

李世友,邓晓华,王敬芳. ESW 在磁尾磁场重联耗散区分形线附近的观测特性及其作用. 地球物理学报, 2009, **52**(4):902~910, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.006

Li S Y, Deng X H, Wang J F. Characteristic and role of ESW in the separatrix of reconnection in the magnetotail. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4):902~910, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.006

ESW 在磁尾磁场重联耗散区分形线附近的观测特性及其作用

李世友,邓晓华,王敬芳

武汉大学电子信息学院,武汉 430079

摘 要 磁场重联是空间能量释放和转换的重要机制. 静电孤立波 (ESW) 虽然在空间中有广泛观测,但在磁场重联附近少有直接观测,对它在磁场重联附近的特性了解甚少. 通过 Geotail 卫星对一个磁场重联事件的观测,仔细分析了其边界层上观测到的静电孤立波的特性,并讨论了它对磁场重联的影响. 研究表明,亚暴期间在磁尾发生磁场重联,重联区域的分形线附近观测到了大量的静电孤立波,其特性与在其他地方观测到的并没有显著差别,但具有更明显的非线性和孤立性的特征. 它们对电子加速和能量耗散有促进作用,加速磁场重联的进程.

关键词 磁场重联,静电孤立波,离子耗散区,电子加速

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.006

中图分类号 P353

收稿日期 2008-09-18,2009-02-16 收修定稿

Characteristic and role of ESW in the separatrix of reconnection in the magnetotail

LI Shi-You, DENG Xiao-Hua, WANG Jing-Fang

Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract Magnetic reconnection plays a key role in the energy release and transformation in geospace. Though Electrostatic Solitary Wave (ESW) is widely observed in space, direct observation in the vicinity of reconnection site is rare, which makes it ambiguous of the characteristic of ESW associated with reconnection. Here we present a reconnection event for which ESW is ample in the separatrix of the reconnection diffusion region. The characteristic of the ESW associated with reconnection is studied and the effect of ESW on reconnection is discussed. The result shows that, the ESWs observed in the separatrix of reconnection which takes place during a substorm, is more solitary and more nonlinear than that in other regions. The ESW associated with reconnection can propel reconnection process via presenting parallel electric field and accelerate electron.

Keywords Magnetic reconnection, Electrostatic Solitary Wave, Ion diffusion region, Electron acceleration

1 引 言

静电孤立波 (ESW, Electrostatic Solitary Wave)

自 Matsumoto 等^[1]利用 Geotail 卫星^[2]首次观测之后,受到了很大的重视,许多文献对此做了大量的研究,包括其观测的位置、基本特性、产生机制等. 静电孤立波主要是由电子双流不稳定性 (Electron two-

stream instability) 或者高能尾部不稳定性 (Bump-on-tail instability) 激发产生的一种小尺度的孤立电势结构, 这种结构被称为 BGK 势能结构^[3-5]. 由于空间中存在各种偶发的电子加速, 比较容易满足其激励机制, 因此, ESW 在空间各个区域都有较为广泛的观测, 例如, 太阳风^[6]、磁鞘^[7,8]、弓激波和磁层顶附近^[9-11]、极区^[12,13]、极光加速区^[14]、磁尾^[1, 15]等. 但 ESW 在这些区域观测的一个共同特征, 就是基本上都是在边界层被观测到.

ESW 属于较早期观测到的宽带静电噪声 (BEN, Broad Electrostatic Noise)^[16,17] 的较高频部分. 宽带静电噪声的观测特性是, 在谱图上看到很短的时间内在频率域上有很大大范围的极大增强. 这种噪声通常在等离子体片边界层 (PSBL, Plasma Sheet Boundary Layer) 和磁鞘观测到, 并且在 PSBL 观测到的 BEN 通常与高速突发等离子体流 (BBF, Bursty Bulk Flow) 一同被观测. ESW 的基本性质, 主要体现在如下几个方面: (1) 孤立性的静电结构; (2) 非线性演化; (3) 一般平行于背景磁场传播, 其传播速度在 1000 km/s 的量级; (4) 时间脉宽一般为毫秒量级, 幅度从几微伏每米到几毫伏每米.

磁场重联是空间中广泛存在的一种现象. 当反平行 (或准反平行) 的磁力线在某处由于某种因素作用对向运动并相互挤压, 最后瞬间断裂以致于重新联结, 极大地改变了当地的磁场位形, 从而导致磁能向动能和热能转换. 作为一种能量释放和转换的机制, 磁场重联在空间物理的研究中具有非常重要的地位, 是空间物理研究的前沿热点之一. 对其耗散区拓扑结构、伴随的波动现象、电子加速机制等的研究是目前研究磁场重联的重点和热点. 最近, 在磁场重联区域附近观测到有静电孤立波^[15,19,20], 粒子模拟的结果也表明, 磁场重联可以产生静电孤立波^[20,21]. 但是, 一方面, 真正在重联区附近观测到静电孤立波的事例还较少; 另一方面, 对 ESW 在磁场重联区的性质和作用及其对磁场重联的影响等的认识, 还比较模糊. 虽然 Drake 等的模拟结果^[21] 表明 ESW 与电子加速有一定的联系, 但是仍然缺乏直接的观测证据. 本文通过对一个磁场重联事件的研究, 重点分析了在其边界层观测到的 ESW 的特性及其作用.

2 卫星数据

Geotail 卫星于 1992 年 7 月 24 日在美国佛罗

里达发射成功, 其目的是为了探测和研究在地球磁层各个区域, 尤其是磁尾中的各种空间结构特征和空间现象及其动力学过程. 由于其运行主要是在远离地球的磁尾, 位置在 $8R_e \sim 210R_e$ 之间, 根据卫星运行的轨道而命名为 Geotail. 同时, 在它掠过磁层顶区域的时候, 我们也可以得到磁层顶各个区域的空间物理量的数据从而研究这部分区域的各种动力学过程.

