

马玉端, 路 立, 杨俊英等. 太阳活动低年时太阳同步轨道电场高频(HF)波的观测特性研究. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1421~1432, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.002

Ma Y D, Lu L, Yang J Y, et al. Features of the electric field HF wave of the Sun-synchronous orbit in the solar minimum year. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(6):1421~1432, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.002

# 太阳活动低年时太阳同步轨道电场高频(HF)波的 观测特性研究

马玉端<sup>1,2</sup>, 路 立<sup>2</sup>, 杨俊英<sup>1</sup>, 曹晋滨<sup>1</sup>, 张学民<sup>3</sup>, 陈化然<sup>4</sup>, 周国成<sup>2</sup>

1 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

2 空间天气学国家重点实验室(中国科学院空间科学与应用研究中心), 北京 100190

3 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

4 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘 要** 文章使用搭载在 DEMETER 卫星上的电场探测仪器(Instrument Champ Electrique, ICE)在太阳活动低年(2007年2月4日到2008年2月3日)所探测的数据, 研究频率从 10 kHz 到 3.33 MHz 宽频段的高频(HF)电场波功率谱的空间分布特征. 地磁宁静期间, 从 2.08 MHz 到 3.33 MHz 的高频段, 电场 HF 波功率谱密度随频率升高而升高, 且电场 HF 波功率谱密度的全球分布比较均匀, 基本上不随地球的经度和纬度变化. 向阳面时, 不同经纬度间 HF 波功率谱密度的差异小于背阳面的. 电场 HF 波功率谱的季节变化主要表现为: 向阳面 1.25 MHz 和 1.66 MHz 频段, 在低纬度出现峰. 地磁平静时期电场 HF 波功率谱密度的区域分布变化比较大的是 0.42 MHz 和 1.66 MHz 两个频段, 尤其是在背阳面的北半球高纬度区域. 地磁活动引起电场 HF 波功率谱扰动的非均匀性增强, 主要表现在电场 HF 波的低频段(3.25~416 kHz), 扰动响应区域发生在高纬度区. 在赤道和低纬附近(纬度:  $\sim \pm 40^\circ$  之间), 地磁活动的响应很小. 在背阳面的磁尾方向, 电场 HF 波功率谱表现出明显的磁暴增强. 磁暴( $Dst < -30$  nT)期间的南北半球高纬度区, 电场 HF 波功率谱的最大增幅比地磁平静时期大一个数量级. 向阳面的南半球高纬度区域, 亚暴( $AE > 200$  nT)和高纬磁扰动( $Kp > 3$ )期间, 功率谱的最大增幅比地磁平静时期大一个数量级. 考虑到亚暴和高纬磁扰期间, 来自空间的扰动影响主要是高纬度区域, 电场 HF 波功率谱的增强主要受空间物理过程的影响. 鉴于本文使用的是在太阳活动低年的数据, 观测到的磁暴基本上都是弱磁暴, 最大的也只是中等磁暴; 可以推测强磁暴、烈磁暴甚至巨磁暴发生时, 电场 HF 波功率谱的增强应该更加显著. 如果在地磁平静时期尤其是没有磁暴期间, 地球的局部区域出现电场 HF 波功率谱(尤其是 1.66 MHz 以上的)异常增大, 那么就要着重考虑是否为地球内部的异常现象(如地震)所导致的电离层响应.

**关键词** 电场 HF 波, 功率谱密度, 电离层地震响应, 地磁异常, 地磁活动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.002

中图分类号 P352

收稿日期 2011-03-25, 2011-05-10 收修定稿

## Features of the electric field HF wave of the Sun-synchronous orbit in the solar minimum year

MA Yu-Duan<sup>1,2</sup>, LU Li<sup>2</sup>, YANG Jun-Ying<sup>1</sup>, CAO Jin-Bin<sup>1</sup>, ZHANG Xue-Min<sup>3</sup>,  
CHEN Hua-Ran<sup>4</sup>, ZHOU Guo-Cheng<sup>2</sup>

1 School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

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

3 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

4 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Using the electric field High Frequency (HF) waves recorded by the Instrument

**基金项目** 国家自然科学基金(40931054), 国家科技支撑计划(2008BAC35B01-2)和 973 项目(2011CB811404)资助.

**作者简介** 马玉端, 女, 2006 年博士毕业于中国科学院空间科学与应用研究中心, 主要从事磁层卫星探测数据的分析.

E-mail: ydma@buaa.edu.cn 或 ydma@spaceweather.ac.cn

Champ Electrique (ICE) onboard the DEMETER spacecraft, the spatial features of the waves from 10 kHz to 3.33 MHz are studied. During the quiet time, the higher the HF wave, the bigger the power spectrum intensity when the frequency lies between 2.08 MHz and 3.33 MHz. At the same time, the power spectrum intensity is almost uniform in different longitudes and latitudes. The difference of the power spectrum intensity between different longitudes and latitudes in the dayside is less than that of the nightside. The seasonal changes of the HF power spectrum intensity mainly show that there are peaks at the dayside low latitudes in the frequency bands of 1.25 MHz and 1.66 MHz. During the quiet time, the discrepancy of the power spectrum intensity between different longitudes and latitudes obviously occurs at the frequency bands of 0.42 MHz and 1.66 MHz especially at high latitudes of the northern hemisphere in the dayside. During the geomagnetic activity, the HF response mainly appears at the low frequency band especially in the high latitude area. At the equator and low latitudes (latitude is between  $\pm 40^\circ$ ), the geomagnetic response of the HF is weak while that of the nightside in the magnetotail direction becomes strong especially during the storms. Both in the northern and southern high latitudes during the storms on the nightside, the biggest power spectrum intensity is ten times as large as those of the quiet. The biggest power spectrum intensity on the dayside of the high latitude of the southern hemisphere during the substorm and the period of the high latitude magnetic perturbation is ten times as large as that of the quiet. Considering that the perturbation coming from the space has an effect on the high latitude area during the substorm and the period of the high latitude magnetic perturbation, the enhancement of the HF power spectrum intensity may originate from the spatial process. In view of that the data used in this paper occur in the solar minimum year and most of the storms are very weak with the strongest storm belonging to the moderate storm, the enhancements of the HF power spectrum intensity during the strong, severe even the great storms may be more obvious. If there is anomalous accretion in local area during quiet time especially when there is no storm, the abnormal phenomena will be the ionospheric seismo-response mainly brought by the factors of the internal earth.

