0254-6124/2007/27(3)-192-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhang Lingqian, Liu Zhenxing, Wang Jiye, Pu Zhuyin, Ma Zhiwei, Shen Chao. Effect of tailward flows from the ionosphere on the near-earth magnetic field. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3): 192∼197

来自电离层的尾向流对近地磁场位形的影响*

张灵倩[1] 刘振兴[1] 王继业[2] 濮祖荫[3] 马志为[4] 沈 超[1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

[2](中央民族大学物理与电子工程学院)

[3](北京大学地球与空间科学学院)

[4](中国科学院等离子体研究所)

摘 要 探测一号 (TC-1) 卫星的观测结果表明, 尾向流能够拉伸近地磁尾的磁力线, 从而导致磁场位形改变. 尾向流具有垂直于磁场的速度分量, 这种垂直磁场的速度分量会导致磁力线向尾向拉伸, 磁场的结构由偶极型变为非偶极型. 而随尾向流的终止, 地向流的出现, 磁场的结构由非偶极型变为偶极型, 磁力线恢复原状. 另外在磁场的结构由非偶极型变为偶极型的过程中, 伴随磁能的释放热离子温度的迅速升高, 温度由各向同性逐渐趋向各向异性. 其次, 观测结果显示来自电离层的尾向流对磁场 B_y 分量有重要的影响, 能够引起磁场 B_y 分量的显著增强. 上述分析结果表明来自电离层的尾向流对近地磁尾动力学过程有着重要的影响.

关键词 近地磁尾; 低纬上行尾向流; 离子细流

中图法分类号 P 353

Effect of Tailward Flows From the Ionosphere on the Near-Earth Magnetic Field

ZHANG Lingqian[1] LIU Zhenxing[1] WANG Jiye[2] PU Zhuyin[3]

MA Zhiwei[4] SHEN Chao[1]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*Physics and Electron Engineer Academy, Central Nationality University*)

[3](*School of Earth and Space Science, Peking University*)

[4](*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Tailward flows are often observed in the near-Earth magnetotail by TC-1 satellite during quiet time and substorm active period. The statistical studies show that the perpendicular component of the tailward flow will leads to stretching of magnetic field lines. Due to the tailward flow, the Bx component of the magnetic field distinctly increases or the magnetic field geometry becomes tail-like from dipolar-like. The magnetic field is recovered and back to dipole-like structure when plasma flow is reversed. Along with magnetic field stretch, it is found that both temperature anisotropy and ion temperature decrease at the same time. During the period of the magnetic field recovering dipolar-like, the ion temperature rapidly increases and the temperature becomes anisotropy associated with the release of the magnetic energy. From the observations, it is also shown that the tailward flow causes an enhancement of By component. The results from the TC-1 satellite indicate that the

* 国家自然科学基金项目资助 (40390150, 40474058, 40536030)

2006-07-31 收到原稿, 2006-12-09 收到修定稿

tailward flow from the ionosphere has an important effect on the near-earth magnetotail.

Key words Near-Earth magnetotail, Low-latitude upward flow, Ion stream

1 引言

1972 年, 从 Shelley 等人 [1] 在地球磁层中首次发现来自电离层的重粒子 O^+ 以来, 在磁层的各个区域中都观测到了来自电离层的不同成分离子 [2]. 近 20 年来, 人们对电离层起源的上行离子进行了大量的观测和研究, 确认电离层是磁层等离子体的重要源区 [3]. 来自电离层的上行离子进入近地磁尾主要有两种途径：第一种是来自向阳面极尖区的 O^+ 离子沿开磁力线区域进入尾瓣, 然后受磁层对流的影响回到近地磁尾, 即 Geotail 卫星在远磁尾瓣区和幔区观测到的起源于高纬电离层尾向 O^+ 离子束 [4],[5]; 第二种是来自夜侧极光带区的 O^+ 离子经闭合磁力线直接进入近地磁尾等离子体片边界层区域, 即低纬上行尾向流. Polar 卫星、ISEE 1 卫星和 TC-1 卫星都在近地磁尾近赤道区域观测到大量来自电离层的尾向流事件 [8]. 尾向流在磁静期间、亚暴过程和磁暴期间都有出现, 并且在夜侧和晨昏两侧的低纬尾瓣、等离子体片边界层和等离子体片区域都能观测到. 以往的观测显示, 由于亚暴膨胀相触发 (onset) 过程发生在等离子体片内边界的闭合磁力线区域, 而极尖区的 O^+ 离子到达 onset 区域一般需要几个小时, 所以位于夜侧等离子体片边界层的极光弧对近地磁尾动力学过程有着重要影响 [9], 与亚暴过程有密切的关系. 了解低纬电离层的上行离子对近地磁尾动力学过程的影响对进一步了解亚暴和磁暴过程有重要的意义.

