

魏新华,周国成,曹晋滨等. 近地磁尾重联中哨声波和 Hall 磁场的 Cluster 观测. 地球物理学报, 2007, 50(3):662~671  
Wei X H, Zhou G C, Cao J B, et al. Whistle and Hall magnetic field associated with near Earth magnetotail reconnection observed by Cluster. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3):662~671

# 近地磁尾重联中哨声波和 Hall 磁场的 Cluster 观测

魏新华<sup>1,2</sup>,周国成<sup>1</sup>,曹晋滨<sup>1</sup>,O. Santolik<sup>3</sup>,H. Reme<sup>4</sup>,  
N. Cornilleau<sup>5</sup>,Andre Balogh<sup>6</sup>

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 100080

2 中国科学院研究生院,北京 100049

3 Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czech Republic

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

5 CETP/UVSQ, Velizy, France

6 The Blatchett Laboratory, Imperial College, London, U. K

**摘 要** 在 2001~2003 年 Cluster 飞船通过近地磁尾期间,共探测到 14 次重联事件,在这些事件中同时还观测到等离子体波活动.本文把 14 次事件分为三大类,其中:第 I 类包含了 8 次事件,它们是在等离子体片内先于重联事件观测到波活动,并且还同时观测到 Hall 磁场.经过分析判断,这类事件中观测到的波是右旋偏振的哨声波.第 II 类包含了 2 次事件,这类事件也观测到了 Hall 磁场和右旋偏振的哨声波.第 III 类也包含了 2 次事件,这类事件只是普通的重联事件,没有观测到 Hall 磁场,但是波活动明显先于重联事件.在我们观测的 14 次事件中,比较强烈的哨声波和 Hall 磁场是一一对应的,因此哨声波可能主要是在 Hall 磁场的四极结构区激发的.

**关键词** 磁尾,无碰撞重联,哨声波,Cluster 飞船,Hall 磁场

**文章编号** 0001-5733(2007)03-0662-10 **中图分类号** P353 **收稿日期** 2006-07-06,2007-01-09 收修定稿

## Whistle and Hall magnetic field associated with near-Earth magnetotail reconnection observed by Cluster

WEI Xin-Hua<sup>1,2</sup>, ZHOU Guo-Cheng<sup>1</sup>, CAO Jir-Bin<sup>1</sup>, O. Santolik<sup>3</sup>, H. Reme<sup>4</sup>,  
N. Cornilleau<sup>5</sup>, Andre Balogh<sup>6</sup>

1 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 Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czech Republic

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

5 CETP/UVSQ, Velizy, France

6 The Blatchett Laboratory, Imperial College, London, U. K

**Abstract** During 2001~2003, the Cluster spacecraft passed through the near-Earth magnetotail, and observed 14 magnetotail reconnection events. Simultaneously, Cluster observed electromagnetic wave associated with reconnection events. There are three kinds of reconnection events in these 14 events. There are 8 events in the first kind of reconnection event, in this kind of reconnection events wave activity were observed prior to the

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40523006, 40574061, 40574067),中国科学院国际合作创新团队,中国科学院百人计划和国家重点基础研究发展计划(2006CB806305)共同资助.

**作者简介** 魏新华,女,1980年生,中国科学院空间天气学重点实验室 2004 级博士研究生,主要从事空间等离子体磁重联和等离子体波的研究. E-mail: xhwei@spaceweather.ac.cn

reconnection event and simultaneously Hall magnetic field was observed. The wave activity included right hand polarized Whistler. The second kind of reconnection events had two events. Whistler waves and Hall magnetic field were observed in this kind of events, but the wave activity was not prior to reconnection events. The third kind of events had two events. The Whistler waves and Hall magnetic were not observed in this kind of reconnection event. In these 14 events, the strong Whistler waves corresponded to Hall magnetic field. Whistler waves may mainly be excited in Hall magnetic field regions.

**Key words** Magnetotail, Collisionless reconnection, Whistler wave, Cluster spacecraft, Hall magnetic field

## 1 引言

太阳物理学家<sup>[1]</sup>首先提出了磁场重联的概念. Dungey<sup>[2]</sup>把磁场重联运用到地球磁层模型. 磁场重联是太空等离子体中最重要的能量转换和运输的过程之一, 它提供了一种将磁能快速转化为等离子体动能和热能, 同时引起等离子体中磁场拓扑形态变化的一种有效机制. 磁重联在太阳大气、太阳风与磁层的相互作用、磁层亚暴等的太空物理过程中起着重要的作用. 50 多年来磁场重联不管是理论、模拟、实验还是观测都取得重要的进展. 基于广义欧姆定律发展的无碰撞磁重联理论, 突破了早期电阻磁流体力学(MHD)理论的限制, 得到了重联扩散区由离子惯性区和电子惯性区组成, 以及哨声动力学驱动重联的结果<sup>[3]</sup>. 在重联过程中, Alfvén 波和哨声动力学对扩散区的结构都有重要的影响. 广义欧姆定律中的 Hall 项在重联过程中最重要的影响就是产生了四极 Hall 磁场结构和 Hall 电流, 同时使哨声动力学在重联中起了重要的作用. 研究还发现小尺度的快速重联强烈地依赖于哨声波和 Alfvén 波动力学<sup>[4]</sup>. 在没有引导磁场情况下, 重联层中的哨声波是斜传播的并且频率比较低, 又叫 Alfvén 哨声波<sup>[5]</sup>. 线性的 Hall-MHD 理论研究表明在一维平衡的电流片中, 在离子惯性区内哨声波是不稳定的<sup>[6~8]</sup>. 在小于离子惯性区的范围内, 波和粒子的相互作用在重联过程起着重要的作用. 动理论的研究也表明, 在磁尾中斜传播的哨声波是不稳定的, 并且这些不稳定性可以由离子束、电子束和场向电流引起<sup>[9]</sup>. 理论和模拟研究都表明哨声波在重联中起着重要的作用. 因此, 哨声波和重联事件特征的空间观测对于检验这些理论和模拟结果具有重要的意义.

