plasma flow : a synthesis of tail reconnection and current disruption models for the initiation of substorms. *J. Geophys. Res.* , 1999 , **104**(A5) : 10235 ~ 10248
- [26] Roux A , Perraut S , Robert P , et al. Plasma sheet instability related to the westward traveling surge. *J. Geophys. Res.* , 1991 , **96** : 17697 ~ 17714

(本文编辑 何 燕)