

# 中低纬度 Pc3-4 地磁脉动特性研究—— 子午工程数据分析初步结果<sup>\*</sup>

张青梅<sup>1,2</sup> 王赤<sup>2</sup> 李晖<sup>2</sup> 李传起<sup>1,3</sup>

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210044)

2(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 100190)

3(广西师范大学电子工程学院 桂林 541004)

**摘要** 利用新建成的子午工程地磁台站数据,对比分析了地磁平静期间(2011年3月20—27日)和磁暴期间(2011年9月25日至10月1日)Pc3-4地磁脉动的时空分布特征及其对行星际条件的响应。数据分析结果表明,中低纬度( $1.3 < L < 2.3$ ,  $L$ 为磁壳参数)的Pc3-4地磁脉动在这两个时期内的分布存在明显的晨昏不对称性,在昼侧前出现明显的Pc3-4地磁脉动并与行星际上游波动密切相关,其振幅增强可能与太阳风动压脉冲相关,高速太阳风更易导致Pc3-4地磁脉动;而对于近赤道低纬( $L < 1.3$ )区域,无论是在地磁平静期还是磁暴期均未能观测到Pc3-4地磁脉动,Pc3-4地磁脉动存在明显的纬度效应。

**关键词** Pc3-4地磁脉动,行星际总磁场,锥角,太阳风速度

**中图分类号** P 353

## Characters of the Pc3-4 Magnetic Pulsations at Middle and Low Latitudes: Preliminary Geomagnetic Results From Chinese Meridian Project

ZHANG Qingmei<sup>1,2</sup> WANG Chi<sup>2</sup> LI Hui<sup>2</sup> LI Chuanqi<sup>1,3</sup>

1(College of Math and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

2(State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004)

**Abstract** The characters of the Pc3-4 magnetic pulsations and their relationships to interplanetary conditions were studied during the periods of both the magnetic quiet (March 20 to 27, 2011) and storm (September 25 to October 1, 2011), using ground-based geomagnetic field measurements from the new-developed Chinese Meridian Project. Preliminary results show there exist significant dawn-dusk asymmetric distribution of the Pc3-4 pulsations in the middle-low latitudes ( $1.3 < L < 2.3$ ),

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB825602),国家自然科学基金项目(41231067, 41204118)和国家重点实验室专项基金项目共同资助

2013-01-10 收到原稿, 2013-03-18 收到修定稿

E-mail: qmzhang@spaceweather.ac.cn. 通讯作者王赤, E-mail: cw@spaceweather.ac.cn

with Pc3-4 pulsations activity are observed mainly in the pre-noon sector, during both time periods. They are closely related to the interplanetary conditions, with high-speed solar wind and solar wind dynamic pressure pulsation leading to enhancement of the Pc3-4. However, Pc3-4 pulsations activity is not observed near the equatorial low latitudes ( $L < 1.3$ ) due to latitudinal effect.

**Key words** Pc3-4 pulsations, Interplanetary Magnetic Field (IMF), Cone angle, Solar wind velocity

## 0 引言

地磁脉动是指地磁场的各种短周期变化, 频率范围一般为 1~1000 mHz, 振幅一般为百分之几到几十 nT. 地磁脉动可分为连续脉动和不规则脉动两大类. 地面观测到的中频段 (6.7~100 mHz) 的连续脉动 (Pc3-4) 主要是在磁层昼侧 (04:00 LT–20:00 LT) 观测到的磁流体力学波<sup>[1–5]</sup>. 超低频磁流体波 (ULF 波) 可划分为上游波 (UW) 和场线共振 (FLR) 两种类型. 上游波型的地磁脉动主要与向磁层传输的上游波相关, 此上游波是由激波前兆区沿行星际磁力线运动的太阳风质子被弓激波反射形成的离子回旋不稳定性产生的<sup>[6]</sup>. 对于偶极磁场, 两端固定的磁力线受上游波的驱动而受迫振荡发生共振, 如果上游波的周期与磁力线的共振周期相同, 便会产生场线共振类型的脉动. 场线共振类型的地磁脉动周期会随地磁纬度的不同而变化, 而上游波型的地磁脉动周期一般不会随地磁纬度的变化而变化<sup>[7–8]</sup>.

关于地磁脉动的产生源及作用机制研究开始于 20 世纪 60 年代. Satio 的研究<sup>[9]</sup> 首次表明了地磁脉动活动与太阳风速度相关. 随后, Bolshakova 和 Troitskaya<sup>[10]</sup> 研究发现脉动的出现率取决于行星际磁场的方向, 当行星际磁场方向与日地连线的方向几乎平行时, 脉动的出现率会更高. Troitskaya 等<sup>[11–12]</sup> 发现 Pc2-4 地磁脉动的频率与行星际磁场 (IMF) 的总强度满足  $f$  (mHz)  $\approx 6B_{\text{IMF}}$  (nT) 的关系. Greenstadt 和 Olson<sup>[13]</sup> 利用行星际磁场方向与日地连线的夹角来解释增强的地磁脉动活动, 指出由于优先出现在弓激波上游区的准平行结构导致上游波增强从而激发 Pc3-4 地磁脉动, 而 Pc3 振幅的改变在特定周期内无明显规律. Russell 等<sup>[14]</sup> 发现当行星际磁场方向与日地连线的夹角较小时, Pc3 地磁脉动更易产生, 这是由于日下弓激波处的上游波直接向磁层传输产生的. Takahashi 等<sup>[15]</sup> 得到了 Pc3-4 地磁脉动的频率与行星际磁场方向及日地连线夹角  $\theta_{\text{XB}}$  更