近地磁尾是亚暴膨胀相触发的主要活动区域, 粒子注入事件、越尾电流中断、Pi2 的发生及偶极化开始的位置都位于这个区域. 近地磁尾场和粒子来源的研究对了解亚暴和磁暴等过程有重要的意义. 1981 年 Sharp 等人 [6] 利用 ISEE 1 卫星对地心距离小于 $23\,R_e$, 能量范围在 $0 \leqslant E/q \leqslant 17\,\mathrm{keV}$ 的太阳风起源和电离层起源的离子进行分析, 最早观测到了在近地磁尾有来自电离层的尾向上行离子细流, 证实起源电离层的上行离子是近地磁尾等离子体片中热等离子体的重要来源. 1984 年 Eastman等 [7] 根据 ISEE 1 卫星对近地磁尾低纬瓣区、等离子体片区的离子细流特性进行观测分析, 发现低纬瓣区和等离子体片区的离子细流特性有明显不同, 证实了等离子体片边界层的存在. 在等离子体片边界层离子细流的速度 v_x 最高可超过 600 km/s. 2005 年, Liemohn 利用 Polar 卫星 [10] 对近地磁尾 (约 $9.5\,R_e$) 低纬瓣区附近主要是冷等离子体 (1~100 eV) 成分、持续时间超过 10 min 的离子细流进行了统计分析, 结果显示, 具有尾向流动方向的离子细流持续出现在低纬尾瓣区, 形成尾瓣风 (lobal wind). 但迄今为止, 这种低纬区域出现的来自电离层的尾向粒子流对近地磁尾动力学过程的影响尚不清楚.

以往的观测显示, 在近地磁尾的等离子体片边界层和低纬瓣区有持续的来自电离层夜侧极光椭圆带区域的尾向流, 可以直接将电离层的离子带进近地磁尾等离子体片区域. TC-1 卫星在近地磁尾, 包括晨昏两侧和夜侧的低纬瓣区、等离子体片边界层和等离子体片区域都观测到大量的尾向流事件. 尾向流具有的高密和低温特性显示其来自电离层. 与高纬电离层 (如极盖区和极尖区) 的上行离子流相对应, 我们将 TC-1 卫星在近地低纬瓣区和等离子体片区域观测到的具有尾向速度分量的上行离子细流称为低纬上行尾向流 (low-latitude upward flow), 简称尾向流. 尾向流不仅会对近地磁尾的粒子成分产生重要的影响, 同时会对磁尾的动力学过程产生重要的影响. 本文的主要目的是通过对 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的磁静时典型尾向流事件的分析, 了解尾向流对近地磁尾动力学过程的影响, 为进一步了解来自电离层的尾向流对亚暴和磁暴过程的影响提供观测基础.

2 事件背景

TC-1 卫星为近地赤道卫星, 轨道高度为 690~85 300 km, 倾角 28.5°, 开普勒周期约 27.4 h. TC-1 卫星为近地磁层场和粒子时空变化的因果关系探测提供了很好的条件. 在 TC-1 卫星上配置有与 Cluster 卫星相同的磁通门磁强计 (Flux Gate Magnetometer, FGM) 和热离子分析仪 (Hot Ion Analyser, HIA). 其中, FGM 可以精确地进行高时间分辨的磁场 3 维测量, 测量范围为 $-65\,536 \sim +65\,504\,\mathrm{nT}$, 分辨率最高为 $7.813 \times 10^{-3}\,\mathrm{nT}$, 时间分辨率为 4 s; HIA

能够测量离子的能谱、 3 维分布函数, 探测的能量范围为 0.005~30 000 eV, 时间分辨率为 4 s.