**Keywords** Electric field HF wave, Power intensity spectrum, Ionospheric seismo-response, Geomagnetic anomaly, Geomagnetic active

## 1 引言

Milne<sup>[1~3]</sup>从 19 世纪末期开始,在地面上观测到了与地震活动密切相关的自然电磁(Electromagnetic, EM)波.从 20 世纪三四十年代开始,科学家们将与地震密切相关的活动用于地震的长期<sup>[4~6]</sup>和短临<sup>[7~8]</sup>预报.直到 20 世纪 50 年代的火箭和 70 年代的卫星发射以后,仪器才逐渐观测到与地震活动相关的空间 EM 波,观测到与地震相关的 EM 波的频率覆盖很宽.地震期间,震前几天地面观测到几千赫兹(kHz)到兆赫兹(MHz)宽频波段的电磁(EM)波<sup>[9~19]</sup>;震前观测到的 MHz 频段的 EM 波早于 kHz 波<sup>[20]</sup>.如何区分来自空间和地面的电磁波,将震前产生的电磁异常扰动 EM 波用作地震的短临

预报是目前地震研究中的热点和难点<sup>[21]</sup>.

震前、地震期间和震后地面台站的电磁扰动观测数据时间上相对连续,空间分布上相对较小,具有一些地理分布特征.而空间观测到的哨声波、电子回旋波和频率更高的电磁(模)波等,频率一般大于 2 kHz,隶属于电场 HF 波的频段.空间的电磁波动通常具有全球分布的大尺度特征,地磁活动越强,电磁波的功率谱密度越大.如果要从源于地面和空间的电场 HF 波中识别出属于地震异常的信号,那么首先要建立地磁宁静条件下电场 HF 波的背景场,并给出来源于地面和空间的电场 HF 波的扰动特点.法国发射的运行在太阳同步轨道高度附近(600~700 km 高度的圆轨道极轨卫星)的 DEMETER 卫星<sup>[22]</sup>,具有独特的地理优势:可以监测源于空间的电磁波动(电磁离子回旋波、哨声波、嘶声、合声、地

磁脉动等)信号,也可以监测源于地面的电磁扰动(人工高频电磁波、电力输运线路的谐频电磁波、雷电激发地磁扰动等)信号<sup>[23]</sup>。

电离层磁场甚低频(Very Low Frequency, VLF)波的功率谱的观测特性已经给出<sup>[24]</sup>,本文利用2007年(太阳活动极小年),DEMETER上电场仪器ICE<sup>[25]</sup>数据,分析电场HF波功率谱的空间分布。为了排除地磁扰动的影响,我们选取数据时要求 $Dst > -30$  nT,  $Kp < 3$ ,  $AE < 200$  nT;并在第二部分给出了使用的仪器介绍及数据采样点的详细分布。第三部分统计给出了:向阳面和背阳面电场HF波功率谱的全球地理分布,频谱特性和春、夏、秋、冬四个季节的季节变化。第四部分给出 $AE > 200$  nT即地磁亚暴期,  $Dst < -30$  nT即地磁磁暴期,  $Kp > 3$ 即地磁高纬磁扰动期,电场HF波的全局响应与地磁宁静期间的比较;第五部分给出本研究的结论及讨论HF波的背景场在震前预报中的作用。

## 2 使用的仪器及数据采样分布

本文使用搭载在DEMETER卫星上的电场探测仪器<sup>[25]</sup>数据。电场仪器安装在距离卫星4 m远处的斯塔塞伸杆上,是由带有预放大器的四个球形电极组成。测量的范围从DC到3.175 MHz,共分为四个频率带:直流和超低频(DC/ULF)(0~15 Hz),极低频(ELF)(15 Hz~1 kHz),甚低频(VLF)(15 Hz~17.4 kHz)和高频(HF)(10 kHz~3.175 MHz)。DC/ULF频带内,所有的模式下都是三轴测量。在ELF频带,突发模式下才能进行三轴测量。在VLF和HF频带的所有模式,以及ELF频带的探测模式下,遥控指令只能接收单轴测量。由于接收HF电场

的轴是对太阳定向的,近似地与背景地磁场方向垂直或成较大角度,因此在所用资料的空间范围内可以把接收到的单轴HF电场资料近似地看成是高频波电场的准垂直分量。于是,在DEMETER卫星轨道的电离层冷等离子体近似下,除了一些混杂共振波(波电场在准垂直方向的准静电振荡)外,高频波电场的准垂直分量基本上可以认为是电磁性质的波动场分量。由于没有HF波段的电场三分量资料,只有单轴测量的一个分量资料,无法准确确定它们的传播特征(传播方向与磁场的夹角、偏振等特征),难以准确识别每个频段波的波模。本文在电离层冷等离子体近似下,根据背景等离子体的电子等离子体频率和电子回旋频率以及把接收到的单轴HF电场资料近似地看成是高频波电场的准垂直分量,粗略地判断每个频段的波可能的波模。

对于本文研究的高频(HF)频带,有突发模式和测量模式。在突发模式下,每0.6144 ms有一个功率谱和波形数据。测量模式下,只有功率谱信息,频率和时间的分辨率有三种:频率分辨率为3.25 kHz,时间分辨率为2.048 s;频率分辨率为3.25 kHz,时间分辨率为0.512 s;频率分辨率为13 kHz,时间分辨率为2.048 s。

采用与研究电离层磁场甚低频(VLF)波的功率谱的观测特性相同的数据分隔方法<sup>[24]</sup>,把2007年2月4日到2008年2月3日的DEMETER卫星数据按春、夏、秋、冬四个不同季节,向阳面和背阳面,不同地磁活动指数进行统计采样,详见表1。表1给出的电场HF采样分布与电离层磁场VLF的采样分布(表1)<sup>[24]</sup>大致相同,由于电场HF和磁场VLF采样过程中出现溢出数据的数目不同而略有差异。