等离子体波动探测仪 (PWI, Plasma Waves Instrument)^[22] 主要是为了研究磁尾以及磁层其他区域的各种快变现象和波动. PWI 有三个重要的部件: 多通道分析仪 (MCA, Multi-Channel Analyzer)、扫频分析仪 (SFA, the Sweep Frequency Analyzer)、波形捕捉仪 (WFC, the Waveform Capture). MCA 和 SFA 用于分析频谱, 它们在作用上互相补充. SFA 具有高的频率分辨率, 而 MCA 具有高的时间分辨率. 而 WFC 则是属于时间域的探测仪, 其扫描频率是 12000 次/s, 但因数据量巨大, 每 275 s 工作 8.75 s. WFC 通过两个卫星自旋平面上的两个相互正交的天线 (PANT 和 WANT) 探测电场 (E_x 和 E_y), 通过三个磁感应线圈探测三个磁场分量 (B_x , B_y 和 B_z), 其中, B_z 为平行于卫星自转轴方向上的磁场, B_x , B_y 的方向在卫星旋转平面内并相互正交. WFC 可观测频率在 10~4000 Hz 之内的波动信息, 数据分辨率为 12 kHz, 这为研究空间等离子体波提供了强有力的工具.

除了利用 Geotail 卫星的 PWI 仪器来研究等离子体波动之外, 本文用到的数据还包括: 3 秒分辨率的磁场 (MGF, Magnetic Field)^[23] 和低能等离子体 (LEP, Low Energy Particle)^[24] 数据, 用于研究空间磁场和等离子体的整体情况; LEP 的电子和离子的二维分布数据用于研究粒子的分布. 此外, AE 指数、Polar/UVI/CANOPUS 等数据也被应用到.

3 观 测

3.1 磁场重联事件概述

AE 指数和地面磁场数据显示在 1997 年 2 月 25 日 09:35UT (世界时, 下同) 左右发生了一次较强的磁层亚暴. 此时, Geotail 卫星位于 $[-26.8, 6.1, 0.8]R_e$, 该位置较容易直接观测到磁场重联. 图 1 给出了 Geotail 卫星在 09:30UT 到 10:20UT 观测的磁场和等离子体数据, 同时在图 1a 中给出 09:00UT 到 12:00UT 的 AE 指数. 约在 09:36UT,

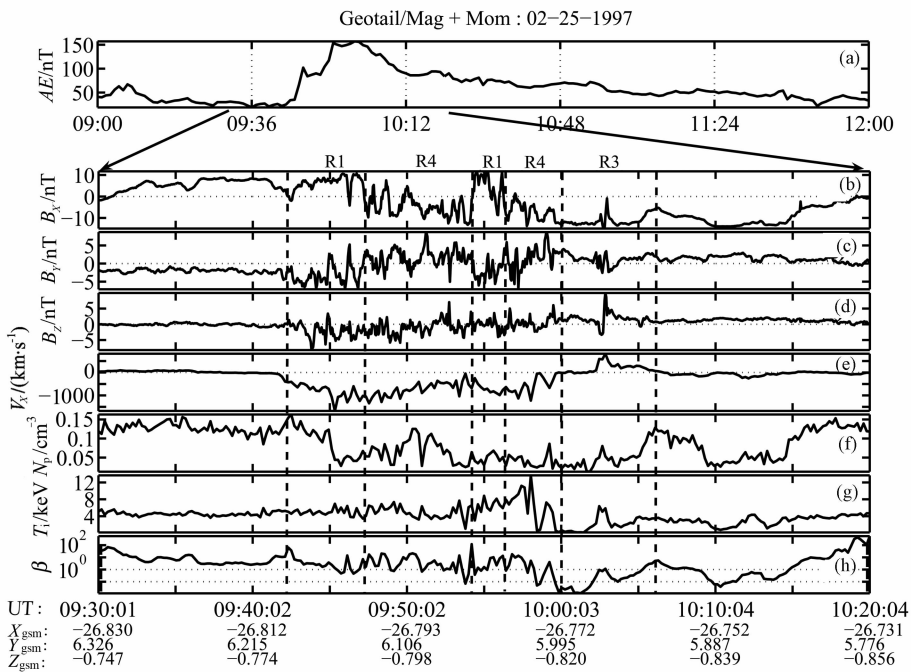


图1 Geotail 卫星在 1997 年 2 月 25 日观测到的磁尾磁场重联事件

Fig. 1 Reconnection observation by Geotail on Feb. 25, 1997

AE 指数开始有一个极大的增长,从 5 nT 快速增长到 09:48UT 左右的 100 nT,到 10:00UT 左右增长到极大值,随后慢慢恢复,一直持续到接近 12 时.在 09:46UT 左右还有一个短暂的恢复阶段,此时亚暴是所谓的“伪中断”,09:48UT 时的突然增长预示着膨胀相的开始,此时为亚暴突始(onset).这是一个完整的亚暴演化过程,其中 09:38~09:48UT 是增长相,09:48~10:00UT 为膨胀相,10:00~12:00UT 是长达两个小时的恢复相.加拿大 CANOPUS 地磁监测网的数据也显示了类似的过程. CONT(65.754°N, 248.75°E), RABB(58.222°N, 256.32°E), FSMI(60.017°N, 248.05°E), MCMU(56.657°N, 248.79°E), FSIM(61.756°N, 238.77°E), DAWS(64.048°N, 220.89°E), FCHU(58.763°N, 265.92°E), GILL(56.376°N, 265.36°E)(以上均为地磁坐标系)探测到的地磁数据均在 09:36UT 左右开始有负向弯绕,并于 10:00UT 左右达到负向极大值.另外, Polar 卫星位于极光椭圆区也观测到了 09:42~09:44UT 短时间之内的极光亮斑增强.图 2 给出了 Polar/UVI(Ultraviolet Imager) 仪器^[25]在 09:42:59UT 前后一分钟之内的极光亮斑增强观测图.其中图 2a 左侧给出投影到地理北极的极光亮斑图,右侧给出投影到 Mlat-MLT 平面的极光亮斑图.该图清晰显示了在该时刻极光有一个极大的增强.但是,由于该极光亮斑持续时间不长,