2004 年 7 月 14 日 1228—1302 UT, TC-1 卫星在近磁尾观测到持续 32 min 的尾向流事件, 最高尾向流速 v_x 超过 200 km/s, 平均尾向流速为 80 km/s. TC-1 卫星的位置在 $(-9.3R_e, -5.4R_e, 1.2R_e)$ 附近 (GSM 坐标系).

当天的 Dst 指数最高是 −6 nT, 1200—1330 UT 期间, Dst 指数由 −4 nT 增大至 −5 nT, 没有磁暴发生. 1200—1300 UT 期间 AE 指数很平静, 如图 1 所示, Geos 卫星在同步轨道没有发现粒子注入事件, 同时 Image 卫星对电离层极光活动的观测显示极光平静, 没有亚暴事件发生. 这是在近地磁尾近赤道区域 TC-1 卫星观测到的典型磁静期间持续尾向流事件.

3 事件分析

3.1 流场和密度

尾向流事件如图 2 所示, 由上至下分别为密度 (n)、尾向流速度 (v_x, v_y, v_z). 等离子体片边界层热离子的典型密度为 0.1 cm^{-3}, 低纬瓣区热离子的典型密度为 0.02 cm^{-3}. 由热离子密度可以判断卫星的位置. 2004 年 7 月 14 日 1228—1253 UT 期间, TC-1 卫星在近磁尾观测到持续 25 min 的尾向流事件. 尾向流的三个速度分量中以尾向速度 (v_x) 最强, 具有明显的尾向流特征. 最高尾向流速度超过 200 km/s, 平均尾向流速度为 80 km/s. 在 1302 UT, 尾向流速度由负变正, 尾向流转为地向流. 流场及密度的变化如下.

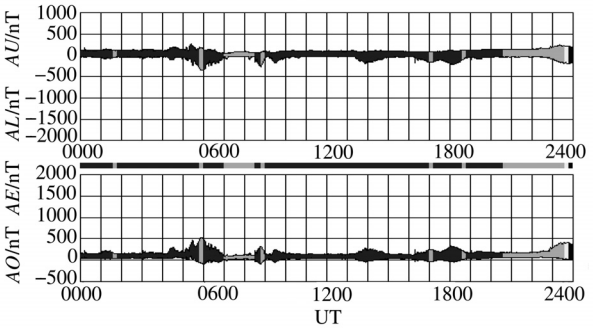


图 1 2004 年 7 月 14 日的 AE 指数 (1200—1302 UT 期间 AE 指数很平静)

