0254-6124/2007/27(1)-013-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yao Li, Liu Shaoliang, Liu Kai, Jin Shuping, Liu Zhenxing, Shi Jiankui. Jointly study on flux transfer events using the data observed by TC-1 and Cluster near dayside magnetopause. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(1): 13~18

TC-1 和 Cluster 对向阳侧磁层顶通量传输事件的联合观测研究 *

姚 丽[1] 刘绍亮[1] 刘 凯[1] 金曙平[1] 刘振兴[2] 史建魁[2]

[1](中国科学技术大学地球与空间科学学院 合肥 230026)
[2](中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要 2004 年 2 至 4 月期间, 探测一号 (TC-1) 卫星和 Cluster 卫星有 25 次同时处在向阳侧磁层顶附近的磁鞘内, TC-1 卫星在低纬区, Cluster 卫星在中高纬区. 利用这一期间两卫星探测到的 27 个通量传输事件 (FTE), 分析行星际磁场 (IMF) 横向分量 $B_{\mathrm{T}} = \{B_y, B_z\}$ 对磁层顶重联发生位置的影响, 以及分量重联的观测事实, 得到如下主要结果. (1) 当 IMF 南向分量 B_z 占优势 ($|B_z| > |B_y|$) 时, FTE 大多 (约占 87.5%) 能在低纬观测到, 而当 IMF B_y 分量占优势 ($|B_z| < |B_y|$) 时, 则 FTE 大部分能在中高纬观测到 (占 84.2%); (2) 很少观测到相关联的事件 (关联事件指在低纬生成的 FTE, 向高纬运动中先后被 TC-1 卫星和 Cluster 卫星探测到的事件), 表明在低纬形成的 FTE 可能大多沿磁层顶两侧滑向磁尾, 只有少数可能运动到高纬地区; (3) 中纬地区探测到的 FTE 大多是以分量重联方式产生于该区, 而非来自磁赤道附近成对形成的 FTE.

关键词 通量传输事件; Cluster 观测; TC-1 观测; 磁场重联

中图法分类号 P 353

Jointly Study on Flux Transfer Events Using the Data Observed by TC-1 and Cluster Near Dayside Magnetopause

YAO Li[1] LIU Shaoliang[1] LIU Kai[1] JIN Shuping[1] LIU Zhenxing[2] SHI Jiankui[2]

[1](*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)
[2](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract One of the Double Star satellite TC-1 and Cluster both in the magnetosheath near the dayside magnetopause amount to 25 times from February to April, 2004, when TC-1 in the low latitude and Cluster in the middle or high latitude region. 27 Flux Transfer Events (FTEs) had been detected by these satellite during that interval. This paper analyzed the influence of the transverse component of the Interplanetary Magnetic Field (IMF) on the position at the magnetopause where the reconnection occurs, and searched the evidence of component reconnection. The main results are as follows: (1) when IMF southward component B_z is dominate ($|B_z| > |B_y|$), 87.5% of FTEs were detected at low latitude by TC-1, but when IMF $|B_z| < |B_y|$, most FTEs (about 84.2%) were

* 国家自然科学基金项目 (40574061) 和国家自然科学基金重大项目 (40390150) 共同资助
2006-04-15 收到原稿, 2006-07-26 收到修定稿

observed at middle or high latitude by Cluster; (2) there were a few correlative events (the correlative event means a event was observed by TC-1 and Cluster at low- and high-latitude, successively), this imply that most of the FTEs which occurred in lower latitude moved along the sides of the magnetosphere toward the magnetotail, only a few of them over the high-latitude; (3) most FTEs detected at middle latitude were not come from the equator, but burn at that region by the mode of component reconnection.