在 09:41:27UT 时(图 2b 左)还没有观测到显著增强的亮斑,而到 09:43:18UT 时(图 2b 中)亮斑开始衰减,09:44:12UT(图 2b 右)时已经很弱.这个时间段内的极光亮斑增强对应于 AE 和地磁指数显示的亚暴增长相阶段.

图 1(b~d)给出了 09:30UT 到 10:20UT 的 Geotail 卫星探测到的磁场的三个分量 B_x , B_y 和 B_z (地心太阳磁层 GSM 坐标系,下同),观测时间基本上在亚暴的增长相和膨胀相期间.图 1(e~g)给出了等离子体速度 X 分量 V_x 、等离子体密度 N_p 和离子温度 T_i ;图 1h 是等离子体 β 值($\beta=2\mu_0 \cdot nkT/B_0^2$).等离子体 β 可以大致判断卫星相对于等离子体中性电流片的相对位置,一般认为 $0.1 < \beta < 1$ 代表卫星处于等离子体片边界层上,Asano 等^[26]以 $\beta > 0.5$ 作为卫星进入内等离子体片(inner plasma sheet)的依据.从图 1e 看出,在 10:00UT 时 V_x 有明显的反流,从 09:40UT 开始的尾向(负向)流到最高峰甚至可以到达 -1674 km/s,等离子体流经过 10:00UT 左右的反相后变为地相流,其峰值达 821 km/s.同时,图 1d 的 B_z 分量有与 V_x 趋势相同的反相结构,并且,图 1b 磁场 B_x 分量显示卫星在这段时间之内不断接近甚至越过中性电流片,从北尾瓣到南尾瓣或者相反.这表明电流片不断变化,存在南北向的拍动和变厚-变薄的演化,而 Geotail 卫星处于电流片,根据等离子体反流及其与之相对应的 Z 分量的磁

场的变化,可以判断卫星恰好处于正在发展变化之中的磁场重联的耗散区^[26~30]附近.根据 Xiao 等^[31]论文中图 1 对二维磁场重联耗散区的区域划分,本事件中卫星相对于重联耗散区的位置可以分为五段,如图 1 用竖直的虚线画出的五个分段,其中反流之前有四个分段,分别是 09:40~09:46:30UT, 09:46:30~09:53:30UT, 09:53:30~09:55UT 和 09:55~10:00UT. 卫星在这四个时间段中相对于重联耗散区分别处于 1 区(用 R1 标记,在尾侧、北侧)、4 区(用 R4 标记,在尾侧、南侧)、1 区、4 区,这也表明在亚暴过程中的尾部等离子体片是高度演化的,尤其在发生磁场重联的区域附近,电流片常常伴随有拍动和变厚-变薄等现象. 10:00UT 反流之后,卫星进入重联耗散区的地向一侧,进入 3 区(用 R3 标记,在地侧、南侧).

在该事件中,由于当反流的时候(~10:00UT) X 分量的磁场(B_x)较大,约为 -15 nT,也即卫星不是直接从重联耗散区穿过,而是从其南尾瓣一侧穿越,从 4 区经过重联的入流区进入到 3 区.这也可以从反流时候的 B_z 值和等离子体 β 值来判断.反流时候, B_z 约为 2 nT,而 $\beta=0.0242$,表明此时磁场并没有变得很小,而卫星也不是处于中心电流片的位置.尽管如此,通过以上分析可以得知,Geotail 卫星从正在发展变化之中的重联耗散区南侧穿越,既有 1 区和 4 区(尾侧),也有 3 区(地侧),还有入流区(耗散区的南侧).从 09:40UT 到 10:04UT 这段时间中卫星相对于重联耗散区的位置参考示意图 3. 在该示意图中,带箭头的细实线代表磁力线,带箭头的虚曲线代表卫星相对于重联耗散区的运动轨迹,夹在磁力线之间的细实线代表重联区域分形线(separatrix),R1~R4 代表重联区在 $X-Z$ 平面的四个区域(Xiao 等^[31]).

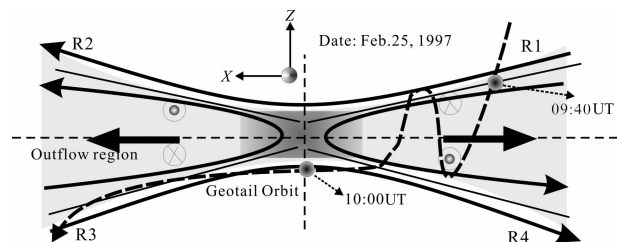


图 3 Geotail 卫星对重联耗散区的相对位置示意图
09:40UT 代表 Geotail/WFC 观测到丰富的 ESW 的时刻.

Fig. 3 Schematic showing of the relative location of Geotail to the magnetic reconnection diffusion region
Ample ESWs are observed by Geotail/WFC at 09:40UT.