表1 数据采样分布表

Table 1 The distribution of the sampled data

采样数与采样区域	春季		夏季		秋季		冬季		
	向阳面	背阳面	向阳面	背阳面	向阳面	背阳面	向阳面	背阳面	
宁静期	451498	448926	469360	461715	255807	250959	439152	430400	
$AE > 200$ nT	122496	118881	123769	124974	55655	53950	107524	106102	
$Dst < -30$ nT	18584	20137	19732	18736	4198	3474	22134	22899	
$Kp > 3$	98621	93322	86624	84208	45461	44653	119414	118696	
高度(km)	最大	690.141	691.450	690.242	690.418	690.144	690.217	690.161	690.199
	最小	663.861	664.110	663.864	664.081	663.776	663.983	663.786	664.001
	平均	672.688	672.790	672.703	672.789	672.135	672.390	672.632	672.773
地方时(h)	最大	12.673	25.997	12.100	24.110	12.111	24.068	13.079	24.042
	最小	8.314	19.910	8.283	20.210	8.243	19.979	8.212	18.819
	平均	10.245	22.245	10.222	22.221	10.196	22.196	10.156	22.153

### 3 地磁宁静期间电场 HF 波功率谱的全球地理分布

我们把电场 HF 波(3.25 kHz~3.33 MHz)的功率谱均分成八个频段,分别为:3.25~416 kHz、0.42~0.83 MHz、0.83~1.25 MHz、1.25~1.66 MHz、1.66~2.08 MHz、2.08~2.50 MHz、2.50~2.91 MHz 和 2.91~3.33 MHz. 取每个频段功率谱的平均值代表该频段的频谱特性. 以第一频段(3.25~416 kHz)为例,我们统计给出了 2007 年地磁宁静期间电场 HF 波功率谱密度(图 1)及相对误差(图 2)的全球分布. 为了表现电场 HF 波功率谱的地域分布特性,本文均采用地理坐标系描述电离层电场 HF 波功率谱的分布.

向阳面电场 HF 波功率谱的强度总体来说弱于背阳面的,分布特点也与背阳面差别很大. 向阳面电场 HF 波功率谱比较强的区域非常明显,主要有两类区域. 一类区域集中在 $\pm 45^\circ \pm 5^\circ$  纬度附近,经度为 $0^\circ \sim 360^\circ$  范围;而且四个季节期间南半球区向阳面 HF 波功率谱都明显强于北半球的. 另外一类区域是南北纬度 $65^\circ$  的极区附近,经度上分布很窄,而且南北半球经度的分布范围不对称,有明显差异:南半球主要分布在 $120^\circ \sim 180^\circ$  范围内,北半球主要是在 $190^\circ \sim 230^\circ$  范围内. 就南北半球来说,四个季节期间南半球区向阳面 HF 波功率谱都明显强于北半球的;就季节分布来说,春季期间向阳面 HF 波功率谱最强且分布区域最大.

总体来看背阳面电场 HF 波功率谱的分布区域也有两大类:一类是纬度跨度大,经度跨度小的区域;另一类是纬度跨度小,经度跨度大的区域. 第一类区域大致有三块,它们的纬度范围基本相同:纬度在 $50^\circ \text{S}$  与 $55^\circ \text{N}$  之间;经度上一块为 $0^\circ \sim 50^\circ$ ,一块为 $110^\circ \sim 160^\circ$ ,一块为 $240^\circ \sim 320^\circ$ . 这三块区域内都有一个 HF 波功率谱相对较弱的区间,大约在 $5^\circ \text{N} \sim 15^\circ \text{N}$ ,经度 $0^\circ \sim 360^\circ$ . 依这个区间为分水岭,第一和第三块区域的北半球的 HF 波功率谱大于南半球的;而第二块区域基本上显示为南北半球的强度一致. 第二类区域是南北纬度 $65^\circ$  的极区附近,南北半球经度分布不对称,有明显差异:南半球主要分布在 $180^\circ \sim 220^\circ$  范围内,北半球主要是在 $40^\circ \sim 230^\circ$  范围内. 就南北半球来说,四个季节期间北半球的背阳面 HF 波功率谱都明显强于南半球的. 就季节分布来说,四季期间北半球背阳面 HF 波功率谱分布基本

相似;春冬季节南半球的背阳面 HF 波功率谱强度接近,这两个季节的 HF 波功率谱强于夏季和秋季的.

电离层电子回旋波的频率( $\Omega_e = eB/m_e \propto B$ )约为几百千赫兹,包括极光区嘶声(从几千赫兹至 100 kHz)的频段. 极光区嘶声表现为非相干的,类似于随机噪声的宽带特性,且极光区嘶声发生在极光区上空 2000 km 附近,与极光的出现有很大的相关性. 考虑到极光主要是出现在地磁活动期间,因此地磁平静时期在 0.42 MHz 和 0.83 MHz 频段,2.08 MHz~3.33 MHz 范围内 HF 电场变化比较平稳.

地磁宁静期间电场 HF 波功率谱的相对统计误差分布形态(图 2)与图 1 相似,功率谱密度大的区域相对误差也比较大(约为 10%,高纬地区的某些点甚至超过 10%,可能是因为采样的数据点比较少而且值过大造成的). 向阳面中低纬区域的电场 HF 波功率谱相对误差在 1% 左右,甚至更低. 除了误差超过 10% 的高纬度区域,地磁宁静期间电场 HF 波功率谱和相对统计误差的地理分布可以作为判定特定时段某个地震敏感区域电场 HF 波辐射异常的背景参照.

#### 3.1 电场 HF 波的频谱特性

为了进一步分析电场 HF 波功率谱的频谱特性和季节变化,以及地磁活动响应特性,我们对地磁宁静期间和对应不同地磁活动指数所采集的电场 HF 波功率谱在地理坐标系中的全球平均分布进行了纬度( $< 65$  个格点)和经度( $< 90$  个格点)分布的统计. 统计平均值和统计误差用带误差棒的曲线表示,并针对不同研究课题把上述统计分布曲线进行了分组组合分析如下.