为精确的关系. Miyake 等<sup>[16]</sup> 利用 Suisei 卫星探测发现, 太阳风速度与由地面台站 (Onagawa) 观测到的磁壳层参数  $L = 1.3$  处地磁场 Pc3 振幅的相关性随时间而减小. 同样, Yedidia<sup>[17]</sup> 等在分析 IMP-8 卫星观测的太阳风速度与地面台站 (L'Aquila) 观测的 Pc3 振幅谱之间相关性时也得到了类似结论. 此外, 有研究分析了其他行星际参数, 例如等离子体数密度、行星际磁场分量、时钟角、质量通量、动压、动能通量密度以及 Akasofu 的  $\varepsilon$  函数等太阳风参数对地磁脉动活动的影响, 但是这些影响非常小<sup>[17–22]</sup>. Le 等<sup>[23–24]</sup> 研究了在平均太阳风速度 (约 350 km·s<sup>-1</sup>) 和小锥角  $\theta_{\text{XB}}$  条件下, 1999 年 5 月 11 日的太阳风粒子低密度事件, 认为磁层和地面均观测不到 Pc3s 活动. Zandrea 等<sup>[25]</sup> 研究了地理经度约为  $-40^\circ$  处的低纬和近赤道纬度 ( $1.0 < L < 1.2$ ) 地面台站观测到的 Pc3-4 地磁脉动, 指出这些脉动是由于电离层增加的电导率与增强的赤道电激流调节激波前兆区及在低纬向磁层和电离层传播的压缩波而产生的. Villante 等<sup>[26]</sup> 研究了地理经度约为  $20^\circ$  的中低纬度区内 ( $1.4 < L < 1.9$ ) 地面台站观测到的午前 Pc3-4 地磁脉动, 认为其与行星际上游波相关. De-Lauretis 等<sup>[27]</sup> 研究提出, 极盖区及低纬地面台站观测到的 Pc3-4 地磁脉动分别是由上游波通过磁尾侧翼及日下弓激波附近区域向磁层传输产生的. Heilig 等<sup>[28]</sup> 研究了分布在地磁经度  $100^\circ$  子午链上的高中纬度台站 ( $1.8 < L < 6.1$ ) 观测的地磁脉动, 首次得到 Pc3-4 的振幅与磁层顶日下点距离以及上游波马赫数相关, 其结果说明, 上游波是中纬昼侧 Pc3s 的产生源. Villante 等<sup>[29]</sup> 发现北纬  $38^\circ$  及南极洲的地面台站观测到的 Pc3-4 地磁脉动与由 Cluster 观测到的弓激波上游附近对称的激波前兆区上游波相关, 是上游波通过日下点分别向昼侧半球及磁尾侧翼传输而产生的. 可见, 磁层内不同位置及不同地方时观测到的地磁脉动产生机制及作用明显不同. 另外, Zong 等<sup>[30]</sup> 利用 Cluster-Double 及其他卫星的

高时空分辨率数据,研究了外辐射带的高能电子和行星际激波与 ULF 波的作用机制,其结果表明,行星际激波在等离子体层边界处可激发 ULF 波,其电场可以加速或减速外辐射带的高能电子. Zhang 等<sup>[31]</sup>利用 OMNI 数据观测及模拟,系统研究了同步轨道处正负太阳风动压脉冲激发 ULF 波的问题,其结果表明,在晨昏侧 ULF 波的极型和环型以同相位振荡,而在正午和子夜为反相位振荡,且由太阳风动压脉冲激发的 ULF 波的振幅在正午比在晨昏侧大.

迄今为止, Pc3-4 地磁脉动主要集中于高、中纬度的地面台站观测配合卫星观测的研究,而对位于不同子午链的中低纬度地区研究较少. 东半球空间环境地基综合监测子午链(简称子午工程)<sup>[32]</sup>是跨越中国中低纬度地区的近地空间环境监测网络系统,可用于研究这条链上分布的地面台站观测到的 Pc3-4 地磁脉动特性.

本文利用子午工程地面台站的地磁观测数据,重点研究了中低纬度地区的 Pc3-4 地磁脉动特性及其与行星际总磁场 IMF 锥角  $\theta_{XB}$  的相关性,对比分析了不同地磁条件下(即地磁平静期间和地磁扰动期间)Pc3-4 地磁脉动的时变特征.

## 1 数据来源

### 1.1 子午工程 120°E 子午链地面台站数据

子午工程 120°E 子午链的 14 个磁通门磁力仪观测台站位于中低纬度处(除南极洲中山站外),北起黑龙江漠河站,南至海南三亚站,其地理纬度范围为 18.3°—53.5°,站间两两相距约 4° ~ 5°,距离

约 400~500 km. 磁通门磁力仪测量地磁场  $H, D, Z$  三分量,采样频率为 1 Hz,系统的噪声量级为 0.1 nT. 这里选择子午工程的 8 个地磁台站(见表 1,其相应磁壳层参数  $L$  值从 1.0 增至 2.3),利用磁通门磁力仪观测数据开展典型事例对比分析,考察磁平静时期(3月20—27日)和磁扰动时期(9月25日至10月1日)地磁脉动的时空变化特性及其与行星际条件的关系,并初步探讨其产生机制.

### 1.2 太阳风等离子体参数和行星际磁场数据

分析数据采用的是从 CDAWeb 网 \* OMNI2 数据库获得的地磁平静时期(2011年3月20至3月27日)和磁暴时期(2011年9月25日至10月1日) ACE 卫星测试的地球弓激波上游时间分辨率为 1 h 的太阳风等离子体及行星际磁场参数.