3.2 ESW 在耗散区分形线的观测研究

在磁尾,ESW 一般被认为在等离子体片边界层观测到^[1, 31].在 09:40UT,卫星开始探测到等离子体流(图 1e),根据 3.1 节的分析,此时卫星处于重联区的 1 区(图 1 中用 R1 标记,在尾侧、北侧),但由于只是刚开始探测到有等离子体流,Geotail 卫星处于刚刚跨越重联分形线进入外流区的过程之中(参见图 3 中 09:40UT 时的 Geotail 卫星的位置),此时等离子体 $\beta=2.8$,也比较吻合此时卫星的位置.恰好在这跨越重联分形线之后,Geotail 卫星的 WFC 探测仪观测到了丰富的静电孤立势能结构,即 ESW.

图 4a 给出了 Geotail 卫星的多通道分析仪(MCA)从 09:30UT 到 10:20UT 的电场和磁场的时频谱图.从 3.1 节对该事件的分析中已经得知,在 09:40UT 到 10:04UT 这段时间内卫星处于重联耗散区附近,在此期间 MCA 探测到丰富的波动(图 4a 和 4b),这些波动既有电磁场性质的,也有静电的,表明磁场重联是一种能量快速释放和转换的机制,在重联区域存在丰富的各种波动和粒子加速.我们重点研究 09:40UT 时(图 4a 的黑色箭头标识之处)当卫星处于边界层时候探测到的静电孤立势能结构.

WFC 仪器的工作扫描频率是 12000 次/s,但因数据量巨大,每 275 s 工作 8.75 s.在 09:40UT, WFC 的探测时间是从 09:40:08.332UT 到 09:40:17.082UT.图 4b 给出这段时间之内 WFC 探测到的 E_v 分量通过傅里叶变换得到的时频谱图.由于篇幅限制没有把 E_u 的频谱图和磁场的频谱图显示出来,但 E_v 的频谱图与 E_u 的类似,而三个磁场分量的频谱图在此期间都没有强的增长.图 4b 显示在从 09:40:11UT 到 09:40:15UT 的时间内有很强的电场频谱增长,其频率在几百到一千多赫兹;由于磁场分量的频谱在同样的时间段上基本上没有什么增长(未画出),这种波动属于宽带静电噪声^[16, 17].

通过把 WFC 探测到的 E_u 分量和 E_v 分量按照卫星当时姿态所处的卫星坐标系,投影到探测到的背景磁场之中得到平行分量和垂直分量.图 4c 给出从 09:40:13.110UT 开始的 1800 ms(见图 4b 中的黑色横条和箭头)之内的平行分量和垂直分量的波形图.在这段时间内,平行分量出现了非常多的针状双极非线性的脉冲,这是非常典型的 ESW.挑选了 3 处用黑色横条标识出来的比较典型的波形,放大显