无论是向阳面还是背阳面(没有给出图),在太阳同步卫星高度(670 km),地磁宁静期间电场 HF 波功率谱密度最大的是第八个频段 2.91~3.33 MHz,大小在 $0.01 \mu \text{V}^2 \text{m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$  附近波动,这个频段是在电子回旋频率和电子等离子频率之上,属于高频电磁性质的波,它们的传播受背景等离子体的影响很弱,近似地像真空中的电磁波辐射一样,造成 HF 波功率谱密度基本与地球的经度和纬度无关. 随着地球地理经度和纬度的变化,电场 HF 波功率谱密度分布变化比较大的是前四个频段,尤其是 0.42 MHz 和 1.66 MHz 两个频段. 这样以来,在基于地理经纬度建立地磁宁静期间全球 HF 波的背景场时,主要是考虑 3.25 kHz~1.66 MHz 四个频段的地理分布. 图 3 给出了 3.25 kHz~1.66 MHz 四个频段在向阳





面的结果,图 4 给出了背阳面的。

向阳面时,变化比较大的出现在 1.25 ~ 1.66 MHz 频段;在纬度  $\pm 20^\circ$  以内有一个隆起,春冬两季隆起尤为明显。隆起的高点在四个季节出现的位置也略有不同:春夏秋三季的大约在  $5^\circ\text{N}$ ,冬季的大约在  $5^\circ\text{S}$ 。从经度分布上来看,经度  $100^\circ$  处,春夏冬有一个峰点,而春季在  $300^\circ$  左右有一个谷,冬季在  $270^\circ$  有一个谷。由于没有 HF 波段的电场三分量资料,只有单轴测量的一个分量资料,无法准确确定它们的传播方向与磁场的夹角以及偏振特征,单从频率来看这个频段的波可能是左旋异常(LX)模、右旋异常(RX)模、寻常(O)模中的一种或者是其中两到三种波模的混合。在垂直传播情况下,可能还有高混杂波,但不会有朗缪尔(Langmuir)波。

背阳面时,纬度分布和经度分布的特点都很明显。北半球变化最大的是 3.25 ~ 416 kHz 频段;在  $45^\circ\text{N}$  左右, HF 波功率谱密度有一个峰。在 1.25 ~ 1.66 MHz 频段,随着纬度升高,电场 HF 波功率谱密度增大。而在南半球春冬两季的高纬度区域, 0.42 MHz 和 0.83 MHz 两个频段的 HF 波功率谱密度都有异常大的区域出现。这两个频段在经度的分布上也出现了异常大的区域。这些 HF 波功率谱密度异常大的区域,误差棒也很大,这可能是由于这些地区的采样样本数过少造成的。0.42 MHz 频段,可能是低于电子回旋频率的哨声波。而 0.83 MHz 频段比较接近电子回旋频率,有可能是电子回旋波,在大角度传播情况下可能还有低混杂波。

同时还要注意到无论在向阳面还是在背阳面的绝大部分区域,电场 HF 波功率谱密度随着频率的变化比较混乱,电场 HF 波功率谱密度扰动最大的并不是出现在频率较高的 1.25 ~ 1.66 MHz 频段,也不是出现在频率较低的 3.25 ~ 416 kHz 频段,而是它们中间的 0.83 ~ 1.25 MHz 频段。在电离层高度,大于电子的等离子体频率( $\omega_{pe} = 8.98n_e^{1/2} \sim 0.42 \sim 1.34 \text{ MHz}$ )的波落在高混杂波的频率( $\omega_{uh} = (\omega_{pe}^2 + \Omega_{ce}^2)^{1/2}$ ) 范围内。因此,0.42 ~ 1.66 MHz 频段的波功率谱密度分布可能受到高混杂波的影响。严格垂直背景磁场传播的高混杂波为纵波或静电波;斜传播的高混杂波为电磁性质的波。从 0.42 ~ 1.66 MHz 频段的波功率谱密度的变化比较混乱来看,可能存在不同传播方向的高混杂波。

### 3.2 电场 HF 波的季节变化

由于地球赤道面与黄道面有  $23.5^\circ$  的夹角,一年之内地球经历了春夏秋冬四季变化,子午面里地

磁轴的方向是随着季节变化的,因此需要研究不同季节时电场 HF 波功率谱密度的变化特点。

向阳面时,0.42 MHz 和 0.83 MHz 的季节变化主要是经度分布(图 5 的前两幅图),1.25 MHz 和 1.66 MHz 的季节变化主要是纬度分布(图 5 的后两幅图)。在地理经度  $230^\circ$  左右,0.42 MHz 频段的电场 HF 波功率谱密度在春季出现了明显的峰,峰值的大小超过另外三个季节的 20%;此时夏季的电场 HF 波功率谱密度最小。在地理经度  $140^\circ \sim 180^\circ$  区域,春秋冬三个季节都出现了不同大小的峰,春季的峰值数目最多幅度也最大。0.83 MHz 频段的电场 HF 波功率谱密度的季节变化与 0.42 MHz 频段的变化特点和发生变化的区域相似,后者的 HF 波功率谱密度的基值相对较大,变化量相对较小。在 1.25 MHz 和 1.66 MHz 频段,电场 HF 波功率谱密度的分布在四个季节的赤道附近都出现了明显的峰。在 1.25 MHz 频段,春季和冬季的峰值出现在  $5^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{S}$  之间,秋季的在  $0^\circ$  附近,而夏季的在北半球  $5^\circ \sim 10^\circ$  之间。在 1.66 MHz 频段,冬季的峰值在  $5^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{S}$  之间,春季的在  $0^\circ$  附近,而夏季和秋季的却在北半球  $5^\circ \sim 10^\circ$  之间。1.25 MHz 和 1.66 MHz 频段,接近等离子体密度比较大的赤道区域的电子等离子体频率,有可能是当地产生的静电性质的朗缪尔波与高混杂波的混合。