早期飞船 IMP8 在磁尾  $-46.3 R_E$  到  $-23.1 R_E$  的中性片中观测到哨声波, 并且认为这些哨声波可能是电流驱动等离子体不稳定性产生的<sup>[10]</sup>. 飞船 ISSE 3 在等离子体片和磁尾通量绳中也观测到哨声

波, 并认为它们是高度各向异性投掷分布的过热电子产生的<sup>[11]</sup>. 飞船 Geotail 在磁尾  $\sim 210 R_E$  到  $\sim 10 R_E$  范围内观测了哨声波, 它们的统计特征研究表明, 这些哨声波存在于等离子体片和等离子体片边界层, 并且是准平行(传播角和磁场的夹角  $\sim 23^\circ$ ) 传播的. 这些哨声波被认为是能量电子束流产生的<sup>[12]</sup>. Geotail 也在磁层顶观测到重联事件和哨声波, 并且证实了重联中的哨声波调制重联的理论和 Hall 四极磁场<sup>[13,14]</sup>. 飞船 Wind 在  $57 R_E$  的磁尾观测到重联事件中磁分界线附近的哨声波. 观测和理论研究都表明, 哨声波在重联过程中起着重要的作用. Cluster 飞船在磁尾  $\sim 18 R_E$  附近观测到了重联事件<sup>[15]</sup> 和伴随重联的孤立波事件<sup>[16,17]</sup>. Alexeev et al.<sup>[18]</sup> 通过 Cluster 观测证实了重联结构中的 Hall 电流体系.

到目前为止, 无碰撞重联的一些基本特征都得到了观测的证实, 但是波和重联的关系还没有研究清楚. 本文根据 2001~2003 年 Cluster 飞船通过近地磁尾期间观测到的重联和波活动事件资料, 对波和重联的关系做了分析和讨论.

## 2 观测和分析

本文采用的 Cluster 飞船(C1, C3, C4 子飞船)的流场数据是 CODIF/CIS<sup>[19]</sup> 提供的, 磁场数据是 FGM<sup>[20]</sup> 提供的, 等离子体波数据是 STAFF<sup>[21]</sup> 提供的. 流场和磁场采用 4 s 采样精度数据, 波场采用 0.125 s 采样精度数据. 波动特性分析用 PRASSADCO 软件实现<sup>[22]</sup>, 由磁场三分量和电场两分量资料就得出波动的基本特性. 采用的坐标系是 GSM, 采用的时间是世界时(UT).

磁场重联是磁场的位形发生拓扑变化, 并伴随着磁能转化为等离子体动能和热能的过程. 在磁尾观测中, 当近地磁重联中性点(或线)位于地球和观测飞船之间时, 飞船因处于磁重联的尾侧出流区而应当观测到高速尾向粒子流和南向磁场分量这两个

基本特征,一般认为观测到这两个特征就可以初步判断为观测到了重联事件<sup>[16,23,24]</sup>. 本文在选取磁尾重联事件时,要求流场和磁场同时满足两个条件:(1)飞船观测到的尾向离子流的流速大于  $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (2)同时飞船还观测到南向磁场分量.

在 2001~2003 年期间,总共观测到 14 次重联事件,如表 1 所列,第 1 列给出了重联事件被观测的日期,第 2 列给出了重联被观测到的时间段,第 3 列给出第 2 列中起始时刻飞船所处的位置,第 4 列给出了事件中观测到的最大尾向流速  $(-V_x)_{\text{max}}$ ,第 5 列给出了事件中观测到最大的南向磁场分量  $(-B_z)_{\text{max}}$ ,第 6~8 列分别给出了第 2 列中起始时刻的等离子体值、质子数密度 ( $n_p$ ) 和质子温度 ( $T_p$ ). 可以看出,在观

测到重联事件前,等离子体值都大于 0.1,质子数密度都大于  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ ,质子温度都大于 4 keV. 根据这些参数可以得到,在这些事件期间,Cluster 飞船都进入了等离子体片区域<sup>[25]</sup>,有的甚至处于等离子体的中心区域. 在这些事件期间,Cluster 的 4 颗飞船都处在北半球的有 9 次,这 9 次中从北半球穿过赤道面运行到南半球的有 2 次,4 颗飞船都处在南半球的有 4 次,飞船分布在南北半球的有 1 次. 这 14 次事件中,观测到电磁波活动明显提前于重联事件的事件有 10 次;观测到四极结构的 Hall 磁场(即磁场  $B_y$  分量)的事件有 10 次;既观测到 Hall 磁场四极结构,又观测到波活动明显提前的事件有 8 次. 下面挑选出一些典型事件进行重点分析.

表 1 在 2001~2003 年间 Cluster 飞船观测到的 14 次磁尾重联事件  
Table 1 During 2001~2003, the 14 magnetotail reconnection events observed by Cluster spacecraft

事件年-月-日	时间(UT)	飞船位置(x, y, z) <sub>GM(R<sub>E</sub>)</sub>	$(-V_x)_{\text{max}}(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$(-B_z)_{\text{max}}(\text{nT})$	$n_p(\text{cm}^{-3})$	$T_p(\text{eV})$	
2001-08-13	03:20:00~03:30:00	(-17, -5.35, -2.87)	1000	16	0.68	0.2	7606
2001-08-17	16:20:00~16:50:00	(-18.5, -4.8, 0.6)	1400	20	2.65	1.1	6704
2001-08-22	09:45:00~10:05:00	(-18.9, -3.3, 1.1)	1000	10	88.85	0.39	5256
2001-08-29	10:30:00~10:40:00	(-19.2, -1.05, 2.1)	600	5	3.11	0.22	7179
2001-09-15	03:40:00~04:40:00	(-18.9, 3.7, -1.45)	800	10	13.63	0.7	4566
2001-10-01	09:20:00~10:20:00	(-16.2, 7.9, 1)	800	20	2.24	0.73	5919
2001-10-08	12:20:00~13:00:00	(-15.3, 9.5, 0.3)	600	20	2.65	0.55	6250
2002-08-14	02:40:00~04:20:00	(-18, -6.45, 0.8)	800	10	2.06	0.13	5026
2002-08-19	05:50:00~06:10:00	(-17, -4.5, -4.1)	800	8	0.31	0.5	3033
2002-08-21	07:50:00~08:20:00	(-18.5, -4.2, 0.2)	1500	20	3.07	0.32	7812
2002-09-13	18:00:00~19:00:00	(-17.5, 2.5, 2.5)	1300	10	2.99	0.35	7209
2002-10-14	14:00:00~14:30:00	(-14, 10, -0.5)	500	20	6.74	1.65	4911
2002-10-26	09:00:00~10:00:00	(-11, -11.5, -0.2)	800	15	1.32	0.3	9295
2003-09-17	13:00:00~13:30:00	(-17, 3.2, 0.58)	1400	20	0.19	0.1	8404