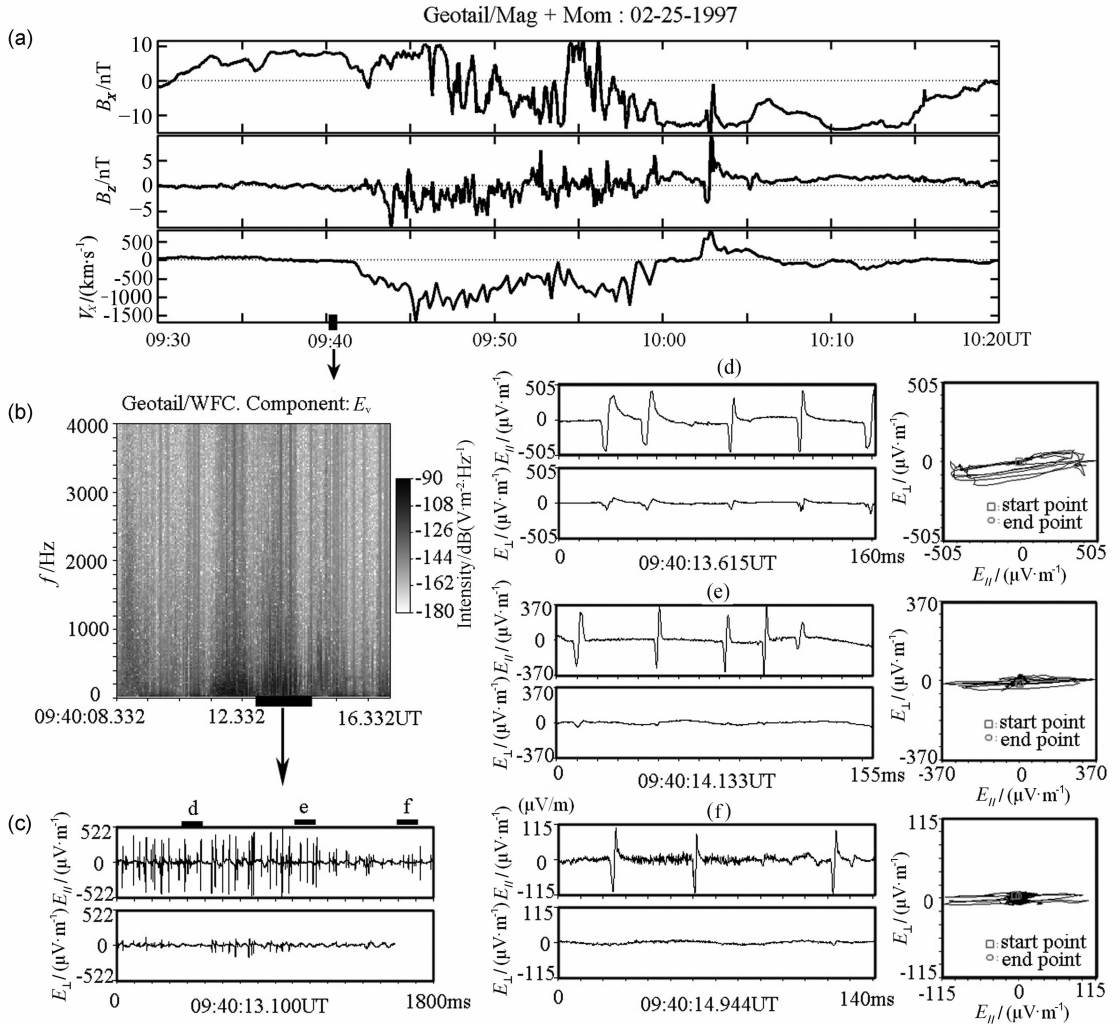


图 4 当卫星位于重联分界面上的典型的 ESW 观测事例

Fig. 4 Typical cases of ESWs observed in the separatrix of magnetic reconnection

示在图 4(d~f), 同时在对应的波形的右侧给出了其极化特征. 图 4d 显示的是 09:40:13.613UT 开始的 160 ms 内的 ESW. 有 5 个针状脉冲, 其形状都是先负向增长到极大值然后反向到正向极大值最后回落. 这种双极结构是通常所谓的 A-型 ESW, 它代表空间电子洞在磁力线上相对于 Geotail 卫星的正向逆着磁力线方向往 Geotail 卫星方向传播^[18], 在通过 Geotail 卫星之时被 WFC 仪器捕捉到电场结构. 这种双极 ESW 脉冲宽度约为 5~10 ms, 脉间距为 10~30 ms. 电场的幅度达 470 $\mu\text{V}/\text{m}$. 同时, 右侧的极化图显示, ESW 的垂直分量很小, 几乎是平行极化的. 图 4e 显示的是 09:40:14.133UT 开始的 155 ms 内的 ESW, 图 4f 显示 09:40:14.195UT 开始 140 ms 内观测到的波形. 这些波形都是典型的 B-型 ESW, 脉冲宽度和脉间距和图 4d 中的差不多, 只是幅度稍小.

WFC 在 8.75 s 内观测到极为丰富的 ESW, 共出现 434 个双极静电结构, 这给我们研究 ESW 的性质和作用提供了丰富的素材. 图 5 给出这段时间内观测到的 ESW 的统计特性, 其中图 5d 是把这些 ESW 的幅度归入从 0 到 600 $\mu\text{V}/\text{m}$ 的 100 个 bin 之中. 图 5a 显示 ESW 的脉冲宽度大约为 1~7 ms, 图 5b 给出 ESW 的脉宽和脉间距的关系, 结果表明, 脉间距在 30 ms 以下, 虽然 ESW 的间隔长短不一, 但都大于对应的 ESW 的脉宽, 这也说明了 ESW 的高度孤立性, 它们在空间中对应的是一个一个演化成熟的电子洞 (electron hole)^[21, 32, 33]. 图 5c 表明, 在此期间 Geotail 卫星观测到的 ESW 几乎都对应对应着等离子体 β 值在 10 左右, 说明 ESW 主要是在磁场重联耗散区分形线附近更接近中心等离子体片的区域, 即靠近磁场重联外流区被观测到的. 图 5d 统计了观测到的 ESW 的幅度特征, 虽然本事件中在磁

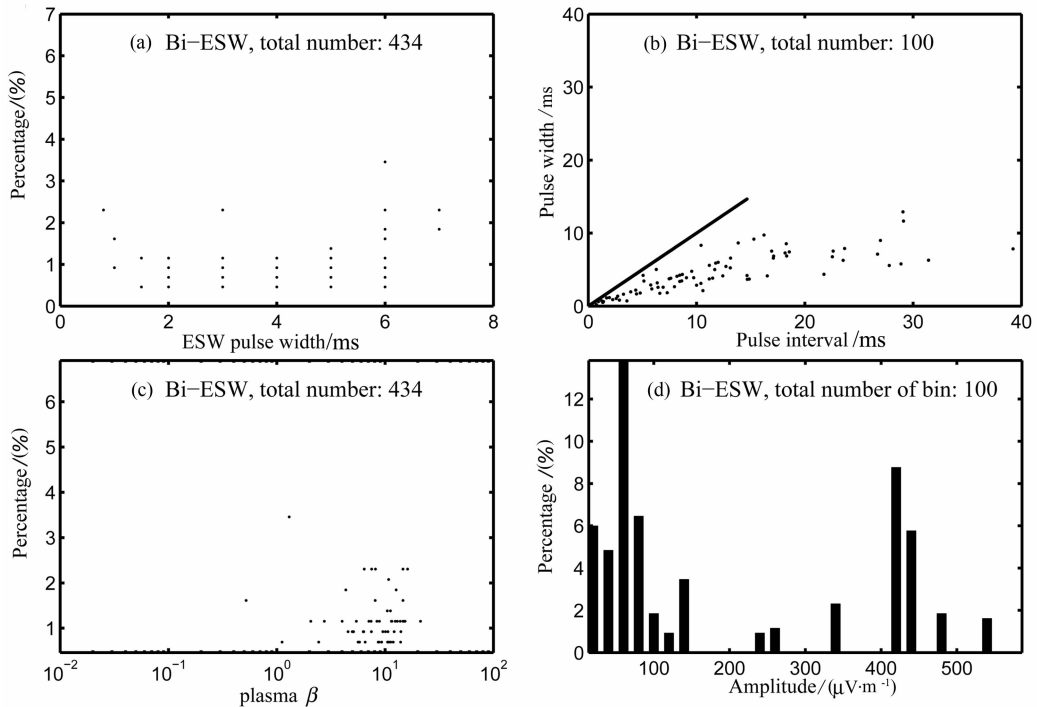


图 5 重联耗散区附近分形线上观测到的 ESW 的统计

Fig. 5 Statistical result of ESWs on the separatrix of the magnetic reconnection diffusion region