背阳面时,1.25 MHz 和 1.66 MHz 的变化特点相似:高纬度区域尤其是北半球大于  $40^\circ$  的区域,电场 HF 波功率谱密度随着纬度升高而增大;四个季节中,冬季的这种变化趋势最明显而且变化量最大。0.83 MHz 频段随着纬度的变化与 1.25 MHz 和 1.66 MHz 的变化特点类似,但是经度上在夏冬两季时出现了明显的峰值;峰值最大的位置在经度  $205^\circ \sim 220^\circ$  之间,增加的幅度在一倍左右。在 0.42 MHz 频段,电场 HF 波功率谱密度的纬度变化有显著的规律:南半球的高纬度区域的电场 HF 波功率谱密度明显增加,四个季节都很明显尤以冬春两季的峰值最大;北半球的峰值出现在  $45^\circ\text{N}$  左右,四个季节出现的位置大致相当。随着经度的变化,0.42 MHz 频段的电场 HF 波功率谱密度变化杂乱:四个季节出现的峰值大小不同,出现峰值的区域也差别很大。这可能是因为 0.42 MHz 频段的波模主要是低于电子回旋频率的哨声模波,它们很容易由更低高度上频繁发生的闪电产生。高纬度哨声波主要是沿着电子浓度增大的场向导管传播的,而对于中低纬非导管哨声波的传播,地磁场位形及其引起的磁层等离







子体的各向异性是决定哨声射线几何特征及速度结构的主要因素。

## 4 电场 HF 波的全球地磁活动响应

图 7(图 8)给出太阳活动低年(2007 年), 0.003~0.42 MHz 频段向阳面(背阳面), 不同季节的电场 HF 波功率谱的地磁活动的纬度和经度响应曲线, 对应的统计误差用误差棒表示。地磁平静时期( $AE < 200$  nT), 统计采样约占到总采样的 37%(图中的黑色曲线所示); 将其作为地磁活动期间的背景场。磁暴( $Dst < -30$  nT)期间, 统计采样约占总采样的 5%(图中的绿色曲线所示); 亚暴( $AE > 200$  nT)期间, 统计采样约占到总采样的 25%(图中的红色曲线所示), 和高纬磁扰动( $Kp > 3$ )期间, 统计采样约占到总采样的 23%(图中的蓝色曲线所示)。就四个季节的响应来看, 秋季的扰动幅度(统计误差)明显地大于春夏和冬季的, 这主要是因为秋季的样本数最少。

无论是向阳面还是背阳面, 地磁活动期间, 电场 HF 波功率谱密度的平均增幅越大, 对应的扰动幅度(统计误差)也越大。这里对应的量值变化都用误差棒给出。随着频率升高, 电场 HF 波功率谱的地磁活动响应幅度趋于平缓。在 0.003~0.42 MHz 频段的高纬区域, 电场 HF 波功率谱密度的地磁活动响应幅度最大, 以此频段为例分析电场 HF 波功率谱密度的地磁活动响应。总体上来说, 地磁活动期间向阳面的电场 HF 波功率谱密度的平均增幅, 明显小于背阳面的。同时可以看出, 向阳面时电场 HF 波功率谱密度的增大主要受亚暴和高纬磁扰影响; 而背阳面时电场 HF 波功率谱密度的增加更多地受磁暴控制。

在向阳面的地磁活动期间, 电场 HF 波功率谱密度的平均增幅, 明显随着纬度和经度变化。南半球的高纬度区域, 电场 HF 波功率谱密度在高纬磁扰和亚暴期间增幅最为明显。春夏两季增幅最大, 秋季增幅最小, 秋冬两季的亚暴和高纬磁扰期间, 电场 HF 波功率谱密度的最大增幅出现的位置为经度  $150^{\circ} \sim 180^{\circ}$  之间, 增幅高达一个数量级。经度  $220^{\circ}$  附近, 春秋两季电场 HF 波功率谱密度也出现了很大的增幅。经度  $140^{\circ}$  附近, 秋季的磁暴期间, 电场 HF 波功率谱密度也出现了比较明显的增幅。

在背阳面, 电场 HF 波功率谱密度的平均增幅明显大于向阳面的, 而且增大的区域远大于向阳面

的。除了秋季, 另外三个季节的磁暴期间, 电场 HF 波功率谱密度的平均增幅明显大于亚暴和高纬磁扰期间的。无论是南半球还是北半球, 电场 HF 波功率谱密度都随着纬度的增加而增大。高纬度地区, 电场 HF 波功率谱密度的增幅甚至达到一个数量级。地磁活动期间, 经度  $60^{\circ} \sim 230^{\circ}$  之间, 电场 HF 波功率谱密度的分布出现了多个峰值, 夏季时相比平静时期的最大增幅高达一个数量级。

这个频段可能来自于右旋非常(RX)模波, 因为频率高于哨声模电磁波, 被称为高通噪声, 又称地球千米辐射, 典型频率为 80~600 kHz, 峰值为 250 kHz, 源区在几千到一万公里高度范围的夜侧极光区, 可以向低高度和日侧传播, 造成夜侧的 HF 功率谱密度明显大于日侧。地球千米辐射一般在地面上接收不到、只能在卫星上能接收到。极光千米辐射主要产生在极光发生时, 因此在有亚暴和磁暴(经常表现为多个亚暴的组合)的地球活动时期, 极光千米辐射急剧增强, 导致 0.003~0.42 MHz 频段的功率谱增幅可以达到一个数量级。

## 5 结论和讨论

通过对太阳活动低年地磁平静时期和地磁活动时期电场 HF 波功率谱密度的统计分析, 我们可以得出如下结论:

(1) 平静时期谱密度最大的出现在 2.91~3.33 MHz 频段, 大小不随着经度和纬度变化, 而随着经度和纬度变化最大的为 3.25~416 kHz 频段。