## 2.1 波活动明显提前、Hall 磁场和哨声模波都被观测到的重联事件

在重联前的等离子体片中观测到波活动增强,并且是无碰撞重联(即有满足 Hall 磁场四级结构的磁场分量  $B_y \neq 0$  存在)的事件共有 8 次(分别是 2001-08-17, 2001-08-22, 2001-10-01, 2001-10-08, 2002-08-14, 2002-08-21, 2002-10-26, 2003-09-17). 典型重联事件是在 2003-09-17 13:00~13:30 UT 时间段内. 在此期间飞船都处于昏侧北半球的磁尾等离子体片中  $(-17.2, 3.12, 0.41) R_E$ . 图 1(a, b, c, d, e) 分别给出了 2003-09-17 13:00~13:30 UT 时间段内飞船 C1(黑线)、C3(点线)和 C4(虚线)观测到的流场、磁场三分量和总磁场随世界时的变化. 在 13:11:30 UT, C1、C3 和 C4 同时观测到了尾向高速离子流(图 1a),它持续到 13:19:30 UT 结束. 在 13:11:30 UT, C1、C3 和 C4 同时观测到了磁场南向分量(图 1d),这个南向磁场分量持

续到 13:15:00 UT 又转为北向,北向磁场分量持续到 13:16:50 UT 再次转为南向,然后持续到 13:19:30 UT 结束. 在 13:00:00~13:19:30 UT 期间, C1、C3 和 C4 都观测到地向磁场分量(图 1b),之后观测到磁场转为尾向. 在 13:11:30~13:19:30 UT, C1、C3 和 C4 观测到的磁场几乎都是南向磁场(图 1c),偶尔转向北向,这些磁场特征与 Hall 磁场的四极结构是相符的. 因此这个事件是无碰撞重联事件,并且重联事件是在 13:11:30 UT 被观测到的.

图 2A 给出了 2003-09-17 C1 和 C4 在 13:00:00~13:19:30 UT 期间观测到的波动的特征. 由图 2(a1, a2) 可以看出, C1 和 C4 观测到的磁场能谱在 13:10:40 UT 已经增强了,由图 2(a3, a4) 可以看出电场能谱增强更早. 从图 2(a5, a6) 可以得出,这些增强电磁波活动的传播角都在准平行范围(图的蓝绿色部分  $0^\circ < \theta < 45^\circ$ ),并且都是右旋偏振的(图 2(a7, a8) 中的红色部分,  $c_B > 0$  表示波是右旋偏振,

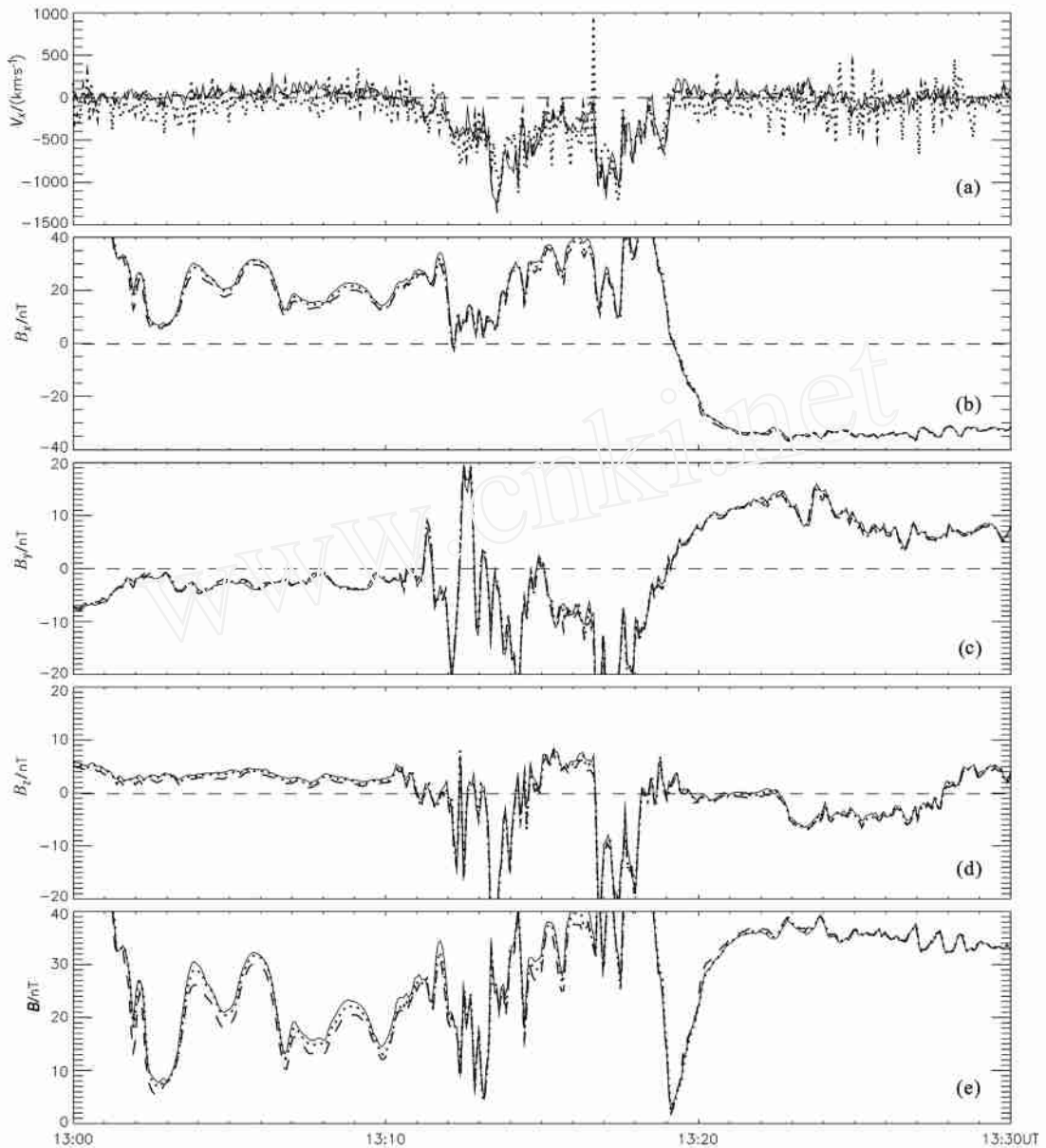


图 1 2003 - 09 - 17 观测到的流速和磁场特征

Fig. 1 The flow velocity and magnetic field characters observed on Sep. 17, 2003

$c_B < 0$  表示波是左旋偏振的,  $c_B$  的绝对值越大偏振的程度越大). 因此这些增强的电磁波中含有准平行传播的右旋椭圆偏振的哨声模. 观测到增强电磁波活动的时间比观测到重联事件开始的时间早 30 s 以上. 这些增强的波活动中还伴随着很强的静电波和叠加<sup>[26]</sup>的电磁波.