Key words Flux transfer events, Cluster observation, TC-1 observation, Magnetic reconnection

1 引言

太阳风和地球磁场在磁层顶的重联是引起太阳风和磁层间能量、动量和质量传输的主要物理过程, 这已为大量观测和理论研究证实. 向阳侧磁层顶重联的经典图像是一个纯南向的行星际磁场 (IMF) 在磁赤道处与纯北向的地球磁场发生重联 [1], 即在磁层向阳侧的重联仅发生在磁赤道附近. 随后大量的观测指出对于非南向的 IMF 也存在磁重联的证据. Crooker[2] 根据极尖区磁场结构的拓扑特性指出对非纯南向 IMF 也可在极尖区发生磁重联. 上述重联几乎都要求在重联点 IMF 与地球磁场反平行, 称为反平行重联. Gonzalez 和 Mozer[3] 提出任意方向 IMF 磁重联的一个定量模型. 之后 Sonnerup 等 [4] 和 Crooker 等 [5] 结合磁层顶的实际情况具体计算了重联线的位置, 指出 IMF $B_y \neq 0$ 时重联线会偏离磁赤道. $B_y < 0$ 时重联线以日下点为中心顺时针旋转, $B_y > 0$ 时逆时针旋转. 后一种重联不要求在重联点处 IMF 与地球磁场反平行, 只是垂直于重联线的分量相互发生联接, 称为分量重联. 这种重联可以在磁层顶大部分纬度处发生. 向阳侧磁层顶重联的直接观测证据主要有 IMF 南向时在磁层顶附近观测到被加速的等离子体流 [4],[6],[7] 和磁层顶存在法向磁场分量的事实, 特别是 Russell 和 Elphic[8] 在 ISEE 卫星磁场资料中发现的磁通量传输事件 (FTE), 认为它们是磁层顶瞬态、局部重联形成的管状磁结构. 之后许多人对 FTE 的形成与行星际太阳风参量的关联从观测角度进行了研究, 都得出南向 IMF 和 FTE 的发生存在明显相关. 且当 B_y 较大时 FTE 的发生率也较高. Elphic 和 Southwood[9] 分析了两对卫星的观测, 当时 ISEE 1/2 在 GSM 赤道以南约 5 R_e(地球半径) 处, UKS/IRM 在赤道以北约 2 R_e 处, 都在正午子午线附近. 它们都观测到了 FTE, 北半球为 +/− 极性, 南半球相反, 由此他们指出这些 FTE 是在赤道附近成对形成的, 然后分别向南北高纬对流. Cluster 在极尖区附近的多次穿越, 观测到了极尖区形成的 FTE[10]~[13]. 上述工作表明, FTE 的形成与 IMF 的横向分量 ($B_T = \sqrt{B_y^2 + B_z^2}$) 有明显关系. 关于 FTE 形成的位置大多认为是在磁赤道附近成对生成, 然后分别向南北高纬运动, 或在 IMF $B_y \neq 0$ 时形成于极尖区. 本文分析 2004 年 2 月到 4 月期间 TC-1 和 Cluster 同时在不同纬度穿越向阳侧磁层顶时记录到的 FTE 与 IMF 横向分量的关系, 以期了解不同 IMF 结构对磁层顶重联位置的影响, 以及分量重联的证据.

2 资料说明

2.1 卫星的运动

Cluster 卫星于 2000 年夏季发射, 极轨道运行, 由处于四面体顶点的 4 颗卫星组成, 近地点约 4 R_e, 远地点约 19.6 R_e. 每年绕地球进动一次, 3 月左右远地点在向阳侧. 双星系列的第 1 颗卫星 TC-1 于 2003 年 12 月发射, 赤道轨道, 近地点几百公里, 远地点 13.4 R_e. 它与 Cluster 以同样方式进动, 其远地点也于 3 月左右处在磁层顶向阳侧. 在 2 到 4 月期间它们分别有 25 次在相近的地方时和不同的纬度穿越向阳侧磁层顶. 两卫星同时处在向阳侧磁层顶附近的时间共 23 天, 总计约 41 h.

2.2 FTE 的选取

FTE 的选取主要根据磁场资料 (分辨率 4 s), 并同时参照粒子数据, 标准如下.

(1) 双极变幅 (磁场磁层顶法向分量 $\pm B_N$ 变幅) 大于 10 nT, 选择这一标准是为了与边界上的波动相区别.

(2) FTE 的持续时间除 FTE-T2 和 FTE-C1 分别为 16 s, 21 s 外, 其他都大于 30 s, 之所以仍选取这两个事件是因为它们前后没有别的干扰, 且粒子

数据也表明它们具有 FTE 特征.