尾等离子体片边界层的 ESW 的幅度变化范围很广,从几到几百微伏每米都有分布,但约 60% 都在 $100 \mu\text{V}/\text{m}$ 以下。

磁场重联耗散区观测到的静电孤立波与电子加速有密切关系。图 6a 和 6b 分别给出 09:40:06~18UT 这 12 s 之内的二维电子和离子分布图。平面轴的标度是能级,LEP 可以探测 16 个能级的粒子分布;极轴方向代表探测方位角,二维 LEP 可探测 16 个方位角上的粒子,在实际操作中,每一个方位角上有微小的角度差,本例中采用平均方位角。LEP 数据的时间分辨率只有 12 s,但幸运的是在本例静电孤立波的观测时刻上有数据。图 6a 显示,在方位角约 57° 左右,电子出现高能(约 20 keV)的粒子束,说明电子被显著加速了。而离子的加速并没有呈现离子束的情形(图 6b)。背景磁场的方位角大约为 $54^\circ\sim 57^\circ$,因此,在 ESW 观测阶段,电子加速大致平行于背景磁场方向。虽然 LEP 的数据有 12 s 的积分效应,但是,由于 WFC 在该 8.75 s 的观测周期中观测到了大量的静电孤立波,这说明了磁场重联边界层观测到的 ESW 和平行电子束有密切的联系。

4 结论和讨论

本文重点研究了在亚暴期间发生的磁场重联耗

散区分形线附近的静电孤立波(ESW)的特性以及 ESW 对磁场重联过程中电子加速的影响。Geotail 卫星在 1997 年 2 月 25 日 09:30~10:20UT 期间在近磁尾的电流片中观测到了一个正在发展过程中的磁场重联事件,并大致穿越了磁场重联的耗散区。09:40:08~13UT 期间,Geotail 卫星处于磁场重联耗散区分形线附近,并观测到大量的静电孤立波(ESW)。其基本统计特性有:(1)大部分幅度在几十到 $100 \mu\text{V}/\text{m}$;(2)脉冲宽度为 $2\sim 6 \text{ ms}$;(3)孤立性特别明显,脉冲间隔几乎都大于脉冲宽度;(4)非线性结构明显;(5)基本上平行于背景磁场,是一种平行传播的静电波。结果表明,在磁场重联附近观测到的 ESW 具有明显的非线性孤立势能结构,是一种不断演化发展的电子洞。LEP 数据则表明,在大量观测到 ESW 的阶段出现显著的平行电子束,说明电子得到加速。

ESW 本质上是一种孤立的电子洞(E-hole)^[21,31,32],在形态上是一种微观电场。Chen 等^[4,5]认为 ESW 在结构上类似于势能井,属于 BGK^[3]势能结构。ESW 的激发机制主要有电子双流不稳定性和高能尾部不稳定性,这种条件比较容易满足,因此在空间中广泛存在。磁场重联作为一种剧烈的能量释放和转换机制,很容易激发电子双流不稳定性。在重联耗散区的外流区,等离子体流沿着等离子体片边界层

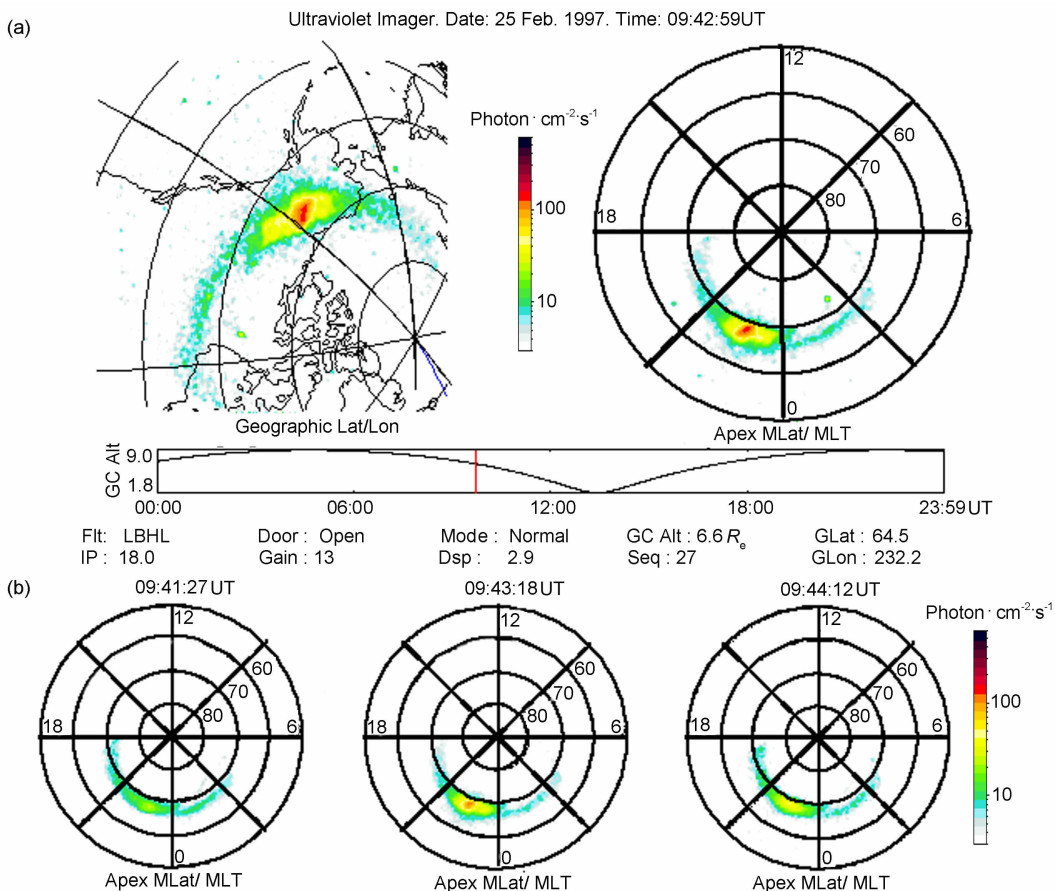


图 2 Polar/UVI 对极光椭圆区的极光亮斑的观测

(a) 09 : 42 : 59UT 观测到的极光亮斑增强;(b)是 Polar/UVI 在 09 : 41 : 27UT, 09 : 43 : 18UT, 09 : 44 : 12UT 时刻的观测图.