图 1 分别给出了所研究的地磁平静时期和磁暴时期事例对应的行星际磁场及太阳风等离子体数据. 其中,锥角是由时钟角和纬度角通过关系式

$$\cos \theta_{XB} = \cos \Phi_{IMF} \cos \theta_{IMF}$$

计算得到的<sup>[33]</sup>. 图 1(a)给出的是 2011 年 3 月 20—27 日地磁平静时期的数据. 从图 1(a)可以看出,在这一地磁平静时期,地磁  $Dst$  指数的绝对值小于 20 nT,表明此期间地磁扰动相对平静;行星际总磁场强度在 3 月 22—24 日变化较大,在其余时间其值基本保持在 5 nT 左右;行星际磁场时钟角(行星际磁场矢量在黄道面的投影与日地方向的夹角)在 3 月 22 日 13:30 UT 发生突变,从之前的 270° 突变为 90°;纬度角(行星际磁场矢量与黄道面的夹角)表征行星际磁场的螺旋方向在此时间内均在绝对值小

表 1 台站的位置

Table 1 Locations of the stations

地面台站	地磁纬度/(°)	地磁经度/(°)	地理纬度/(°)	地理经度/(°)	$L$ 值
MHT(漠河站)	48.61	195.91	53.48	122.37	2.29
MZL(满洲里站)	44.91	191.20	49.60	117.49	1.99
NAT(农安站)	38.59	198.13	44.47	125.18	1.64
SSL(十三陵站)	35.13	189.47	40.73	116.58	1.50
MLS(马陵山站)	28.65	190.93	34.65	118.37	1.30
JFT(九峰站)	24.37	186.80	30.50	114.48	1.21
ZQT(肇庆站)	16.68	185.91	23.05	113.46	1.09
QZT(琼中站)	12.12	181.70	19.06	109.83	1.05

\* <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>

于  $50^\circ$  的范围内波动; 锥角 (行星际矢量磁场与日地连线的夹角) 在此时间内以  $50^\circ$  为界限上下波动; 太阳风速度在 3 月 22 日 13:30 UT 从  $342 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  逐渐增加至  $516 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 经过 3~4 天后减少至  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  初始值; 太阳风动压在 3 月 22 日由  $1.13 \text{ nPa}$  增加至  $7.16 \text{ nPa}$  而后又逐渐减少至初始值; 太阳风质子数密度也在 3 月 22 日突变, 先增加而后逐渐恢复.

图 1(b) 给出的是 2011 年 9 月 25 日至 10 月 3 日地磁扰动期间的数据. 从图 1(b) 可以看出, 在这一时期, 地磁  $Dst$  指数在 9 月 26 日 12:30 UT 时刻达到最小值  $-101 \text{ nT}$ , 在磁暴初相 9 月 26 日 11:30 UT—13:30 UT 期间,  $Dst$  指数由  $14 \text{ nT}$  增加到最大值  $32 \text{ nT}$ , 在其磁暴主相 13:30 UT—23:30 UT,  $Dst$  指数由  $32 \text{ nT}$  快速降低至最小值  $-101 \text{ nT}$ , 在磁暴恢复相  $Dst$  指数逐渐增加; 行星际总磁场强度从 9 月 26 日 11:30 UT 至 27 日 00:30 UT 期间由  $5.8 \text{ nT}$  突增至  $32.8 \text{ nT}$ , 而后逐渐降低至  $4.5 \text{ nT}$ , 其余时间行星际总磁场约为  $5 \text{ nT}$ ; 时钟角在磁暴主相期间由  $355.5^\circ$  快速减小至  $99.9^\circ$ ; 纬度角在磁暴期间上下波动并无明显的变化; 锥角在磁暴期间以  $50^\circ$  为界限上下波动; 太阳风速度在磁暴初相 11:30 UT 时刻开始由  $333 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至  $704 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而后经过 6~7 天时间逐渐减少至初相前的值; 太阳风动压在磁暴初相开始后发生明显的几次大幅波动; 太阳风质子密度与太阳风动压有基本相同的几次大幅度波动.

## 2 事例分析

### 2.1 地磁平静期间和磁暴期间监测的

#### Pc3-4 地磁脉动时空特性

地磁平静期间 (2011 年 3 月 20—27 日) 和磁暴期间 (2011 年 9 月 25 日至 10 月 1 日), 利用子午工程漠河台站 (地理位置见表 1) 监测中纬度  $L = 2.29$  处 Pc3-4 地磁脉动随时间的变化情况, 结果如图 2 和图 3 所示. 图 2 和图 3 给出的是地磁场  $D$  分量的密度谱, 可用于识别中频段 ( $6.7\sim 100 \text{ mHz}$ ) 的 Pc3-4 地磁脉动. 图 2 和图 3 中 (a)~(f) 分别为地磁平静期间 (2011 年 3 月 20 日 21:00 UT 至 2011 年 3 月 26 日 21:00 UT) 和磁暴期间 (2011 年 9 月 25 日 21:00 UT 至 2011 年 10 月 1 日 21:00 UT) 锥角随时间的变化结果及漠河台站 (MHT)  $D$  分量的密度谱, 图中红、蓝色折线表示以  $50^\circ$  为分界的锥角  $\theta_{XB}$

随时间的变化情况. 可以看出,  $\theta_{XB} < 50^\circ$  内具有产生 Pc3-4 地磁脉冲的有利条件<sup>[13-14,31]</sup>, 这是由于行星际总磁场矢量方向是决定激波前兆区位置与弓激波结构及向磁层传输波的重要参数.