Fig.1 AE index on 14 July 2004 shows that there is no substorm

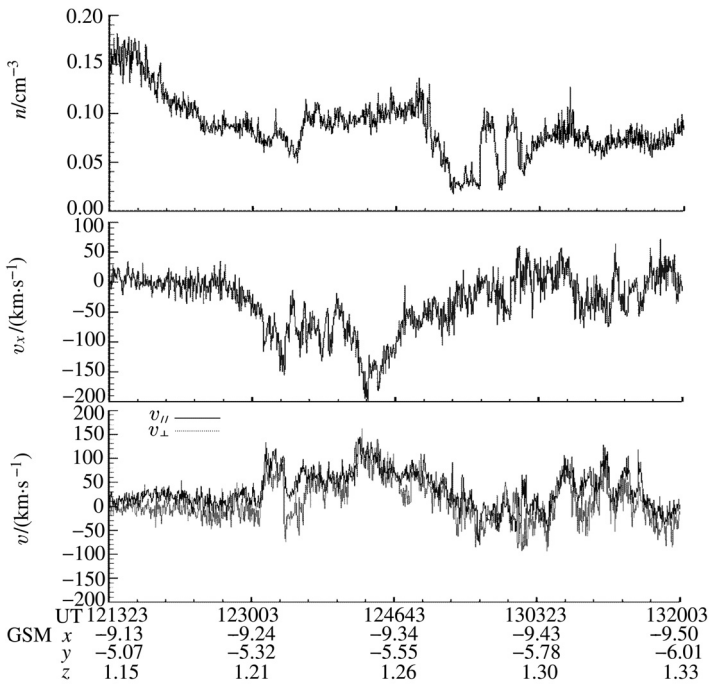


图 2 2004 年 7 月 14 日 TC-1 卫星观测到的尾向流事件

Fig.2 Continue tailward flow observed by TC-1 on 14 July 2004. TC-1 is located at about $(-9.3R_e, -5.4R_e, 1.2R_e)$. The duration of the tailward flow is about 32 min

(1) 在 1228—1243 UT, 这一阶段尾向流开始出现并逐渐增强，在 1243 UT, 尾向流达到最强， v_x 达到 200 km/s. 其间热离子密度约为 0.1 cm^{-3}, 显示卫星位于等离子体片边界层. 其后尾向流逐渐减弱，在 1302 UT, 尾向流结束. 在 1252—1256 UT, 1258—1259 UT 期间热离子密度两次由 0.1 cm^{-3} 下降至 0.025 cm^{-3}, 显示卫星两次由等离子体片边界层进入了低纬瓣区

(2) 在 1302 UT 附近, 随尾向流的减弱, 地向流出现. HIA 探测到的热离子密度基本在 0.07 cm^{-3} 左右， TC-1 卫星在等离子体片边界层附近. 在尾向流持续期间 HIA 探测到的热离子密度基本在 0.1 cm^{-3} 左右，由此可以判断这是 TC-1 卫星在等离子体片边界层观测到的持续尾向流事件.

磁场和热离子温度的变化如图 3 所示，由上至下分别是速度尾向分量 (v_x)、磁场 (B_x, B_y, B_z), 温度 (包括热离子温度，热离子平行磁力线温度和垂直磁力线的温度), 流场在磁场方向上的投影.

3.2 磁场

磁场表现出随流场的尾向分量变化而变化的特性. 随着尾向流的逐渐增强 (在 1228—1300 UT), 磁场 B_x 分量也逐渐由 22 nT 增加到 31 nT. 在 1243 UT 当尾向流达到最强时，磁场 B_x 分量同时达到最强，B_z 分量基本保持不变; 其后随尾向流逐渐减弱，磁场 B_z 分量迅速由 16 nT 下降至 11 nT, B_x 分量基本保持不变. 在 GSM 坐标系下，只考虑 xz 平面, 则磁力线与 x 轴的夹角由 39° 下降为 23°. 由此可以看出尾向流持续期间，磁场位形表现出由偶极型向非偶极型的转化过程，磁力线尾向拉伸. 其次, 尾向流持续期间, 磁场 B_y 分量由 14.2 nT 持续增加至 21 nT.