地磁宁静期间, 1.66 MHz 以上电场 HF 波功率谱密度随频率升高而升高, 电场 HF 波功率谱密度最大的频段主要出现在 2.91~3.33 MHz。1.66 MHz 以上电场 HF 波功率谱密度, 随着频率升高, 电场 HF 波功率谱的经纬度变化减弱。这可能是因为频率比较高时, 左旋波、右旋波和 O 波特征都接近真空中的电磁波, 波的传播受背景等离子体的影响很小。随着地理经度和纬度变化, 电场 HF 波功率谱密度变化最大的是 3.25~416 kHz 和 1.25~1.66 MHz 两个频段; 前者可能是右旋哨声波而后者可能是左旋异常模、右旋异常模、O 模中的一种或者是其中两到三种波模的混合。整体上来说, 背阳面功率谱的幅度大于向阳面的, 这可能是因为背阳面等离子体含有的能激发波的自由能较大的缘故。

(2) 向阳面 1.25 MHz 和 1.66 MHz 频段的季节变化中, 在低纬度出现峰。

季节变化中,向阳面的主要表现为低纬度区域出现峰,在 1.25 MHz 和 1.66 MHz 频段,电场 HF 波功率谱密度的分布在四个季节的赤道附近都出现了明显的峰.不同的季节,峰值的位置出现在  $10^{\circ}\text{S}$  到  $10^{\circ}\text{N}$  之间的某个区域.而背阳面电场 HF 波功率谱密度变化最大的是 3.25~416 kHz 频段,经度和纬度都没有明显的规律;这可能是因为此频段包含的哨声波很容易产生,且在中、低和高纬度的传播规律不同造成的.

(3)地磁活动期间,3.25~416 kHz 频段功率谱密度的增幅达一个数量级.

极光期间在地球夜侧几千到一万公里高度范围产生极光千米辐射波,可以向着地球日侧和较低高度传播.受此影响,地磁活动引起电场 HF 波功率谱密度明显增高,背阳面的增幅大于向阳面的,范围增大的区域也比较大.向阳面电场 HF 波功率谱密度的增大,主要发生在亚暴和高纬磁扰期间;而且增大的区域主要是南半球的高纬度区域.背阳面电场 HF 波功率谱密度的增大,主要发生在磁暴期间;增大的区域发生在南北半球的高纬度区域.秋季时电场 HF 波功率谱密度出现了最大增幅,超过平静时期一个数量级.磁暴期间的增幅明显大于亚暴和高纬磁扰期间的.如果考虑到从 2007 年 2 月 4 日到 2008 年 2 月 3 日,磁暴比较少(磁暴期间的数据采样只占数据总采样的 5%),且磁暴的强度比较小(强度最大的磁暴其主相期间的  $Dst$  指数最小为  $-73\text{ nT}$ ,出现在 2008 年 8 月 3 日),属于中等磁暴<sup>[26]</sup>;那么大磁暴期间电场 HF 波功率谱密度的增幅将更加明显.注意到亚暴和高纬磁扰期间,南北半球的高纬度区域,背阳面电场 HF 波功率谱密度明显增大.亚暴期间的极光在极光椭圆带内增亮,以及太阳风高速流引起的高纬度极区的地磁扰动,影响的主要是地球的高纬度区域;那么亚暴和高纬磁扰期间,高纬度电场 HF 波功率谱密度的明显增大,可能主要是来自高空的极光千米辐射波的影响.电场 HF 波功率谱密度的地磁相应的经度特点,可能主要是由地球内部磁场的分布特点引起的.

(4)无磁暴期间 1.66 MHz 以上 HF 波功率谱的异常增大,可作为地面扰动(如地震)的重要参考.

卫星电场 HF 波功率谱探测背景研究表明,无论是在地磁平静还是地磁活动期间,1.66 MHz 以上的电场 HF 波功率谱随地球的经度和纬度变化很小.那么如果出现了 1.66 MHz 以上的电场 HF 波功率谱的局域异常<sup>[27]</sup>,尤其是在没有磁暴期间,就

有可能是来自于地面的扰动;例如在 2009 年 4 月 6 日发生在拉奎尔的 6.3 级地震,出现了 41 MHz 的电磁波异常<sup>[20]</sup>.地磁活动期间电离层电场 HF 波功率谱的高纬度响应,可能主要是源于空间的地磁扰动.波功率谱的低纬度和经度变化,可能源于地球的局部地磁异常.弱和中等磁暴期间,背阳面时卫星观测到的电场 HF 波功率谱的增幅明显大于亚暴和高纬磁扰期间的,说明磁暴对于来自空间的电场 HF 波功率谱的地理分布影响很大.在定量甄别电离层异常信号时,要着重考虑是受磁暴的影响还是地球局部异常现象.

**致谢** 作者感谢法国 DEMETER 数据中心在网上提供的卫星探测数据.同时感谢日本地磁数据中心 <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec1.html> 提供的  $AE$ ,  $Dst$  和  $Kp$  指数数据.

#### 参考文献(References)

- [1] Milne J. Seismic science in Japan. *Trans Seiswi Soc Jpn*, 1880, **1**:3~33
- [2] Milne J. The observatory at Messina. *Nature*, 1911, **85**: 515~516
- [3] Milne J. Earthquakes and luminous phenomena. *Nature*, 1911, **87**:16
- [4] Wood H O, Gutenberg B. Earthquake prediction. *Science*, 1935, **82**:219~220
- [5] Macelwane J B. Forecasting earthquakes. *Bull Seism Soc Am*, 1946, **36**:1~4
- [6] Kanamori H. Recent developments in earthquake prediction research in Japan. *Tectonophysics*, 1970, **9**:291~300
- [7] Wallace R E, Davis J F, McNally K C. Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability. *Bull Seism Soc Am*, 1984, **74**:1819~1825
- [8] Kisslinger C. Portents and predictions. *Nature*, 1989, **339**: 337~338
- [9] Karamanos K, Dakopoulos D, Aloupis K, et al. Study of pre-seismic electromagnetic signals in terms of complexity. *Phys Rev E*, 2006, **74**(016104):1~21
- [10] Contoyiannis Y, Kapiris P, Eftaxias K. A monitoring of a pre-seismic phase from its electromagnetic precursors. *Phys Rev E*, 2005, **71**(061123):1~14
- [11] Eftaxias K, Kopanas J, Bogris N, et al. Detection of electromagnetic earthquake precursory signals in Greece. *Proceedings of the Japan Academy*, 2000, **76**(B):45~50
- [12] Eftaxias K, Contoyiannis Y, Balasis G, et al. Evidence of fractional-Brownian-motion type asperity model for earthquake generation by means of preseismic, electromagnetic emissions. *Nat Hazard Earth Sys*, 2008, **8**:657~669
- [13] Papadimitriou C, Kalimeri M, Eftaxias K. Nonextensivity and universality in the earthquake preparation process. *Phys*