从图 2 可以清晰看出, 在整个地磁平静期, 昼侧 (21:00 UT—10:00 UT) 可观测到弱的 Pc3-4 地磁脉动, 而在夜侧 (10:00 UT—16:00 UT) 基本不能观测到 Pc3-4 波, 这可能是由于夜侧电离层电导率较大的原因. Pc3-4 波主要集中在正午前, Pc3 波活动主要以明显的波包形式出现, 在图 2(a) (b) (f) 中 Pc3 波主要频率约为  $30 \text{ mHz}$ , 在图 2(c) (d) (e) 中 Pc3 波的频率明显增高, 主要集中在  $30\sim 60 \text{ mHz}$  内. 结合图 1 的分析可以看出, 行星际总磁场为  $5\sim 10 \text{ nT}$ , 这与 Troitskaya 等研究<sup>[11-12]</sup> 提出的上游波的频率与行星际磁场强度关系的经验模型  $f (\text{mHz}) \approx 6B_{IMF} (\text{nT})$  相一致. 此外, 在图 2(c) (d) (e) 中 Pc3 波包的频率增加与高速太阳风 (大于  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的区间相对应. 地磁场  $D$  分量谱密度的显著增强出现在中午 (07:00 UT) 之前, 而在午后非常弱; 在图 2 中锥角  $\theta_{XB} < 50^\circ$  的正午之前时间内可观测到更加明显的 Pc3 地磁脉冲, 而在下午锥角  $\theta_{XB}$  较大时并未观测到 Pc3 地磁脉冲. 在图 2(f) 中, 波谱具有较为明显的晨昏不对称性, 在 08:00 UT—15:00 UT, 尽管处于锥角  $\theta_{XB}$  均小于  $50^\circ$  以及行星际磁场 IMF 的螺旋方向  $\phi_{IMF}$  约为  $180^\circ$  的有利条件, 但并未观测到 Pc3 波. Greenstadt<sup>[35]</sup> 认为晨昏不对称性是由于平均行星际磁场线的螺旋方向在准平行激波区更易产生上游波所致, 该现象并不能用 Greenstadt 的理论来解释, 这表明可能存在其他因素更有利于晨侧时间 Pc3 地磁脉动的产生. 对于图 2(c), 在不利的锥角条件下, Pc3 波的振幅增强可能是由于之前出现的太阳风动压脉冲所导致的, 这与 Zhang 等<sup>[31]</sup> 研究的太阳风正负动压脉冲激发 ULF 波的结论相类似.

在整个磁暴期间, 除图 3(a) 空白区表示数据缺失外, 图 3(a)~(f) 表明, 在昼侧 (21:00 UT—10:00 UT) 正午之前可以观测到 Pc3-4 地磁脉动, 而在夜侧 (10:00 UT—16:00 UT) Pc4 波相对明显, 可能是由于夜侧电离层电导率较大, 在清晨 (16:00 UT—21:00 UT) 能够间断地观测到稍弱于昼侧的 Pc3-4 波. 而 Pc3 波活动主要以明显的波包形式出现, 在磁暴初相前和恢复相后期, 即在图 3(a) 的 11:30 UT 之前及图 3(d) (e) (f) 所示时间内, Pc3 波主要频率约为  $20\sim 40 \text{ mHz}$ .

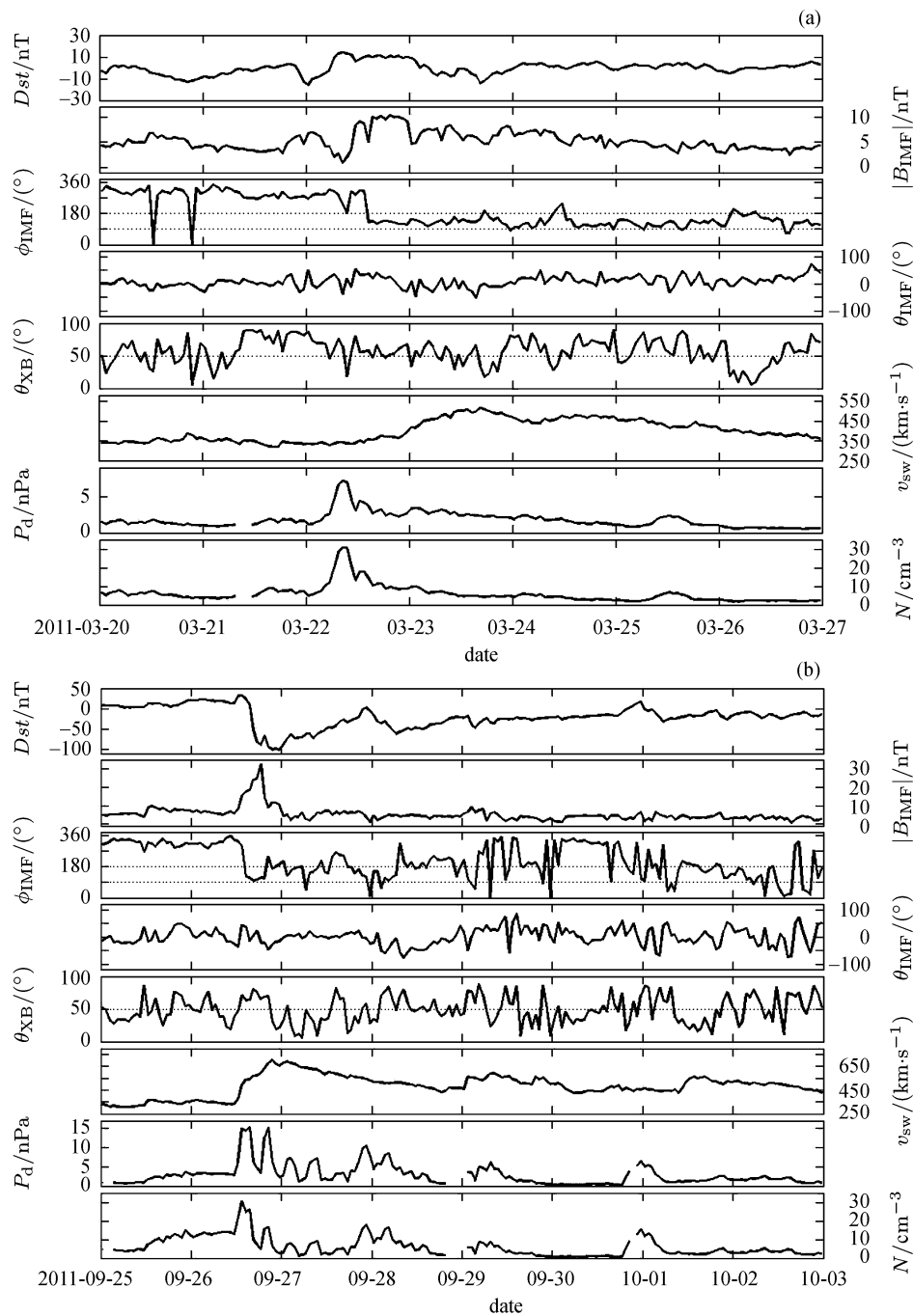


图 1 地磁平静 (a) 和地磁暴 (b) 期间分辨率为 1 h 的太阳风等离子体和行星际磁场参数. (a) 和 (b) 中由上向下依次为地磁指数、行星际总磁场强度、时钟角 (行星际磁场在黄道面的投影与日地方向的夹角)、纬度角 (行星际矢量场与黄道面的夹角)、锥角 (行星际矢量场与日地连线的夹角)、太阳风速度、太阳风动压和太阳风质子数密度