Fig. 2 Auroral enhancement in the Polar Cusp Region observed by Polar/UVI

(a) Observed at 09 : 42 : 59UT, when the auroral is the mostly enhanced during the observation time span;

(b) Observed by Polar/UVI at 09 : 41 : 27UT, 09 : 43 : 18UT and 09 : 44 : 12UT.

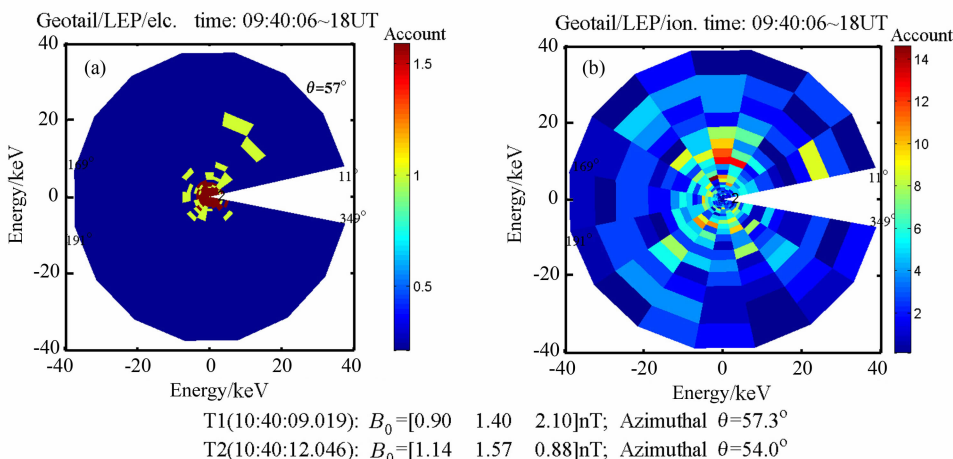


图 6 LEP 观测的 12 s 分辨率的二维粒子分布图,观测时间为 09 : 40 : 06~12UT,对应于 ESW 的观测

(a) 二维电子分布;(b)离子分布.背景磁场方向大致在方位角 57°左右,如(a)图标示.

Fig. 6 Two-dimensional particle distribution as observed by LEP instrument. The observation time is at 09 : 40 : 06~12UT, corresponding to the ESW observation

(a) Electron 2-D distribution; (b) Ion 2-D distribution. The azimuthal angle of ambient field is in about 57 degree, as indicated in (a).

喷发,产生电子双流分布^[20],激发 ESW. Farrell 等^[35]也认为在重联耗散区的边界层上观测到的静电孤立波与平行电场有密切关系. 从这一层面上来说, ESW 本质上是一种小尺度的电子洞,它们通过产生平行电场^[35]来加速电子^[21]使得磁场重联产生的能量能够快速耗散,加速重联进程.

磁场重联在时间尺度上属于中尺度,除了一些连续磁场重联^[35~39],一般在几分钟到几十分钟量级. 但是 ESW 是一种时间尺度特别小的波动,并且,可以沿着磁力线传播. Farrell 等^[35]也认为 ESW 较之其他类型的波动,对磁场重联的能量耗散作用有限. 因此, ESW 在磁场重联的能量快速释放的各种因素中并非居于最重要的地位. Deng 和 Matsumoto^[41]认为导致磁场重联快速进行的是哨声而不是传统上认为的阿尔芬波. 另外,动力学阿尔芬波和低混杂波对磁场重联的加速也有广泛报道. 尽管如此,在靠近重联耗散区的边界层看到丰富的 ESW,表明 ESW 对磁场重联的发展过程有重要的影响,这种影响主要体现在,通过提供平行电场加速电子从而加快能量耗散进程,推动磁场重联进一步发展.

参考文献 (References)