综上所述,这类重联事件中都观测到了 Hall 磁场和哨声模,并且增强的电磁波活动发生在观测到重联开始(即尾向流和南向磁场分量开始)之前几十秒甚至 1 min 以上时间内,这些增强的电磁波中含有哨声模. 这些事件中飞船可能处在重联的 X 线

附近.

## 2.2 波活动没有明显提前、但有 Hall 磁场和哨声波的重联事件

在重联事件期间观测到 Hall 磁场和波活动,但在重联前的等离子体片中并没有观测到波活动的重联事件共有 2 次(分别是 2002 - 09 - 13 和 2001 - 09 - 15),典型的事件是在 2002 - 09 - 13 18:00:00 ~ 18:30:00 UT 时间段内,在此时间段内飞船都处于昏侧北半球的磁尾等离子体片中 (- 17.55, 2.43, 2.13)  $R_E$ . 飞船 C1(黑线)、C3(点线)和 C4(虚线)观测到的流场、磁场三分量和总磁场分别如图 3(a, b, c, d,

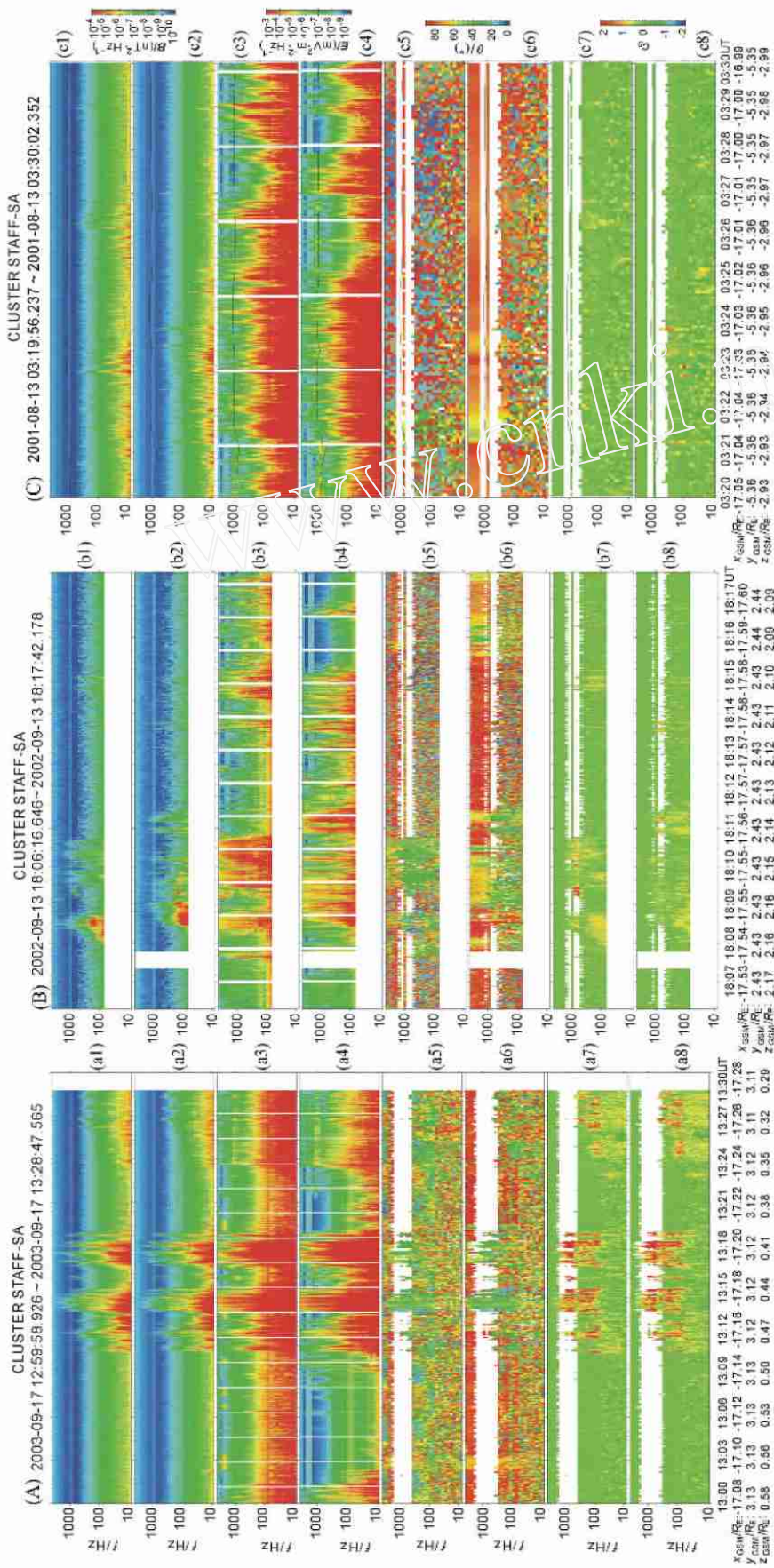


图 2 2003-09-17 (A), 2002-09-13 (B) 和 2001-08-13 (C) C1 和 C4 观测到的波动特征  
 (a1, a2; b1, b2; c1, c2) 是磁场三分量能量谱密度; (a3, a4; b3, b4; c3, c4) 是电场两分量的能量谱密度;  
 (a5, a6; b5, b6; c5, c6) 是波相对背景磁场的传播角; (a7, a8; b7, b8; c7, c8) 是波的偏振度。  
 Fig. 2 The characters of waves observed by C1 and C4 on (A) Sep. 17, 2003, on (B) Sep. 13, 2002 and on (C) Aug. 13, 2001  
 (a1, a2; b1, b2; c1, c2) is the dynamic spectra of total field turbulence B-power; (a3, a4; b3, b4; c3, c4) is the dynamic  
 spectra of total field turbulence E-power; (a5, a6; b5, b6; c5, c6) is the polar angles ( $\theta$ ) of the wave normal  
 direction with respect to ambient magnetic field; (a7, a8; b7, b8; c7, c8) is the sense of polarization.