Fig. 1 Solar wind plasma and interplanetary magnetic field parameters in 1 hour time-resolution during storm quiet (a) and magnetic storm (b) period. From the top to bottom panels in (a) and (b), shown are the  $Dst$  index, the total Interplanetary Magnetic Field (IMF) intensity, clock angle (the angle between the IMF component in the ecliptic plane and the Sun-Earth direction), latitude angle (the IMF inclination on the ecliptic plane), cone angle (the angle between the IMF direction and the Sun-Earth direction), solar wind velocity, solar wind dynamic pressure and solar wind proton number density

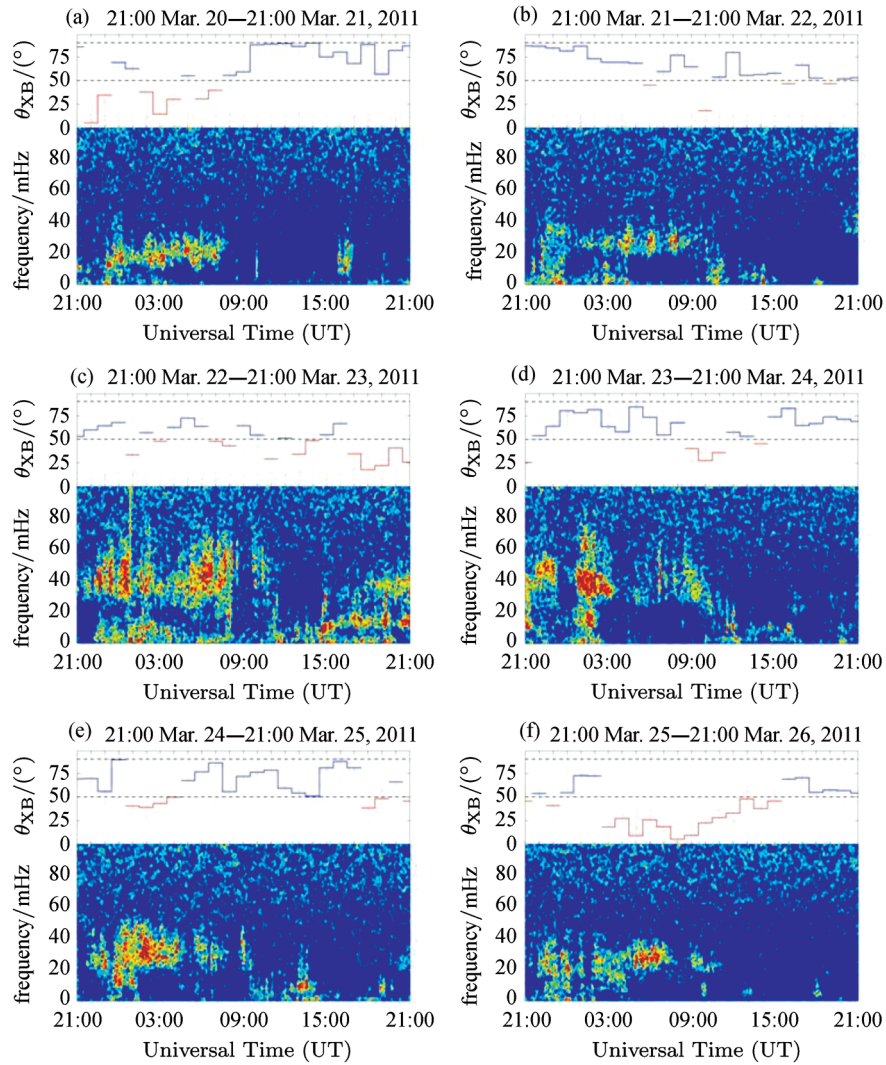


图 2 地磁平静期间锥角及漠河台站观测到的地磁场  $D$  分量密度谱. 黑色虚线分别表示锥角为  $50^\circ$  和  $90^\circ$  的分界线, 蓝色和红色折线表示以  $50^\circ$  为分界的锥角变化

Fig. 2 Cone angle and dynamic power spectra of the  $D$  component at MHT during magnetically quiet period, respectively. Two dashed lines stand for the boundary between the cone angle  $50^\circ$  and  $90^\circ$ , and the blue and red broken lines mean the variation of cone angle with a separation of  $50^\circ$

结合图 1 可以看出, 行星际总磁场为  $4\sim 6\text{ nT}$ ; 在磁暴初相、主相和恢复相初期, 即在图 3(a) 的  $11:30\text{ UT}$  之后及图 3(b) (c) 所示时间内, Pc3-4 波主要频率在  $0\sim 80\text{ mHz}$  内, 而行星际磁场强度为  $4\sim 10\text{ nT}$ , 这与 Troitskaya 等研究<sup>[11-12]</sup> 提出的上游波的频率与行星际磁场强度关系的经验模型  $f\text{ (mHz)} \approx 6 \cdot B_{\text{IMF}}\text{ (nT)}$  一致; 而在磁暴主相和恢复相早期 (9 月 26 日  $15:30\text{ UT}$  至 9 月 27 日  $02:30\text{ UT}$ ) 行星际磁场发生突变, 其值远大于  $10\text{ nT}$ , 这并不符合之前的经验模型, 但其 Pc3 波包扩展应与持续的高

速太阳风 (远大于平均太阳风速度  $350\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 区间有关, 可能是由之前出现的几个太阳风动压脉冲激发, 这与 Zhang 等<sup>[31]</sup> 研究的太阳风动压脉冲激发 ULF 波的结论相类似. 在图 3(a)~(f) 中, 锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的正午之前时间内可观测到更加明显的 Pc3 地磁脉动, 而在下午 Pc3 地磁脉动与锥角  $\theta_{\text{XB}}$  无密切相关性. 与地磁平静时期不同的是, 在磁暴主相和恢复相早期, Pc3-4 地磁脉动在昼夜侧出现并持续较长时间, 在清晨 ( $16:00\text{ UT}-21:00\text{ UT}$ ) 也可观测到 Pc3-4 地磁脉动, 与较小的锥角  $\theta_{\text{XB}}$  密切相关.