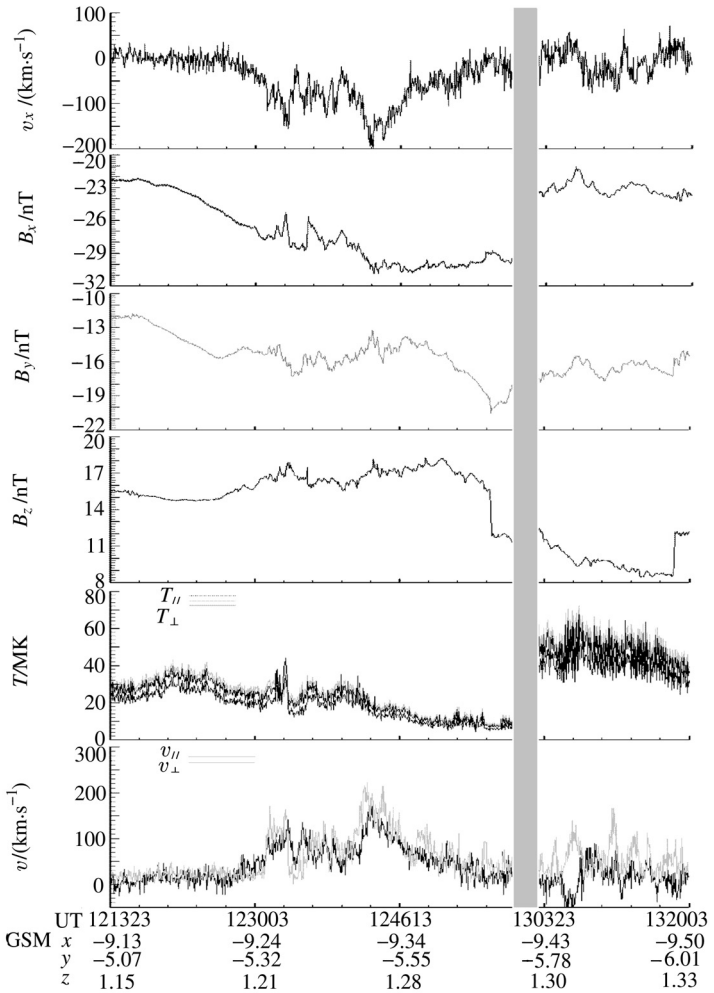


图 3 来自电离层的尾向流对近地磁尾磁场位形的影响

Fig.3 Effect of the tailward flow from the ionosphere on the near-Earth magnetic field

随着地向流的出现 (1300—1302 UT), 磁场 B_x 分量由 29 nT 迅速下降至 23.5 nT, 磁场 B_y 分量在 21 nT 附近扰动, 磁场 B_z 分量从 11 nT 迅速升高至 14 nT. 在 GSM 坐标系下只考虑 xz 平面, 则磁力线与 x 轴的夹角由 22° 升高到 35°, 磁场位形表现出由非偶极型变为偶极型的过程.

比较流场和磁场三个分量的变化可以发现, 尾向流与磁场 B_x 分量的变化有密切的关系. 初始时刻 (1228 UT), 磁场各个分量为 23.2 nT, 14.2 nT, 15.2 nT; 尾向流最强时刻 (1243 UT), 磁场各个分量为 31 nT, 14 nT, 23 nT; 到 1302 UT, 磁场各个分量为 23.5 nT, 21 nT, 14 nT, 磁力线基本恢复原状.

3.3 热离子温度

相对磁场而言, 热离子的平行温度明显小于垂直温度, 热离子具有明显的各向异性. 随尾向流向磁尾的传输, 热离子温度由 30 MK 逐渐下降至 8 MK, 尾向流的动能和热离子的内能都出现明显下降. 同时, 热离子的平行温度接近于垂直温度, 热离子由各向异性逐渐趋向各向同性. 与地向流期间的热离子温度相比, 尾向流的热离子具有较明显的低温特性, 显示其来自电离层.

随地向流的出现, 热离子温度由 10 MK 迅速升高至 54 MK. 随热离子的温度升高, 平行磁力线和垂直磁力线两个方向上的离子温度同时升高, 且热离子的垂直磁力线温度明显较平行磁力线温度高, 热离子具有明显的各向异性. 热离子由各向同性转变为各向异性. 伴随地向流出现的高温热离子表明其来自中磁尾方向.

总之, 来自电离层的尾向流具有低温特征. 随尾向流向磁尾的传输, 尾向流的动能和热离子的内能都明显下降. 同时热离子逐渐由各向异性趋向各向同性. 来自中磁尾的地向流具有明显的高温特征, 且热离子的温度具有明显的各向异性.