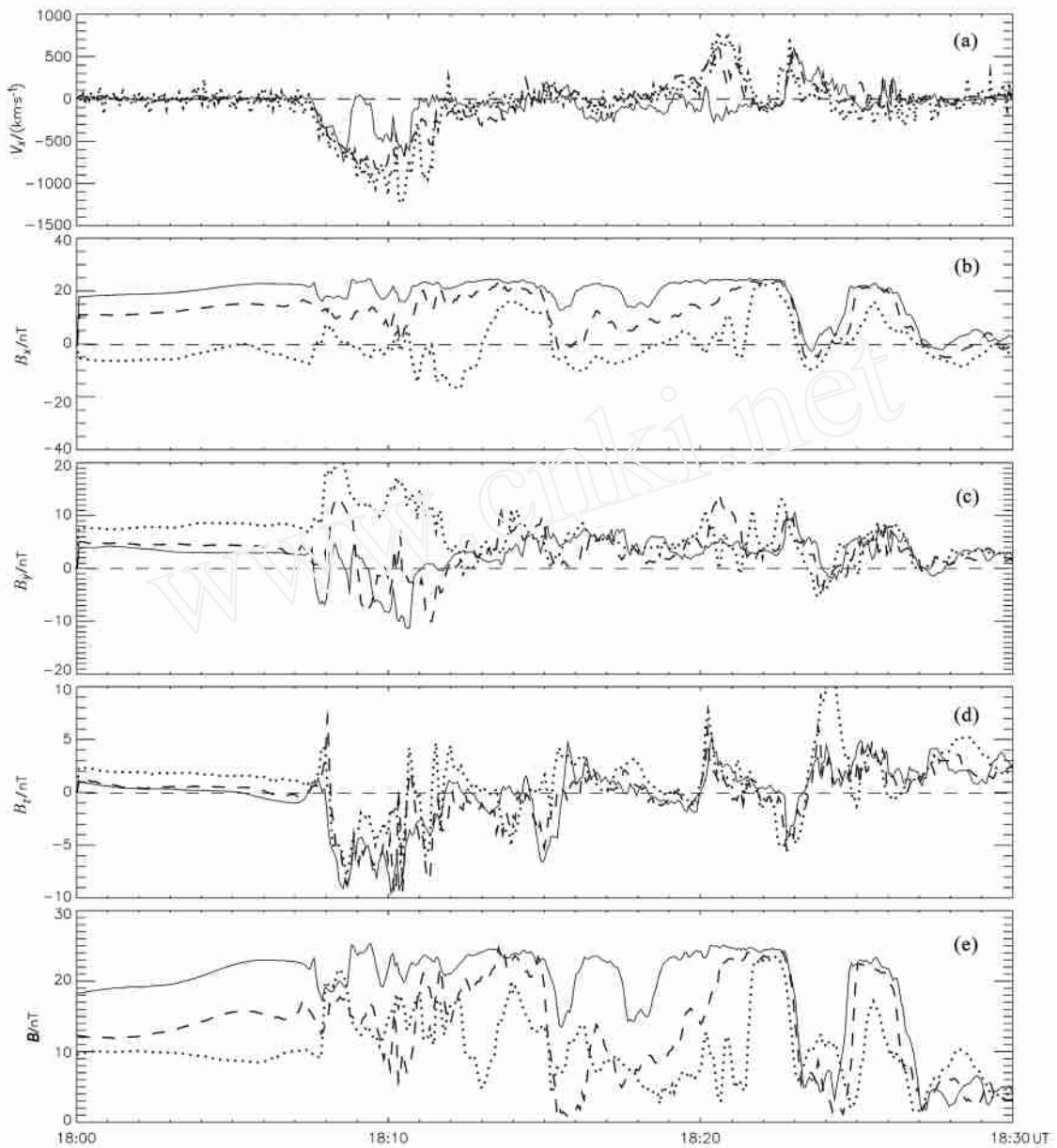


图 3 2002 - 09 - 13 观测到的流场和磁场特征

Fig. 3 The flow velocity and magnetic field characters observed on Sep. 13, 2002

e) 所示. 在 18:07:30 UT, C1、C3 和 C4 同时观测到高速尾向粒子流(图 3a), 它持续到 18:12:30 UT 为止, 持续了 5 min. 在 18:08:00 UT, C1、C3 和 C4 相继观测到南向磁场(图 3d), 它也持续到了 18:12:30 UT. 因此, 把该重联事件判定为 18:08:00 UT 开始的. 之后, C3 和 C4 都观测到了地向高速离子流(图 3a), 并且同时观测到北向磁场分量(图 3d). 离子流方向的反向表明, 重联 X 线经过了飞船. 在 18:08:00 UT, C3 观测到了昏向磁场分量(图 3c), C1 和 C4 观测到晨向磁场分量, 但是在 18:09:00 UT 观测到磁场的晨向分量转变为昏向分量. 在 18:19:00 UT, C1, C3

和 C4 都观测到了晨向磁场分量. 在 18:08:00 ~ 18:12:30 UT 时间段内, C1 和 C4 观测到的都是地向磁场(图 3b), C3 观测到的磁场几乎是尾向的. 因此, 观测到的重联事件是符合 Hall 磁场四极结构的, 应是无碰撞重联事件. Alexeev et al.<sup>[18]</sup> 也证实了这次事件是带 Hall 电流的无碰撞重联事件.

图 2B 给出了该事件在 18:06:00 ~ 18:18:00 UT 时段内, C1 和 C4 观测到的波动特征(在频率 < 60 Hz 范围没有相关数据). 可以看出, C1 和 C4 都很早就观测到了增强的电场扰动, 但是 C1 在 18:08:00 UT 才观测到增强的磁场扰动, C4 在 18:08:20 UT 才

观测到. 增强的电磁波没有比重联提前发生. 增强的电磁波的频率都在电子回旋频率以下, 这些波基本上是准平行传播的 (图中的传播角  $45^\circ$ ), 也基本上是右旋偏振的 (图中的  $c_B > 0$  黄色和红色部分). 因此观测到了右旋偏振的哨声波, 其中还叠加了其他波模.

综上所述, 观测到了增强的哨声波伴随无碰撞重联事件, 这些哨声波在整个重联过程中都被观测到, 并且整个重联过程还伴随着一些静电波. 这类事件共有 2 次, 都观测到了 Hall 磁场和哨声模. 飞船处于重联事件 X 线附近.

### 2.3 波活动提前、但事件期间没有观测到 Hall 磁场和哨声波的重联事件

只观测到波动比重联事件提前发生, 并没有观测到 Hall 磁场的一般重联事件 (共有 2 次, 分别是 2001 - 08 - 13 和 2002 - 10 - 14), 典型的事件是在 2001 - 08 - 13 03:20:00 ~ 03:30:00 UT 时间段内. 在此时间段内 Cluster 的四颗飞船都在晨侧南半球的磁尾等离子体片中 ( $-17.03, -5.36, -2.94$ )  $R_E$ .