(3) 选取孤立存在的 FTE, 即事件前后没有与所选 FTE 幅度相当的波动.

(4) FTE 伴有磁场强度增强.

2.3 太阳风资料

IMF 数据取自位于第一拉格朗日点的 ACE 卫星探测资料. 由于太阳风速度随时间变化, 因而影响各个事件的太阳风也有不同的滞后时间. 为了较为合理地确定影响某一事件的 IMF, 本文采用如下简便方法: 设 $t_{\rm e}$ 时刻观测到一个 FTE, 在此时刻以前的某一时刻 t_0, 卫星 ACE 在 GSM 坐标系的 x 坐标 $L_x(t_0)$ 处观测到太阳风速度的 x 分量为 $v_x(t_0)$, 令 $t_{\rm p}=[L_x(t_0)-10\,R_{\rm e}]/v_x(t_0)$, 易见 $t_{\rm p}$ 表示速度为 $v_x(t_0)$ 的太阳风从 ACE 传播至磁层顶的时间. 取 $\Delta t=(t_{\rm e}-t_0)-t_{\rm p}$, 由计算机选取不同的 t_0, 直到 Δt 为最小. 以满足此条件的 t_0 为界, 求出早于它约 30 min 的 IMF 平均值作为影响该事件的行星际条件. 在本文研究的时段中, 太阳风速度起伏都不大, 89% 的事件对应的太阳风相对起伏 $\dfrac{\sigma}{v_x}\leqslant 2.0\%$, 式中 σ 和 v_x 分别为速度起伏的标准差和平均速度. 有 3 个事件对应的相对起伏分别为 2.3%, 2.5% 和 2.7%, 也比较小. 这表明所求 IMF 到达磁层前结构不会有太大变化. 当它们越过弓激波后 IMF 的横向分量 ($B_{\rm T}=\sqrt{B_y^2+B_z^2}$) 可放大 2~6 倍.

3 观测结果

3.1 FTE 与 IMF 的关系

在 25 颗卫星穿越向阳侧磁层顶的时段中有 17 个时段观测到了 FTE, 其中 5 个时段两颗卫星同时观测到 FTE. 分析结果见表 1 和表 2. 表中纬度和地方时均以 GSM 坐标系为参考, B_y, B_z 和 $B_{\rm T}$ 是用 2.3 节所述方法求出的 IMF 的平均值, α 是 $B_{\rm T}$ 和 z 轴的夹角, 从 $+z$ 到 $+y$ 为正. 由表 1 可见, TC-1 在 25 次磁层顶穿越中共探测到 10 个事件, 表 2 示出 Cluster 在同样次数的磁层顶穿越中观测到的 17 个事件. 为了更清楚地显示 FTE 发生位置和 IMF 的关系, 图 1 和图 2 分别给出在 B_y-B_z 和 $B_{\rm T}$-α 坐标中事件出现的位置. 图 1 用两条虚对角线将平面分为 4 个三角形区, 上下两区对应于 $|B_z|>|B_y|$ 的情况, 左右两区为 $|B_z|<|B_y|$ 的区域. 由图可见, 在中高纬穿越磁层顶的 Cluster 探测到 FTE 的行星际条件 88% 都对应于 $|B_z|<|B_y|$ 的情况, 而 TC-1 的 FTE 70% 都是在 $|B_z|>|B_y|$ 的情况下探测到的. 另由图 2 (图中只画出 α 的绝对值) 可见, TC-1 探测到 FTE 70% 都对应 $\alpha>135^\circ$, 即 $B_z<0$ 及 $|B_z|>|B_y|$, 而 Cluster 探测到的 FTE 94% 都对应 $50^\circ<\alpha<135^\circ$ 的情况. 图 3 给出事件发生的磁地方时和纬度分布 (只给出纬度大小, 未区分南北纬), 尽管 TC-1 穿越磁层顶的最低纬度可达约 2°, 但在小于 10° 的赤道附近区域却很少探测到 FTE. Russell 等 [14] 由观测也发现 FTE 在赤道附近很少发生.