3.4 流场在磁场方向上的投影

尾向流具有较强的垂直磁力线的速度, 并不是完全沿磁力线运动. 在整个尾向流持续期间, 垂直磁场速度 (简称为垂直速度) 稍高于平行磁场速度 (简称为平行速度), 并且垂直速度与尾向流的变化趋势一致. 由计算可知, 尾向流持续时间内 (1228—1253 UT), 流场与磁场之间的夹角统计平均为 45.8°, 流场具有较强的垂直磁力线运动分量. 尾向流垂直速度分量是导致磁场位形变化的原因. 在尾向流垂直分量的作用下, 磁场结构由偶极型变为非偶极型. 在尾向流减弱并最终转变为地向流时, 磁场结构由非偶极型变为偶极型, 磁场位形恢复原状. 另外, 尾向流会引起磁场 B_y 分量的明显增强. 磁场 B_y 分量与场向电流密切相关, B_y 分量的增强会引起场向电流的增强, 从而有可能对亚暴膨胀相的触发产生影响.

4 讨论

尾向流与磁场位形变化的统计分析进一步证实了具有垂直磁力线速度分量的尾向流能够引起近地磁尾磁场位形的变化. 将流场按速度分量 v_x 方向的不同, 区分为尾向流 ($v_x < 0$) 和地向流 ($v_x > 0$) (GSM 坐标系). 在 2004 年 7 月 1 日至 2004 年 10 月 31 日期间, 对 $6 \sim 13 R_e$ 的 v_x 持续尾向时间超过 8 min 的尾向流进行统计, 结果表明, TC-1 卫星共观测到符合条件的尾向流事件 77 起. 将每一起事件的物理参数, 包括位置 (x, y, z)、磁场 (B_x, B_y, B_z)、流速 (v_x, v_y, v_z) 以及流场与磁场之间的夹角进行平均, 代表事件的时间统计特性. 按事件发生顺序和类型, 在表 1 列出了 10 起事件. 表 1 中前 8 起事件是磁场位形随流场发生明显变化的情况, 后两起是磁场位形没有随流场发生明显变化的情况.

对这 77 起事件的分析表明, ①在低纬瓣区、等离子体片边界层和等离子体片区等不同区域都观测到尾向流对磁场位形有明显影响; ②流场与磁场的最小夹角为 20°, 最大为 80°(流场与磁场之间的夹角超过 90° 时, 以减 180° 后的绝对值大小为准), 流场总存在有一定的垂直分量, 统计结果显示流场与磁场的夹角一般在 30° ~ 50° 之间; ③在 77 起事件中, 有 11 起事件磁场没有随流场发生明显变化, 这 11 起事件有 10 起事件发生在同步轨道以内磁场较强区域, 磁场 B_x 分量一般都大于 90 nT, 与表 1 中第 9 起事件相似.

5 结论

在磁静和亚暴过程期间, TC-1 卫星在近地磁尾, 包括晨昏两侧和夜侧的尾瓣及等离子体片区域都观测到了大量来自电离层的具有低温特征的尾向流. 在 2004 年 7 月 1 日至 2004 年 10 月 31 日, 对 $6 \sim 13\ R_e$ 之间 v_x 持续尾向时间超过 8 min 的尾向流进行的统计结果表明, 流场与磁场的夹角一般在

表 1 尾向流与磁场位形关系的统计结果

Table 1 Statistical results of the relationship between the tailward flows and the configuration of the magnetic field

日期	持续时间 UT	位置 /R_e (x, y, z)	磁场 /nT (B_x, B_y, B_z)	速度 /(km·s^{-1}) (v_x, v_y, v_z)	夹角 /(°)
2004-07-11	0432—0508	−9.3, −7.8, 0.3	−8.6, −10.2, 17.3	35, 1, 22	45.6
2004-07-11	0623—0637	−9.3, −8.8, 1.3	13.8, 7.5, 13.8	24, −15, 17	104.4
2004-07-14	1228—1253	−9.3, −5.5, 1.2	−28.8, −15.4, 16.8	80, 41, 62	45.8
2004-07-14	2121—2131	−8.4, −10.1, −0.6	−16.3, −12.6, 9.0	94, 8, 83	41.7
2004-07-22	1946—1959	−10.1, −8.7, 0.2	−13.7, 2.9, 20.5	46, 5, 46	23
2004-07-25	0057—0107	−10.8, −7.7, 0.2	−38.7, −4.7, 6.5	116, 25, 48	33
2004-07-31	1738—1757	−11.3,−4.5, 0.5	−35.2, −14.9, 12.7	50, −46, 23	33
2004-08-02	2320—2332	−11.1, −3.5, −0.1	−43.9, −2.9, 9.7	62, 22, 41	37
2004-07-13	0456—0508	−6.0, −1.1, −0.3	−105, −20, 60	20, 10, 39	40.4
2004-07-25	2200—2211	−9.9, −3.5, −0.4	−79.2, 2.5, 21	134, 20, 40	20