- Rev E*, 2008, **77**(36101):1~14
- [14] Kalimeri M, Papadimitriou C, Eftaxias K. Dynamical complexity detection in pre-seismic emissions using nonadditive Tsallis entropy. *Physica A*, 2008, **387**:1161~1172
- [15] Kapiris P, Eftaxias K, Chelidze T. The electromagnetic signature of prefracture criticality in heterogeneous media. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(065702):1~4
- [16] Contoyiannis Y F, Eftaxias K. Tsallis-Levy statistics in the preparation of an earthquake. *Nonlinear Proc Geoph*, 2008, **15**:379~388
- [17] Bahat D, Rabinovitch A, Frid V. Tensile Fracturing in Rocks: Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods. Berlin: Springer Verlag, 2005. 570
- [18] Contoyiannis Y F, Diakonou F K. Criticality and intermittency in the order parameter space. *Phys Lett A*, 2000, **268**:286~292
- [19] Eftaxias K, Kapiris P, Polygiannakis J, et al. Signatures of pending earthquake from electromagnetic anomalies. *Geophys Res Lett*, 2001, **28**:3321~3324
- [20] Contoyiannis Y F, Nomicos C, Kopanas J, et al. Critical features in electromagnetic anomalies detected prior to the L' Aquila earthquake. *Physica A*, 2010, **389**(3):499~508
- [21] Hayakawa M, Molchanov I O A, Kodama T, et al. On a possibility to monitor seismic activity using satellites. *Adv Space Rev*, 2000, **26**(6):993~996
- [22] Lagoutte D, Brochot J Y, de Carvalho D, et al. The Demeter Scientific Mission Center. *Planet Space Sci*, 2006, **54**(5):428~440
- [23] 曹晋滨, 燕春晓, 路立等. 地球近地空间非震电磁扰动. 地震, 2009, **29**(Suppl.):17~25  
Cao J B, Yan C X, Lu L, et al. Non-seismic induced electromagnetic waves in the near Earth space. *Earthquake* (in Chinese), 2009, **29**(Suppl.):17~25
- [24] 路立, 杨俊英, 曹晋滨等. 太阳活动低年电离层磁场 VLF 波的观测特性研究. 地球物理学报, 2011, **54**(6):1403~1420  
Lu L, Yang J Y, Cao J B, et al. Observational characteristics of ionospheric magnetic VLF wave in the solar minimum year. *Chinese J Geophys* (in Chinese), 2011, **54**(6):1403~1420
- [25] Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. The electric field experiment on DEMETER. *Planet Space Sci*, 2006, **54**(5):456~471
- [26] Loewe C A, Pröls G W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J Geophys Res*, 1997, **102**(A7):14209~14213, doi:10.1029/96JA04020
- [27] Chuo Y J, Liu J Y, Pulnits S A, et al. The ionospheric perturbations prior to the Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes. *J Geodyn*, 2002, **33**:509~517

(本文编辑 何燕)

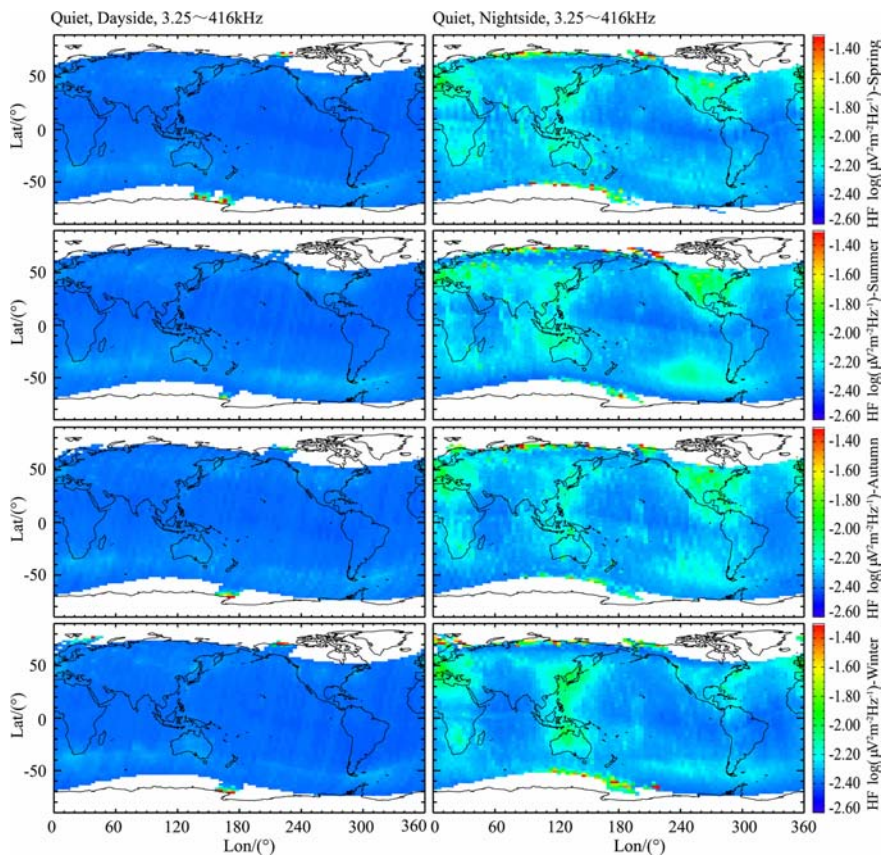


图1 2007年地磁宁静期间,3.25~416 kHz频段  
电场 HF 波功率谱的全球平均分布

组图左边为向阳面,右边为背阳面;从上到下分别表示春、夏、秋、冬四个季节。

Fig. 1 The global distribution of the power spectrum intensity of the HF electric field in the band from 3.25 kHz to 416 kHz during the quiet in the year of 2007

The left panel represents the results of the dayside and the right shows that of the nightside.