表 3 给出在不同纬度范围探测到 FTE 的频次, 由表 3 可见, $10^\circ\sim 40^\circ$ 的纬度范围出现频次最高. 当 IMF 的横向分量 $|B_y|>|B_z|$ 时, 84% 的 FTE 在 $>20^\circ$ 处探测到, 其中 63% 在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 的中纬区, 37% 在 $>50^\circ$ 的高纬极尖区探测到. 因为 IMF B_y 分量占优势时重联主要应以分量重联方

表 1 2004 年 2 到 4 月期间 TC-1 观测到的 FTE

Table 1 FTE detected by TC-1 in February to April, 2004

事件	月-日	UT	LT	纬度 /(°)	B_y/nT	B_z/nT	α/(°)	$B_{\rm T}$/nT
FTE-T1	02-06	214545	115324	10.52S	3.47	0.09	88.57	3.47
FTE-T2	02-10	215203	133600	2.02N	3.29	−2.73	129.69	4.28
FTE-T3	02-25	030815	104048	18.62S	−0.95	−3.45	−164.60	3.58
FTE-T4	03-10	105220	115436	8.34S	−6.40	−0.63	−95.59	6.43
FTE-T5	03-12	154655	113148	11.19S	0.48	−3.72	172.65	3.75
FTE-T6	04-07	191055	094500	24.32S	−0.15	−4.51	−178.10	4.51
FTE-T7	04-07	191516	094612	24.39S	−0.64	−4.14	−171.21	4.19
FTE-T8	04-08	142135	081424	20.69S	−1.78	−2.63	−145.91	3.18
FTE-T9	04-10	044443	095400	18.91S	−2.81	−3.31	−139.67	4.34
FTE-T10	04-10	050453	095624	18.14S	−2.20	−3.50	−147.85	4.13

表 2 2004 年 2 到 4 月期间 Cluster 观测到的 FTE

Table 2 FTE detected by Cluster from February to April 2004

事件	月-日	UT	LT	纬度 /(°)	B_y/nT	B_z/nT	α/(°)	B_T/nT
FTE-C1	02-06	214439	133036	38.77N	3.47	0.09	88.57	3.48
FTE-C2	02-09	060330	135624	35.67N	5.04	−0.49	95.55	5.06
FTE-C3	02-22	195838	133636	65.86S	−6.91	−3.37	−116.00	7.69
FTE-C4	02-25	031733	125736	59.12S	−1.46	−3.06	−154.49	3.39
FTE-C5	03-08	164358	114536	38.68N	6.76	0.29	87.54	6.77
FTE-C6	03-08	172115	114048	34.83N	5.94	−0.44	94.24	5.96
FTE-C7	03-10	110207	095736	68.54S	−6.25	0.15	−88.63	6.25
FTE-C8	03-12	182158	120748	64.07S	−3.36	−0.77	−102.91	3.45
FTE-C9	03-22	225900	102848	30.50N	−2.56	−2.13	−129.76	3.33
FTE-C10	03-24	150500	100936	63.91S	0.10	0.06	59.04	0.12
FTE-C11	03-25	082633	110448	33.25N	7.39	0.18	88.60	7.39
FTE-C12	04-06	051930	101048	30.29N	−7.08	−6.50	−132.55	9.61
FTE-C13	04-06	054545	101200	28.18N	−6.58	−4.85	−126.39	8.17
FTE-C14	04-08	133233	102400	38.38N	−4.04	−3.00	−126.60	5.03
FTE-C15	04-08	140230	101724	34.50N	−3.62	−2.32	−122.66	4.30
FTE-C16	04-24	133446	064124	64.72S	6.92	−2.03	106.35	7.21
FTE-C17	04-26	214905	075512	79.33S	6.09	3.75	58.38	7.15