- [1] Matsumoto H, Kojima H, Miyatake T, et al. Electrostatic solitary waves ESW in the magnetotail; BEN waveforms observed by Geotail. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**:2915
- [2] Nishida. The GEOTAIL Mission. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**:2871~2873
- [3] Bernstein I B, Greene J M, Kruskal M D. Exact nonlinear plasma oscillations. *Phys. Rev.*, 1957, **108**:546
- [4] Chen L J, Parks G K. BGK electron solitary waves in 3D magnetized plasma. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(9): 1331, doi:10.1029/2001GL013385
- [5] Chen L J, Thouless D J, Tang J M. Bernstein-Greene-Kruskal solitary waves in three-dimensional magnetized plasma. *Phys. Rev.*, 2004, E. 69, 055401, doi: 10.1103/PhysRevE.69.055401
- [6] Mangeney A, Salem C, Lacombe C, et al. WIND observations of coherent electrostatic waves in the solar wind. *Annales Geophysicae*, 1999, **17**:307
- [7] Pickett J S, Menietti J D, Gurnett D A, et al. Solitary potential structures observed in the magnetosheath by the Cluster spacecraft. *Nonlinear Proc. Geophys.*, 2003, **10**:3
- [8] Pickett J S, Chen L J, Kahler S W, et al. On the generation of solitary waves observed by Cluster in the near-Earth magnetosheath. *Nonlinear Proc. Geophys.*, 2005, **12**:181~193
- [9] Bale S D, Kellogg P J, Larson D E, et al. Bipolar electrostatic structures in the shock transition region; evidence of electron phase space holes. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:2929~2932
- [10] Cattell C, Crumley J, Dombeck J, et al. Polar observations of solitary waves at the Earth's magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**, 2001GL0140046
- [11] Cattell C, Neiman C, Dombeck J, et al. Large amplitude solitary waves in and near the Earth's magnetosphere, magnetopause and bow shock; Polar and Cluster observations. *Nonlinear Proc. Geophys.*, 2003, **10**:13
- [12] Ergun R E, Carlson C W, McFadden J P, et al. Fast satellite observations of large-amplitude solitary wave structures. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:2041~2044
- [13] Miyake T, Omura Y, Matsumoto H. Electrostatic particle simulations of solitary waves in the auroral region. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:23239
- [14] Pickett J S, Kahler S W, Chen L J, et al. Solitary waves observed in the auroral zone: the Cluster multi-spacecraft perspective. *Nonlinear Proc. Geophys.*, 2004, **11**:183~196
- [15] Deng X H, Matsumoto H, Kojima H, et al. Geotail encounter with reconnection diffusion region in the Earth's magnetotail: evidence of multiple X lines collisionless reconnection?. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A05206, doi: 10.1029/2003JA010031
- [16] Scarf F, Frank L A, Ackerson K, et al. Plasma wave turbulence at distant crossing of the plasma sheet boundaries and neutral sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 1974, **1**:189
- [17] Gurnett D, Frank L, Lepping R. Plasma waves in the distant magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**:6059
- [18] Kojima H. Study on the plasma waves in the geomagnetic tail region via spacecraft observations [Ph. D. thesis]. Kyoto University, Japan, 1998
- [19] Matsumoto H, Deng X H, Kojima H, et al. Observation of Electrostatic Solitary Waves associated with reconnection on the dayside magnetopause boundary. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, (306), 1326, doi:10.1029/2002GL016319
- [20] 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**, A01211, doi:10.1029/2004JA010519
- [21] Drake J F, Swisdak M, Shay M A, et al. Formation of electron holes and particle energization during magnetic reconnection. *Science*, 2003, **299**:873~877
- [22] Matsumoto H, Nagano I, Anderson R R, et al. Plasma wave observations with Geotail spacecraft. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1994, **46**:59~95
- [23] Kokubun S, Yamamoto T, Acuna M H, et al. The Geotail magnetic field experiment. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1994, **46**: 7~21
- [24] Mukai T, Machida T, Saito Y, et al. The low energy particle (LEP) experiment onboard the Geotail satellite. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1994, **46**:669~692
- [25] Brittnacher M, Pann J, Parks G, et al. Auroral observations by the Polar Ultraviolet Imager (UVI). *Adv. Space Res.*,

- 1997, **20**(4/5):1037~1042
- [26] Asano Y, Mukai T, Hoshino M, et al. Current sheet structure around the near-Earth neutral line observed by Geotail. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A02212, doi:10.1029/2003JA010114
- [27] Oieroset M, Phan T D, Fujimoto M, et al. In situ detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail. *Nature*, 2001, **412**:414~416
- [28] Nagai T, Shinohara I, Fujimoto M, et al. Geotail observations of the Hall current system: evidence of magnetic reconnection in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (A11): 25929~25950, doi:10.1029/2001JA900038
- [29] Mozer F S, Bale S D, Phan T D. Evidence of diffusion regions at a subsolar magnetopause crossing. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**:015002
- [30] Retino A, Sundkvist D, Vaivads A, et al. In situ evidence of magnetic reconnection in turbulent plasma. *Nature Physics*, 2007, **3**:235, doi:10.1038/nphys574
- [31] Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al. A Cluster measurement of fast magnetic reconnection in the magnetotail. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L01101, doi:10.1029/2006GL028006
- [32] Kojima H, Omura Y, Matsumoto H, et al. Characteristics of electrostatic solitary waves observed in the plasma sheet boundary: statistical analyses. *Nonlinear Proc. Geophys.*, 1999, **6**:179
- [33] Omura Y, Matsumoto H, Miyake T, et al. Electron beam instabilities as generation mechanism of electrostatic solitary waves in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A2): 2685~2698, doi:10.1029/95JA03145
- [34] Oppenheim M M, Newmann D L, Goldman M V. Evolution of electron phase-space holes in a 2-D magnetized plasma. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**:2344
- [35] Farrell W M, Desch M D, Kaiser M L, et al. The dominance of electron plasma waves near a reconnection X-line region. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (19):1902, doi:10.1029/2002GL014662
- [36] Phan T D, Gosling J D, Davis M S, et al. Extended magnetic reconnection at the Earth's magnetopause from detection of bi-directional jets. *Nature*, 2000, **404**:848~850
- [37] Phan T D, Sonnerup B U Ö, Lin R P. Fluid and kinetics signatures of reconnection at the dawn tail magnetopause: Wind observations. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:25489~25502
- [38] Phan T D, Frey H U, Frey S, et al. Simultaneous Cluster and IMAGE observations of cusp reconnection and auroral proton spot for northward IMF. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(10):16-1~16-4, CiteID 1509, doi:10.1029/2003GL016885
- [39] Phan T D, Gosling J D, Davis M S, et al. A magnetic reconnection X-line extending more than 390 Earth radii in the solar wind. *Nature*, 2006, **439**:175~178
- [40] Frey H U, Phan T D, Fuselier S A, et al. Continuous magnetic reconnection at Earth's magnetopause. *Nature*, 2003, **626**:533~537
- [41] Deng X H, Matsumoto H. Rapid magnetic reconnection in the Earth's magnetosphere mediated by whistler waves. *Nature*, 2001, **410**:557~560

(本文编辑 何 燕)