图 4(a, b, c, d, e) 分别给出了 2001 - 08 - 13 03:20:00 ~ 03:30:00 UT 时间段事件飞船 C1 (黑线)、C3 (点线) 和 C4 (虚线) 观测到的流场、磁场三分量和

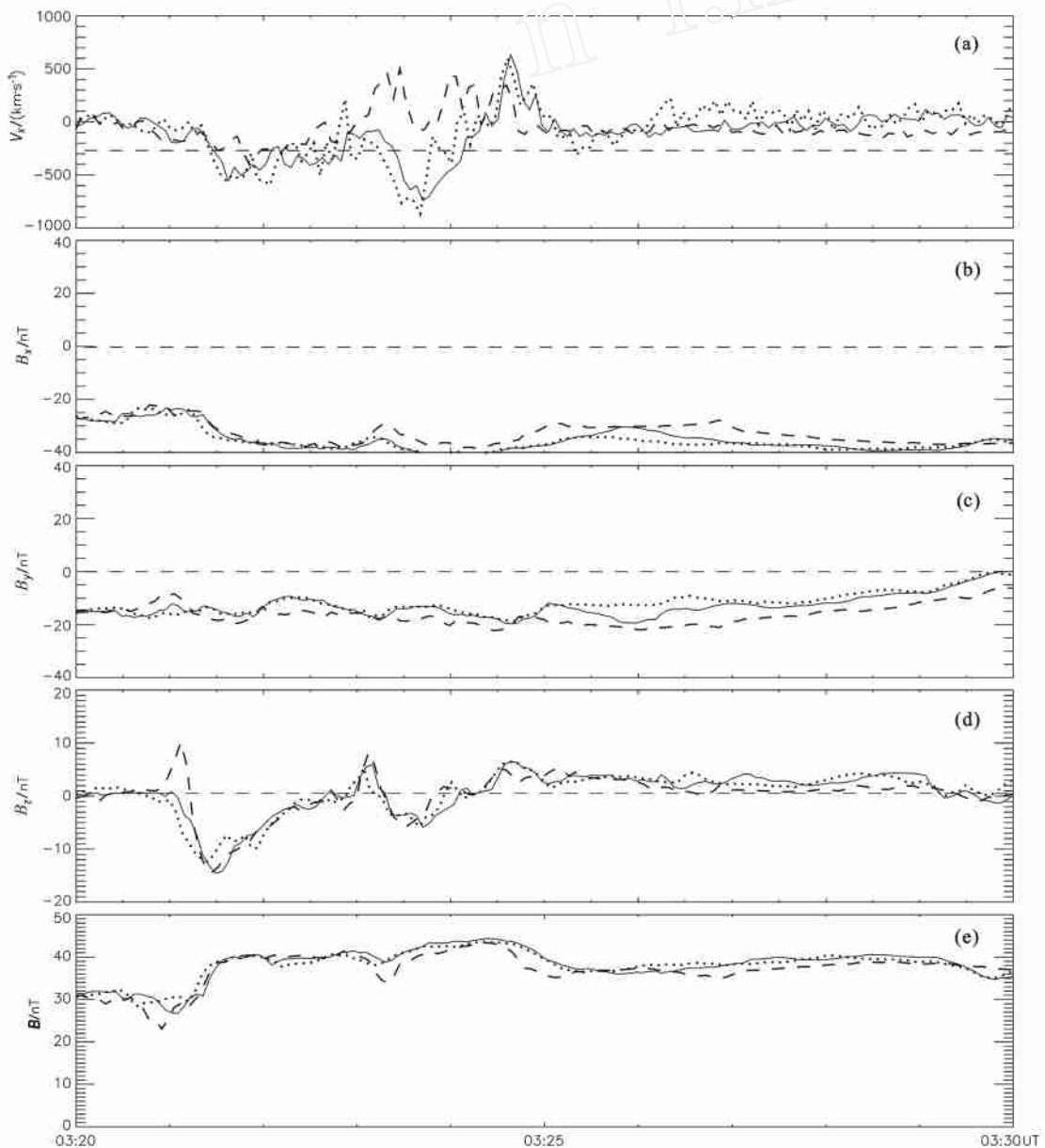


图 4 2001 - 08 - 13 观测到的流场和磁场特征

Fig. 4 The flow velocity and magnetic field characters observed on Aug. 13, 2001

总磁场随时间的变化. 飞船 C1、C3、C4 从 03:21:20 UT 开始几乎是同时观测到了尾向离子流(图 4a). C4 从 03:23:00 UT 观测到了尾向流朝向地向流的转换,但是 C1 和 C3 先观测到尾向流消失,然后又是更强的尾向流,并在 03:24:20 UT 转向了地向流. 这次尾向离子流速度最高几乎达到  $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . C1 和 C3 在 03:21:00 UT 先观测到了南向磁场分量(图 4d). 而 C4 则是在 03:21:00 UT 先观测到北向磁场分量,然后在 03:21:20 UT 观测到了南向磁场分量,也就是 C4 在这期间观测到了一个磁场的双极结构(图 4d). C1、C3 和 C4 在 03:23:00 UT 观测到了磁场由南向转向北向,并持续 20 s 以后转向南向. C1、C3 和 C4 在 03:24:20 UT 观测磁场又从南向磁场转为了北向场. 因此我们认为在 03:21:20 UT 开始观测到重联事件. 在这期间 C1、C3 和 C4 只观测到尾向磁场(图 4b)和北向磁场(图 4b). 磁场的特征和 Hall 磁场的极性恰恰相反<sup>[16]</sup>,所以我们把这次重联事件判断为普通重联事件. 观测到的总磁场在整个重联期间约为 45 nT,比无重联时的磁场增加了几个纳特. 从以上特征分析得出,飞船观测到了一次重联事件,并且 C4 穿越了中性点.

图 2C 给出了 2001-08-13 C1 和 C4 在 03:20:00~03:30:00 UT 期间观测到的波活动的特征. C1 和 C4 观测到的磁场扰动增强都是在低频范围(低于 20 Hz),20 Hz 频率是在 STAFF 仪器观测下限(10 Hz)附近,因此资料并不可靠. 而电场扰动增强的频率比较高,最高的达到了电子回旋频率附近. C1 观测到传播角大部分是在准平行范围( $0^\circ < \theta < 45^\circ$ ),也有一些准垂直的传播情况( $45^\circ < \theta < 90^\circ$ ),但是 C4 的观测结果中准平行和准垂直的情形都差不多. 这些波几乎是无偏振或者线偏振( $c_B = 0$ ),C4 观测到一些右旋偏振波(图中红色部分  $c_B > 0$ ),但是这些小红方块都出现在了频率比 20 Hz 高的区域. 因此 C1 和 C4 观测到的波有一种是准平行传播右旋偏振的波,并且这些波动都不明显,我们认为没有观测到哨声波活动. 静电波明显比重联提前观测到.