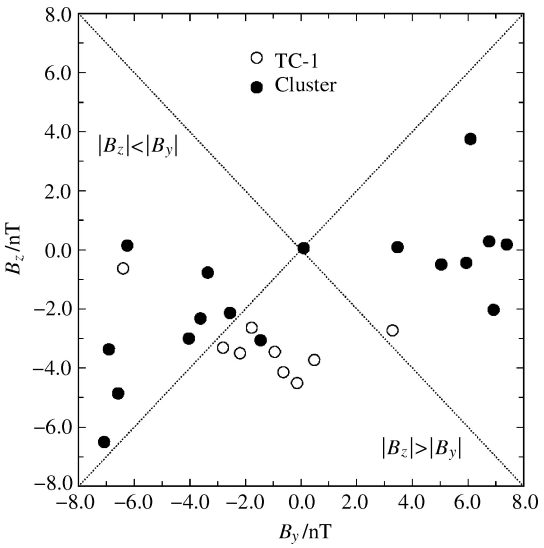

图 1 FTE 与 IMF B_y, B_z 分量的关系

Fig.1 Relation between IMF B_y, B_z and FTE

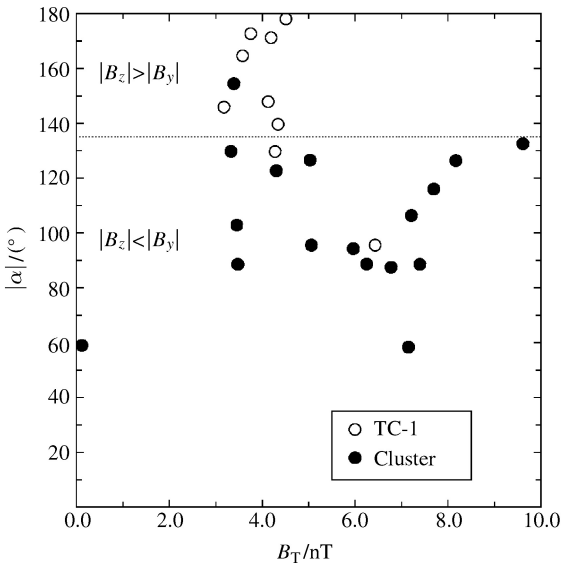

图 2 FTE 与 IMF 横向分量及横向分量与 z 轴夹角的关系

Fig.2 Relation between FTE and IMF transverse component, and the angle of this component with z axis

表 3 不同纬度探测到 FTE 的频次

Table 3 Detected rate of FTE in different latitude ranges

纬度范围	穿入次数	探测到 FTE 的数目	FTE 出现的频次 /(%)
$< 10°$	6	2	33
$10° \sim 40°$	30	18	60
$> 50°$	14	7	50

式发生在中高纬度 (部分以反平行重联方式发生在极尖区), 上述结果表明观测期间中纬地区探测到的 FTE 主要应以分量重联方式在该区形成, 而非来自赤道附近成对产生的 FTE.

3.2　关联事件的分析

一般认为，FTE 在赤道附近形成后会随磁鞘等离子体流向高纬. 本文所谓的 “关联事件” 是指, 赤道附近形成的 FTE 在向高纬运动过程中先后被 TC-1 和 Cluster 探测到的事件. 从表 1 和表 2 可见, 在时间上有合理联系的仅有两对事件，即 2 月 25 日的 FTE-T3 和 FTE-C4, 以及 3 月 10 日的 FTE-T4 和 FTE-C7. 以下对它们的运动做一简单的估算. 设低纬形成的 FTE 管轴在东西方向，与磁鞘等离子体流一起向高纬匀速平移. 并设向阳侧磁层顶近似为一圆心在 $x=-5\,R_{\rm e}$ 处球面的一部分 [3], 由此估计出两卫星所在纬度间的弧长. 因背景流速随纬度升高不断增大，设为线性变化，取 TC-1 和 Cluster 处背景流速 ($v=\sqrt{v_x^2+v_z^2}$) 的平均值为 FTE 的运动速度. 表 4 给出 FTE 从 TC-1 到 Cluster 估算的运动时间和两卫星记录到两信号的时差，以及两种途径得到的 FTE 从 TC-1 到 Cluster 经历时间上的偏差. 由表 4 可见两种时差基本相符，但上述两事件仅满足时间上相互关联的必要条件，它们未必是低纬运动到高纬的同一事件，因而实际的关联事件有可能少于两个. 表明在此次研究的 FTE 中可能的关联事件只占极少部分，这说明在低纬形成的 FTE 可能并不是全部沿着磁层顶运动到高纬地区.