另外, 从图 3(e) 中可以看出较为明显的晨昏不对称性, 22:30 UT—13:30 UT 时段尽管处于锥角  $\theta_{XB}$  小于  $50^\circ$  及行星际磁场 IMF 的螺旋方向  $\phi_{IMF}$  接近约  $360^\circ$  的有利条件, 但在午后并未观测到 Pc3 波. Greenstadt<sup>[34]</sup> 认为晨昏不对称性的原因是由于平均行星际磁场的螺旋方向在准平行激波区更易产生上游波, 这并不能用 Greenstadt 的理论解释, 因此, 有关机制还需进一步探讨.

综上可知, 在地磁平静期间 (3 月 20—27 日) 和磁暴期间 (9 月 25 日至 10 月 1 日), 在昼侧均观测到较强的 Pc3-4 地磁脉动, 除磁暴主相和恢复相早

期, 在夜侧几乎观测不到 Pc3-4 地磁脉动, 在磁暴期的清晨前也可观测到地磁脉动; 在锥角  $\theta_{XB} < 50^\circ$  的正午之前时间内可以观测到更加明显的 Pc3-4 地磁脉动, 而午后观测到弱的 Pc3-4 地磁脉动不受锥角  $\theta_{XB}$  大小的影响. 在两段时间内, 当太阳风速度大于  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  时, Pc3 地磁脉动的频率增高, 表明在高速太阳风条件下更易观测到 Pc3 地磁脉动. 磁暴事件期间会增强产生 Pc3-4 地磁脉动及更大频率范围的 Pc3-4 地磁脉动, 其结果说明地磁指数  $Dst$  及太阳风动压脉冲可能会对 Pc3-4 地磁脉动产生影响, 导致更大振幅的 Pc3-4 地磁脉动出现; 地磁脉动的频

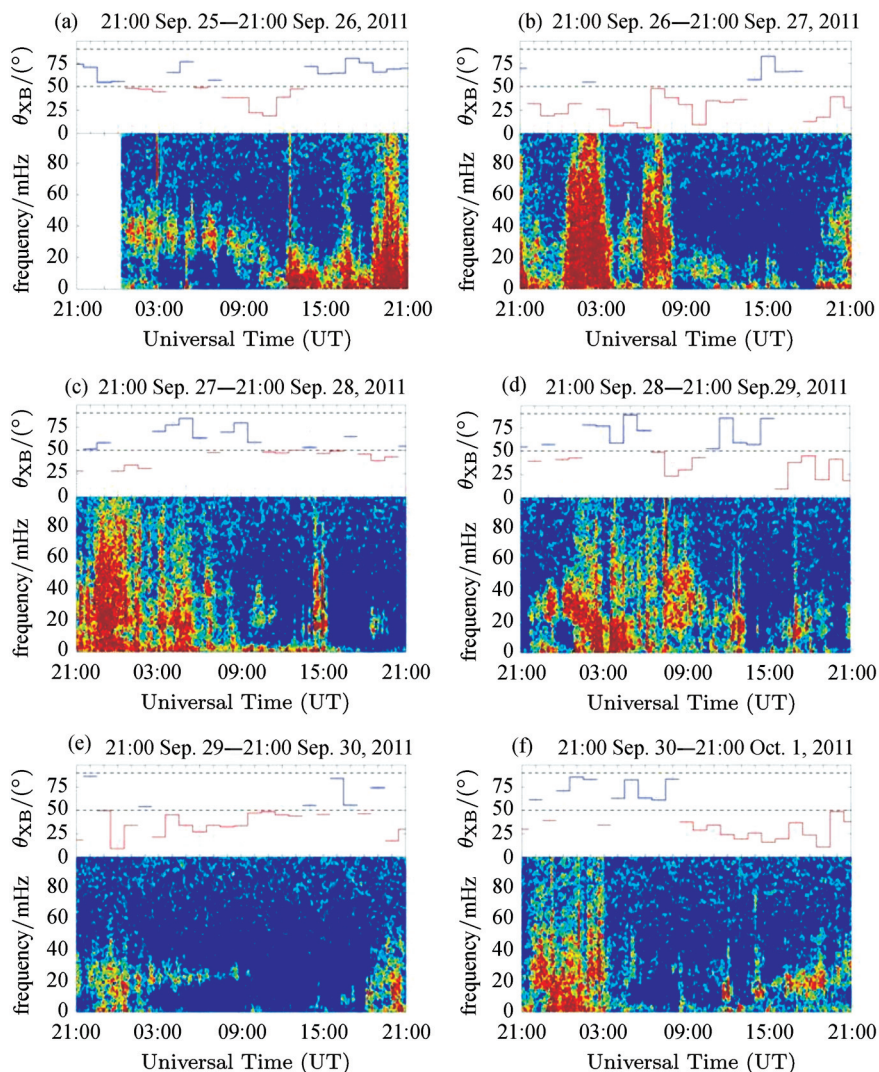


图 3 磁暴期间锥角及漠河台站观测到的地磁场  $D$  分量的密度谱. 黑色虚线分别表示锥角为  $50^\circ$  和  $90^\circ$  的分界线, 蓝色和红色折线表示以  $50^\circ$  为分界的锥角变化

Fig. 3 Cone angle and dynamic power spectra of the  $D$ -component at MHT during magnetic storm period, respectively. Two blank dashed lines stand for the boundary between the cone angle  $50^\circ$  and  $90^\circ$ , and the blue and red broken lines mean the variation of cone angle with a separation of  $50^\circ$

率在磁暴期间不满足 Troitskaya 等<sup>[11-12]</sup>提出的经验模型  $f(\text{mHz}) \approx 6B_{\text{IMF}}(\text{nT})$ . 此外, 行星际总磁场和锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的有利条件并不是影响 Pc3-4 地磁脉动产生的唯一因素, 因此, 需要研究更多的事例来分析 Pc3-4 地磁脉动的产生及作用机制.