综上所述,在整个重联事件期间,观测到的波动静电性质很强,在重联事件期间和事件之前都观测到了增强的波活动. 这类事件共有 2 次,但是都没有观测到 Hall 磁场,观测到很弱右旋偏振的波,飞船的观测位置可能都离 Hall 磁场区域比较远.

### 3 结论和讨论

根据上述观测到的磁重联事件与波活动事件的特征和关系,可以得到以下结论:

(1) 第 I 类事件,在重联事件中都观测到了 Hall 磁场和哨声模,并且增强的电磁波活动发生在观测到重联开始(即尾向流和南向磁场分量开始)之前几十秒甚至 1 min 以上时间内. 这些波活动对重联的产生有着重要的意义,它们可能触发了磁重联. 重联发生后,随着重联的增强波活动频率增加,偏振性增强. 这类事件的飞船位置都处于重联的 Hall 磁场区.

(2) 第 II 类事件,在重联前的等离子体片中并没有观测到明显的波活动,但在重联开始后观测到了 Hall 磁场和哨声波. 这类事件都是无碰撞重联事件. 这类事件中飞船可能观测到了 Hall 场的边缘.

(3) 第 III 类事件,在重联前等离子体片中观测到波活动提前,但是在重联开始(观测到南向磁场分量和尾向流)后没有观测到 Hall 磁场和哨声波活动. 因此观测到了重联事件,但是没有观测到无碰撞重联特征. 是因为飞船处于远离重联分离线的区域,还是事件本身就没有 Hall 磁场? 在这些观测资料中还无法辨别.

表 2 列出了三类磁重联和相关波活动事件的一些基本特征,表中的第 2~7 列分别给出了这些事件的最大尾向流( $-V_x$ )的范围、最大南向磁场( $-B_z$ )的范围、是否观测到 Hall 磁场( $B_y$ )、事件中观测到的最大地向磁场( $B_x$ )或最大尾向磁场( $-B_x$ )值范围、电磁波的频率  $f$ (其中  $f_c$  是电子回旋频率)范围、波动的传播特征等. 由表 2 可以看出,第 I 类事件观

表 2 三类磁重联事件基本特征

Table 2 The basic characters of three kinds of reconnection events

事件类型	$-V_x/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$-B_z/\text{nT}$	Hall 磁场	$B_x/\text{nT}$	$f/\text{Hz}$	传播特征
(57%)	650~1500	10~22	有	20~60	$10 \sim f_c$	准平行右旋偏振(高频) 准垂直线偏振(低频)
(14.2%)	700~1200	10	有	25~20	$10 \sim f_c$	准平行右旋偏振(高频) 准垂直线偏振(低频)
(14.2%)	600~800	5~15	无	20~50	$10 \sim 20$	无规则传播



测到的尾向离子流和南向磁场均比第 和 类强,电磁波波动的频率也比较高.因此观测到的第 类事件的重联特征是最显著的,伴随的波活动也是最激烈的.表 1 中列出的 2001 - 08 - 29 和 2002 - 08 - 19 事件都不属于上述讨论的三类事件,这两次事件虽然观测到了南向磁场和高速尾向流,但没有观测到波活动和四极 Hall 磁场分量.

对上述结果我们讨论两点:

(1) 在这些重联事件中,观测到四极结构 Hall 磁场,同时就能观测到哨声模波.这些哨声模波的磁场扰动都在比较高的频段上增强,频率接近电子回旋频率.因此这些哨声属于高频哨声,有可能是电子束流不稳定性产生的.没有观测到 Hall 磁场的重联事件,同时也没有观测到哨声模.飞船越是接近 Hall 四极磁场区,观测到的电磁波活动越是强烈.这些统计结果表明,Hall 效应和哨声波是密切相关的.从这个统计结果来看,哨声模产生和传播的区域几乎都在 Hall 磁场的四极结构区,在这个区域外,哨声被抑制.哨声波是否就是只在 Hall 磁场的四极结构区产生和传播,还需要从理论、模拟和观测等方面去进一步研究.

(2) 在这 14 次事件中波活动先于重联开始时间的事件有 10 次,其中 7 次观测到了 Hall 磁场的四极结构,而且这 7 次事件都观测到了哨声波.这些提前的波活动事件多数在观测重联事件前几分钟就观测到了增强的电场扰动,并且在观测到重联前几十秒就观测到磁场扰动增强.为了区分是因为波速比流速快而先观测到波活动,还是波活动本身就比重联提前发生,以哨声波为例,我们对波的群速和离子流速进行比较.根据平行传播哨声波的色散关系为

$$\frac{c^2 k^2}{2} = 1 - \frac{2}{(\frac{pe}{e})}, \quad (1)$$

其中  $pe = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$  为电子等离子体频率,  $e = eB_0 / m_e$  为电子回旋频率,  $c$  为光速.

若考虑  $\omega < \omega_c < pe$  情况,哨声波的色散关系简化为

$$= c^2 k^2 \frac{e}{pe}, \quad (2)$$

于是哨声波的群速度为

$$V_g = \frac{2c}{pe} \sqrt{\frac{e}{e}} = \frac{2c}{f_{pe}} \sqrt{f_e f}. \quad (3)$$

在重联开始时由 C1 观测得到,电子密度  $n_e = 0.2 \text{ cm}^{-3}$ ,  $f_{pe} = 8.98 \times 10^3 \text{ Hz}$ ,  $f = 4.0 \times 10^3 \text{ Hz}$ ,波频率  $f = 40 \text{ Hz}$ ,电子回旋频率  $f_e = 700 \text{ Hz} < f_{pe}$ .因此,由(3)式计算得到哨声波的群速度为  $V_g = 2.5 \times 10^4 \text{ km} \cdot$