30° ∼ 50° 之间，尾向流具有垂直于磁场的速度分量. 对 TC-1 卫星在磁静时观测到的典型持续尾向流事件分析结果表明，尾向流能够拉伸近地磁尾的磁力线，从而导致磁场位形改变. 统计结果进一步证实了在同步轨道以外的近地磁尾，来自电离层的尾向流能够引起磁场位形的非偶极化. 尾向流具有垂直于磁场的速度分量，这种垂直磁场的速度分量是导致磁场位形变化的主要原因.

从流场和磁场的比较可以看出，在尾向流的作用下，B_x 分量会显著增加，磁场的结构由偶极型变为非偶极型，即磁力线向尾向拉伸. 随尾向流的终止，地向流的出现，磁场的结构由非偶极型变为偶极型，磁力线恢复原状. 另外，从温度的变化特性可以看出，在磁场从偶极型变为非偶极型的过程中，热离子温度持续下降，并且由各向异性逐渐趋向各向同性. 在磁场结构由非偶极型变为偶极型的过程中，随热离子温度的迅速升高，温度由各向同性逐渐变为各向异性. 其次，观测结果显示来自电离层的尾向流对磁场 B_y 分量有重要的影响，能够引起磁场 B_y 分量的显著增强.

上述分析结果显示，来自电离层的尾向流对近地磁尾动力学过程有着重要的影响. 了解磁静时尾向流对近地磁尾磁场位型的影响对我们进一步了解尾向流对亚暴触发过程的影响有重要意义.

致谢 感谢中国地球空间双星探测计划数据中心为本文提供的数据，日本 WDC-C2 KYOTO AE index service 提供的 AE 指数和 Dst 指数数据.

参考文献

[1] Shelley E G, Jonson R G, Sharp R D. Satellite observations of energetic heavy ions during a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 1972, **77**:6104∼6110

[2] Moore T E. Origining of magnetospheric plasma. *Rev. Geophys.*, 1991, (supp 1):1039∼1048

[3] Yau A W *et al.* Energetic auroral and polar ion outflow at ED 1 altitudes: Magnitude, composition and magnetic activity dependence and long term variations. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**:8417∼8432

[4] Mukai T *et al.* GEOTAIL observation of cold ion streams in the medium distance magnetotial lobe in the course of a substorm. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**:1023∼1026

[5] Seki K *et al.* Statistical properties and possible supply mechanisms of tailward cold beams in the lobe/mantle regions. *J. Geophys. Res.*, 2002, **103**:4477∼4489

[6] Sharp R D, Cart D L, Peterson W K *et al.* Ion streams in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:4639∼4648

[7] Eastman T E, Frank L A, Peterson W K *et al.* The Plasma Boundary Layer. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**:1553∼1572

[8] Zhang L Q *et al.* The continuous tailward flow in the near-earth magnetotail explored by TC-1 satellite. *Chin. Sci. Bull.*, accepted

[9] Gazey N G J *et al.* EISCAT/CRRES observations: nightside ionosphereic ion outflow and oxygen-rich substorm injections. *Ann. Geophys.*, 1996, **14**:1032∼1043

[10] Liemohn M W *et al.* Occurrence statistics of cold, streaming ions in the near-earth magnetotail: Survey of polar-tide observation. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**:2687∼2704