## 2.2 中低纬度 Pc3-4 地磁脉动的时变特性

用以上同样的方法分析表 1 中子午工程低纬度 ( $1.0 < L < 2.3$ ) 地磁台站的数据, 以进一步研究地磁平静期间 (3 月 20—27 日) 和磁暴期间 (9 月 25 日至 10 月 1 日) Pc3-4 地磁脉动的分布特性. 其结果表明, 在中低纬度磁壳层  $L > 1.3$  时 (地磁纬度大于  $35^\circ$ ), 在相同时间内可以观测到具有同样特性的 Pc3-4 地磁脉动; 而在近赤道的低纬度磁壳层  $L < 1.3$  时 (地磁纬度小于  $35^\circ$ ), 在相同时间内未能观测到具有同样特性的 Pc3-4 地磁脉动, 这可能是由于低纬地区相应磁壳层处的磁力线比较短, 磁场较强, 从而导致 Pc3-4 地磁脉动不容易激发.

## 3 讨论与结论

利用子午工程监测网中漠河台站磁通门磁力仪的地磁场  $D$  分量数据得到其密度谱, 对比分析了地磁平静期间 (3 月 20—27 日) 和磁暴期间 (9 月 25 日至 10 月 1 日) 观测到的 Pc3-4 地磁脉动变化特性. 结果表明, 在地磁平静期间和磁暴期间在昼侧正午前均可观测到 Pc3-4 地磁脉动, 并以波包的形式存在, 在夜侧几乎观测不到 Pc3-4 地磁脉动, 磁暴主相和恢复相早期除外.

对于地磁平静时期, 在行星际磁场锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的正午之前时间内可观测到更加明显的 Pc3 地磁脉动, 而在下午锥角  $\theta_{\text{XB}}$  较大时并未观测到 Pc3 地磁脉动, 其频率满足 Troitskaya 等<sup>[11-12]</sup>提出的经验模型  $f(\text{mHz}) \approx 6B_{\text{IMF}}(\text{nT})$ . 在昼侧观测到的 Pc3 地磁脉动的谱密度增强不完全由小锥角 ( $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$ ) 条件决定; 在同样有利的锥角条件和时钟角条件下, Pc3 波显现出晨昏不对称性, 这不能用 Greenstadt<sup>[34]</sup>提出的理论解释, 说明可能存在产生 Pc3 波的其他因素. 另外, 研究发现在高速太阳风 (大于  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 条件下更易观测到 Pc3 波, 且其频率会随太阳风速度的增大而增高.

磁暴期间, 在锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的正午前可观测到更加明显的 Pc3-4 地磁脉动, 而在午后间断的 Pc3-

4 地磁脉动似乎不受锥角  $\theta_{\text{XB}}$  的影响. Pc3-4 地磁脉动频率在磁暴主相期间不能满足以上提到的经验模型. 同样, 在昼侧观测到的 Pc3 地磁脉动的谱密度增强不完全由小锥角条件决定, 也可能是由与之伴随的太阳风动压脉冲导致的, 这与 Zhang 等<sup>[31]</sup>的结论相类似; 在锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  及时钟角  $\phi \approx 360^\circ$  的条件下, Pc3 地磁脉动呈现晨昏不对称性. 另外, 在高速太阳风 (大于  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 条件下更易观测到 Pc3 波, 且其频率会随太阳风速度的增大而增高, 这与地磁平静时期的结论相一致.

无论在平静期还是在磁暴期, 在锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的正午前可观测到更加明显的 Pc3-4 地磁脉动, 而在下午 Pc3-4 地磁脉动不受锥角  $\theta_{\text{XB}}$  的影响. 当太阳风速大于  $350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  时, Pc3 地磁脉动的频率增高, 表明高速太阳风条件下更易观测到 Pc3 地磁脉动. 磁暴期间会增强 Pc3 地磁脉动及更大频率范围较大振幅增强的 Pc3-4 地磁脉动, 但频率不满足 Troitskaya 等<sup>[11-12]</sup>提出的经验模型  $f(\text{mHz}) \approx 6B_{\text{IMF}}(\text{nT})$ , 也可能是由太阳风动压脉冲造成的, 这与 Zhang 等<sup>[31]</sup>的结论相类似. 此外, 行星际总磁场和锥角  $\theta_{\text{XB}} < 50^\circ$  的有利条件并不是影响 Pc3-4 地磁脉动产生的唯一因素, 需要进一步研究更多的事例来分析 Pc3-4 地磁脉动的产生源和作用机制.

近赤道地区的低纬地区地面台站在地磁平静时期和磁暴时期均观测不到 Pc3-4 地磁脉动, 这可能是由于低纬地区相应磁壳层处的磁力线比较短, 磁场较强, 从而不易激发 Pc3-4 地磁脉动, 因而, Pc3-4 地磁脉动存在明显的纬度效应.