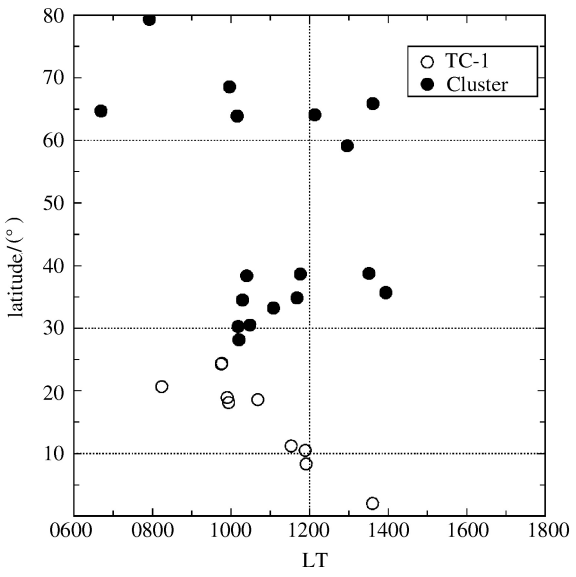

图 3　FTE 发生的磁地方时和纬度分布

Fig.3　Distribution of magnetic local time and latitude where FTE arise

表 4　关联事件运动分析

Table 4　Analysis for the moving of correlative events

时间 月-日	卫星 间距 /km	FTE 速度 /(km·s^{-1})	运动 间 /s	记录 时差 /s	偏差 /(%)
02-25	67 753.20	152.38	444.63	558	20
03-10	100 412.17	166.56	602.86	587	3

4　结果和讨论

(1) 由观测结果可见，IMF 的 B_y 和 B_z 分量的相对大小，也即 $B_{\rm T}$ 与 z 方向的夹角对磁层顶发生磁重联的位置有较明显的影响. 当 IMF B_z 南向分量占优势而 B_y 较小时，磁重联主要发生在低纬区域. 而当 B_y 占优势时，在中高纬区域都可发生磁场重联.

(2) 本文的 Cluster 记录中有 6 个事件对应 IMF $B_z>0$. 经典的反平行重联模式认为这种情况下不能发生重联. Gonzalez 和 Mozer[3] 在分析任意 IMF 与磁层磁场重联时得出可发生磁重联的如下条件: $B_1>B_2\cos\alpha$ (B_1 是磁鞘场，B_2 为磁层场，α 为它们的夹角). 可见当 $\alpha>90°$ (即 $B_z<0$) 时，重联可以发生. 但 IMF $B_z>0$ 时重联未必不能发生，只要 B_1 与 B_2 满足一定关系仍可发生重联. 由表 1 和表 2 可见，除 FTE-C10 和 C17 外，其余对应 $B_z>0$ 事件的 α 角均接近 90°, 可以满足上述发生磁重联的条件. 考虑到 IMF 穿越弓激波后会有一定的放大 (约 2~6 倍), 因而 FTE-C17 也可满足重联条件. 而 FTE-C10 的 B_y, B_z 都很小，重联可能主要是 B_x 分量在起作用.

(3) 观测指出，FTE 垂直于磁层顶的尺度约为 $1\,R_{\rm e}$ (地球半径) 量级，卫星在同样方向的速度一般小于 2 km/s, 因而卫星在垂直于磁层顶方向走过 $1\,R_{\rm e}$ 的时间应大于 50 min, 也就是说在这一时间范围内卫星都有可能探测到从低纬运动来的 FTE. 而 FTE 在背景流带动下从低纬到高纬的平均速度约为 100~200 km/s, 由此推测 FTE 从低纬运动到高纬只需十多分钟. 因而同一个 FTE 被两颗卫星先后观测到的可能性还是比较大的. 本文的结果表明在低纬生成的 FTE 大多不能对流到高纬地区，越过极盖到达磁尾. 可能大部分是沿磁层两侧滑向磁尾. 尽管 FTE 不仅被磁鞘等离子体流带动，可能还有其他力的作用 (如磁应力等), 且其速度在两地

间也呈非线性变化，但上述从低到高纬渡越时间的估计在量级上还是可信的.