$s^{-1}$ ,尾向离子流速度为  $V_i = 600 \text{ km} \cdot s^{-1}$ .可见,波的群速度约为尾向离子流速度的 42 倍.在磁尾  $\sim 18 R_E$  的重联层中离子的惯性长度  $d_i = 500 \text{ km} \cdot s^{-1}$ ,重联电流片的厚度正比于离子的惯性长度,并且是离子惯性长度的几倍,重联层的长度一般也是厚度的几倍,而磁尾重联层的厚度<sup>[27-29]</sup>约是  $R_E \sim 2 R_E$ .因此重联层的长度可以取  $5000 \text{ km}$ .从中性点到飞船流场和波传播的距离可以取  $5000 \text{ km}$ ,那么波和流场观测到的时间相差约为  $10 \text{ s}$  左右.然而这次事件中波比重联提前  $50 \text{ s}$  观测到,因此即使考虑到波和流场运动时间的差别,哨声波活动也提前了约  $30 \text{ s}$  被飞船先观测到.其他事件也至少提前了  $10 \text{ s}$  观测到.这就说明了在等离子体片中能够观测哨声波,并且这些波动是不稳定的,随着重联的发生,这些波活动也增强.理论研究得到了同样的结果<sup>[5-8]</sup>.这些比重联提前增强的波动(静电模或者电磁模)对重联的开始(或重联的线性阶段向非线性阶段的过渡)可能有重要作用.这些哨声波可能是电子束流不稳定性或者是电子的回旋共振产生的<sup>[12]</sup>.

## 参考文献 (References)

- [1] Giovanelli R G. A theory of chromospheric flares. *Nature*, 1946, **158**: 81 ~ 82
- [2] Dungey J M. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **6**: 47 ~ 48
- [3] Drake J F. Magnetic reconnection: a kinetic treatment. In: Song P ed. *Physics of the Magnetopause*. AGU, Washington D. C., 1995. 155 ~ 165
- [4] Rogers B N, Denton R E, Drake J F, et al. Role of dispersive waves in collisionless magnetic reconnection. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**, doi:10.1103/PhysRevLett87.195004
- [5] Wang X G, Bhattacharjee A, Ma Z W. Collisionless reconnection: effects of Hall current and electron pressure gradient. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(12): 27633 ~ 27648
- [6] 周国成,曹晋滨,王德驹等.无碰撞等离子体电流片中的低频波. *物理学报*, 2004, **53**(8): 2644 ~ 2653  
Zhou G C, Cao J B, Wang D J, et al. Low-frequency waves in collisionless plasma current sheet. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2004, **53**(8): 2644 ~ 2653
- [7] Zhou G C, Wei X H, Cao J B, et al. Whistler wave instabilities in the collisionless current sheet. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2005, **29**: 404 ~ 412
- [8] 魏新华,周国成,曹晋滨等.无碰撞电流片低频电磁模不稳定性:MHD 模型. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3228 ~ 3236  
Wei X H, Zhou G C, Cao J B, et al. Low-frequency electromagnetic instabilities in a collisionless current sheet: magnetohydrodynamic model. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2005, **54**(7): 3228 ~ 3236
- [9] Akimoto K, Gray S P. Electro/ion Whistler instabilities and magnetic

- noise bursts. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A10): 11209 ~ 11214
- [10] Gurnett D H, Frank L A, Lepping R P. Plasma waves in the distant magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**(34): 6059 ~ 6071
- [11] Scaf FL, Coroniti F V, Kennel C F, et al. ISEE 3 wave measurements in the distant geomagnetic tail and boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, 1984, **11**: 335 ~ 339
- [12] Zhang Y, Matsumoto H, Kojima H. Whistler mode waves in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A12): 28633 ~ 28644
- [13] Deng X H, Matsumoto H. Rapid magnetic reconnection in the Earth's magnetosphere mediated by whistler waves. *Nature*, 2001, **410**: 557 ~ 560
- [14] Drake J F, Biskamp D, Zeiler A. Breakup of the electron current layer during 3-D collisionless magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 2921 ~ 2924
- [15] 周国成,蔡春林, H. Reme 等. 近地磁尾准无碰撞磁重联事件. *空间科学学报*, 2003, **23**(1): 25 ~ 33  
Zhou G C, Cai C L, Reme H, et al. Quasi-collisionless magnetic reconnection events in the near-Earth magnetotail. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 2003, **23**(1): 25 ~ 33
- [16] Cattell C, Dombeck J, Wygant J, et al. Cluster observations of electron holes in association with magnetotail reconnection and comparison to simulations. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, doi: 10.1029/2204JA010519
- [17] Cattell C, Crumley J, Dombeck J, et al. Polar observations of solitary waves at the Earth's magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(5): 1065, doi: 10.1029/2001GL014046
- [18] Alexeev I V, Owen C J, Fazakerley A N, et al. Cluster observation of currents in the plasma sheet during reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L03101, doi: 10.1029/2004GL021420
- [19] Reme H, Aoustin C, Bosqued J M, et al. First multi spacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster Ion Spectrometry (CIS) experiment. *Annales Geophysicae*, 2001, **19**: 1303 ~ 1354
- [20] Balogh A, Carr C M, Acuna M H, et al. The Cluster magnetic field investigation: overview of on-flight performance and initial results. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**: 1207 ~ 1217
- [21] Cornilleau-Wehrlin G, Chantreul S, Perrault S, et al. First results obtained by the Cluster STAFF experiment. *Ann. Geophys.*, 2003, **21**: 437 ~ 456
- [22] Santolik O, Parrot M, Lefeuvre F. Singular value decomposition methods for wave propagation analysis. *Radio Sci.*, 2003, **38**(1): 1010, doi: 10.1029/2000rs002523
- [23] Oieroset M, Lin R P, Phan T D, et al. In situ detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail. *Nature*, 2001, **412**(26): 414 ~ 417
- [24] Nishida A, Hayakawa H, Hones E W. Observed signatures of reconnection in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 1422 ~ 1436
- [25] Hughes W J. The magnetopause, magnetotail, and magnetic reconnection. In: Kivelson M G, Russell C T eds. *Introduction to Space Physics*. Camb. Univ. Press, 1995. 227 ~ 287
- [26] Santolik O, Pichett J S, Gurnett D A, et al. Magnetic component of narrowband ion cyclotron waves in the auroral zone. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(12): 1444, doi: 10.1029/2001JA00146
- [27] Wang X G, Bhattacharjee A, Ma Z W. Scaling of collisionless forced reconnection. *Phys. Res. Lett.*, 2001, **87**(26): doi: 10.1103/PhysRevLett.87.2650
- [28] Shay M A, Drake J F, Rogers B N. The scaling of collisionless, magnetic reconnection for large systems. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 2163 ~ 2166
- [29] Thompson S M, Kivelson M G, Khurana K K, et al. Dynamic Harris current sheet thickness from Cluster current density and plasma measurements. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: doi: 10.1029/2004JA0107

(本文编辑 何燕)