**致谢** 地面地磁台站观测数据由中国子午工程数据中心提供, OMNI2 太阳风等离子体和行星际磁场数据由 NASA CDAWEB 提供.

## 参考文献

- [1] Saito T. Magnetic pulsations [J]. *Space Sci. Rev.*, 1969, **10**:319
- [2] Orr D, Webb D C. Statistical studies of geomagnetic pulsations with periods between 10 and 70 s and their relationship to the plasmopause region [J]. *Planet. Space Sci.*, 1975, **23**:1169
- [3] Ansari I A, Fraser B J. A multistation study of low latitude Pc3 geomagnetic pulsations [J]. *Planet. Space Sci.*, 1986, **34**:519
- [4] Cao M, McPherron R L, Russell C T. Statistical study of ULF wave occurrence in the dayside magnetosphere [J]. *J.*



- Geophys. Res.*, 1994, **99**:8731
- [5] Obana Y, Yoshikawa A, Olsan J V, *et al.* North-south asymmetry of the amplitude of high-latitude Pc3-5 pulsations: Observations at conjugate stations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**:10 214
- [6] Yumoto K. Generation and propagation mechanisms of low-latitude magnetic pulsations: A review [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **60**:79-105
- [7] Kurchashov Y P, Nikomarov Y S, Pilipenko V A, *et al.* Field line resonance effects in local meridional structure of mid-latitude geomagnetic pulsations [J]. *Ann. Geophys.*, 1987, **5A**:147-154
- [8] Miletits C Z, Verö J, Stuart W. Dynamic spectra of pulsation events at  $L \sim 1.9$  and  $L \sim 3.3$  [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1988, **50**:649-656
- [9] Satio T. A new index of geomagnetic pulsation and its relation to solar M-regions [J]. *Rept. Ionos. Space Res.*, 1964, **18**:260-274
- [10] Bolshakova O V, Troitskaya V A. Relation between the direction of the interplanetary magnetic field and steady oscillation conditions [J]. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1968, **180**:343
- [11] Troitskaya V A, Plyasova-Bakunina T A, Guglielmi A V. Relationship between Pc2-4 pulsations and the interplanetary field [J]. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1971, **197**:1313
- [12] Troitskaya V A, Bolshakova O V. Diagnostics of the magnetosphere using multipoint measurements of ULF-waves [J]. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**:413-425
- [13] Greenstadt E W, Olson J V. Pc3,4 activity and interplanetary field orientation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**:5911-5920
- [14] Russell C T, Luhmann J G, Odera T J, *et al.* The rate of occurrence of dayside Pc3,4 pulsations: the  $L$ -value dependence of the IMF cone angle effect [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1983, **10**:663-666
- [15] Takahashi K, McPherron R L, Terasawa T. Dependence of the spectrum of Pc3-4 pulsations on the interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**:2770-2780
- [16] Miyake W, Mukai T, Yumoto K, Saito T, Hirao K. A correlation study between the solar wind speed observed by Suisei and the amplitude of Pc3 geomagnetic pulsations [J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1987, **39**:159-164
- [17] Yedidia B A, Vellante M, Villante U, *et al.* A study of the relationship between micropulsations and solar wind properties [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:3465-3470
- [18] Wolfe A. Dependence of mid-latitude hydromagnetic energy spectra on solar wind speed and interplanetary magnetic field direction [J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**:5977-5982
- [19] Wolfe A, Meloni A. ULF geomagnetic power near  $L = 4, 6$ . Relationship to upstream solar wind quantities [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:7507-7512
- [20] Verö J. Determination of the solar wind velocity from pulsation indices [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, **37**:561-564
- [21] Chi P, Russell C, Bloom R, Singer H. Solar wind control of ultra low-frequency wave activity at  $L = 3$  [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:29 467-29 477
- [22] Chugunova O M, Pilipenko V A, Engebretson M, Rodger A. Statistical relations between the probability of occurrence of Pc3-4 pulsations at high latitudes in the Antarctic regions and the solar wind and IMF parameters [J]. *Geomag. Aeron.*, 2007, **47**:205-215
- [23] Le G, Chi P J, Goedecke W, *et al.* Magnetosphere on May 11, 1999, the day the solar wind almost disappeared: II. Magnetic pulsations in space and on the ground [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:2165-2168
- [24] Le G, Russell C T, Petrinec S M. Magnetosphere on May 11, 1999, the day the solar wind almost disappeared: I. Current systems [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:1827-1830
- [25] Zandrea A, DaCosta J M, Dutra S L G, *et al.* Pc3-4 geomagnetic pulsations at very low latitude in Brazil [J]. *Planet. Space Sci.*, 2004, **52**:1209-1215
- [26] Villante U, Vellante M, Francia P, *et al.* ULF fluctuations of the geomagnetic field and ionospheric sounding measurements at low latitudes during the first CAWSES campaign [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:1455-1468
- [27] De Laetis M, Francia P, Regi M, *et al.* Pc3 pulsations in the polar cap and at low latitude [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A11223, doi: 10.1029/2010JA015967
- [28] Heilig B, Lotz S, Verö J, *et al.* Empirically modelled Pc3 activity based on solar wind parameters [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **28**:1703-1722
- [29] Villante U, DePaulis C, Francia P. The transmission of upstream waves to the magnetosphere: An analysis at widely separated ground stations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A06219, doi: 10.1029/2010JA016263
- [30] Zong Q G, Zhou X Z, Wang Y F, *et al.* Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A10):A10204, doi: 10.1029/2009JA014393
- [31] Zhang X Y, Zong Q G, Wang Y F, *et al.* ULF waves excited by negative/positive solar wind dynamic pressure impulses at geosynchronous orbit [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(A10):A10221, doi: 10.1029/2009JA015016
- [32] Wang C. New chains of space weather monitoring stations in China [J]. *Space Weather*, 2010, **8**, S08001, doi:10.1029/2010SW000603
- [33] Greenstadt E W, Olson J V, Loewen P D, *et al.* Correlation of Pc3, 4, and 5 activity with solar wind speed [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:6694-6696
- [34] Greenstadt E W, Olson J V. Geomagnetic pulsation signals and hourly distribution of IMF orientation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:1493-1498
- [35] Greenstadt E W. Field-determined oscillations in the magnetosheath as possible source of medium-period, daytime micropulsations [C]//Proceedings of the Conference on Solar Terrestrial Relations. Calgary Alta: University of Calgary, 1973. 515