(4) 对反平行重联模式 FTE 应主要起源于磁赤道附近和极尖区，中纬区出现的 FTE 应是从低纬运动来的. 但本文结果表明，中纬 FTE 的出现频次高于低纬，而且从低纬向高纬传播的 FTE 很少探测到，表明在中纬区域探测到的 FTE 主要是当 IMF B_y 分量较显著时在该区由分量重联模式产生的. 由于 IMF 经常存在显著的 B_y 分量，根据分量重联模式，当 $B_y \neq 0$ 时，日下点两侧的重联线会偏离赤道，移向较高的纬度. 因而除日下点附近外赤道附近的重联会减少，重联出现在较高一些的纬度处，在赤道附近观测到 FTE 的机会也减小.

致谢 本文采用 Mike Hapgood 提供的 Cluster 和 TC-1 两卫星 2004 年 2 至 4 月期间同时处于磁层顶附近的时间表. 卫星数据由中国 Cluster 数据和研究中心、Cluster 计划 RAPID, FGM 和 CIS 项目组提供.

参考文献

[1] Dungey J W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **6**:47~48

[2] Crooker N U. Dayside merging and cusp geometry. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A3):951~959

[3] Gonzalez W D, Mozer F S. A quantitative model for the potential resulting from reconnection with a arbitrary interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(28):4186~4194

[4] Sonnerup B U O, Paschmann G, Papamastorakis I *et al.* Evidence for magnetic field reconnection at the earth's magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**(A12):10 049~10 067

[5] Crooker N U, Siscoe G L, Toffoletto F R. A tangent subsolar merging line. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A4):3787~3793

[6] Paschman G, Sonnerup B U O, Papamastorakis I *et al.* Plasma acceleration at the earth's magnetopause: Evidence for reconnection. *Nature*, 1979, **282**(15):243~246

[7] Gosling J T, Asbridge J R, Bame S J *et al.* Evidence for quasi-stationary reconnection at the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A4):2147~2158

[8] Russell C T, Elphic R C. Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations. *Space Sci. Rev.*, 1978, **22**(6):681~715

[9] Elphic R C, Southwood D J. Simultaneous measurements of the magnetopause and flux transfer events at widely separated sites by AMPTE UKS and ISEE 1 and 2. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A12):13 666~13 672

[10] Huang Zongying, Pu Zuyin, Xiao Chijie *et al.* Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/Rapid observations on January 26, 2001. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(2):181~189. in Chinese (黄宗英，濮祖荫，肖池阶等. 2001 年 1 月 26 日高纬磁层顶通量管事件的观测研究. 地球物理学报， 2004, **47**(2):181~189)

[11] Xiao Chijie J, Pu Zuyin, Huang Zongying *et al.* Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause on January 26 2001——current density calculating. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(4):555~561. in Chinese (肖池阶，濮祖荫，黄宗英等. 2001 年 1 月 26 日高纬磁层顶通量管事件的观测研究 —— 空间电流密度计算及分析. 地球物理学报， 2004, **47**(4):555~561)

[12] Zuo Pingbing, Liu Shaoliang, Jin Shuping *et al.* A study of the characteristics for the magnetic flux transfer events occurred on March 2, 2001. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(3):376~384. in Chinese (左平兵，刘绍亮，金曙平等. 2001 年 3 月 2 日磁通量传输事件特性的研究. 地球物理学报， 2004, **47**(3):376~384)

[13] Yao Li, Liu Shaoliang, Jin Shuping *et al.* A study of orientation and motion of flux transfer events observed at the high-latitude dayside magnetopause. *Chin. J. Geophys.*, 2005, **48**(6):1~9. in Chinese (姚丽，刘绍亮，金曙平等. 高纬向阳侧磁层顶通量传输事件的特性研究 —— 通量管轴线方位及运动分析. 地球物理学报， 2005, **48**(6):1~9)

[14] Russell C T, Berchem J, Luhmann J. On the source region of flux transfer events. *Adv. Space Res.*, 1985, **5**(4):363~368