Spring, summer, autumn and winter are given from top to bottom.

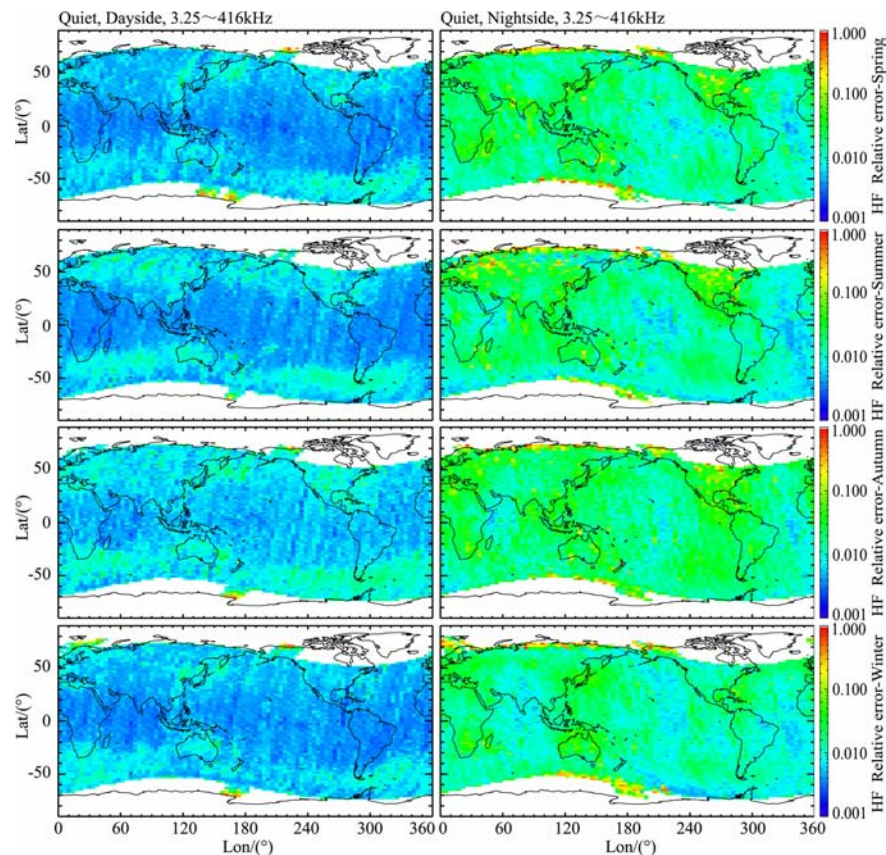


图2 2007年地磁宁静期间,3.25~416kHz频段  
电场 HF 波功率谱相对统计误差的全球分布

左边为向阳面,右边为背阳面;从上到下分别表示春、夏、秋、冬四个季节。

Fig. 2 The statistical error of the global distribution of the power spectrum intensity of the HF electric field in the band from 3.25 kHz to 416 kHz during the quiet

in the year of 2007

The left panel represents the results of the dayside and the right shows that of the nightside.

Spring, summer, autumn and winter are given from top to bottom.



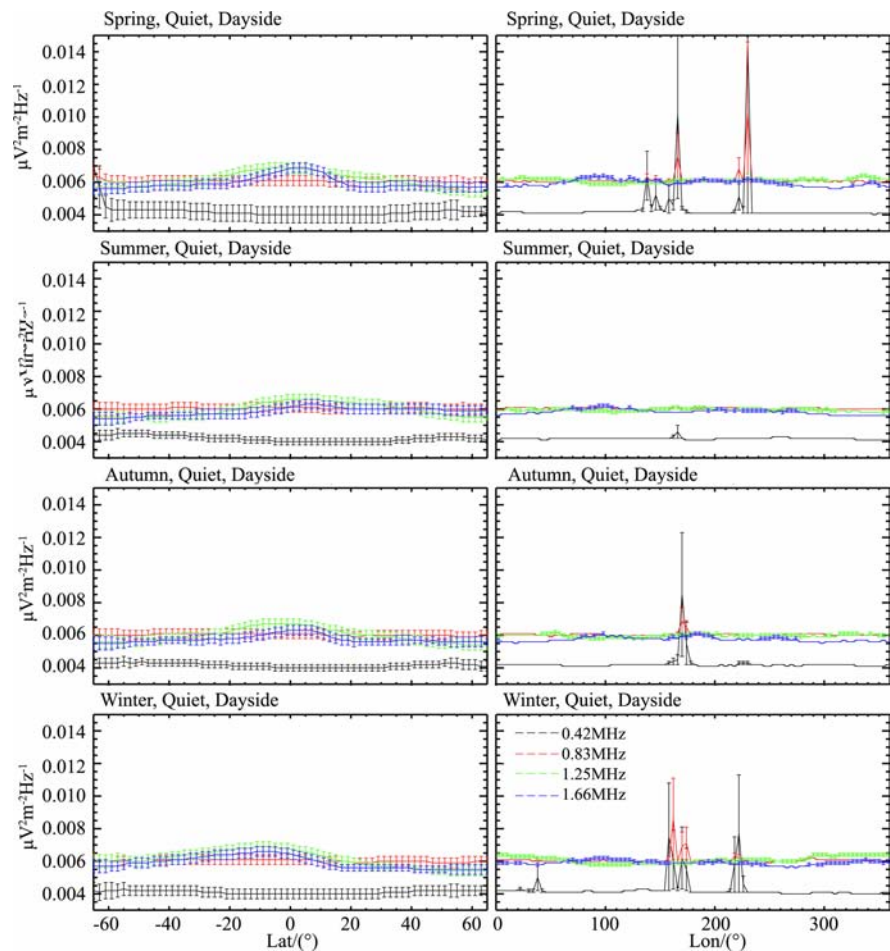


图3 2007年地磁宁静期间向阳面电场HF波功率谱的频谱特性  
 图中电场HF波功率谱的四条谱线显示如下:黑色为0.003~0.42 MHz,红色为0.42~0.83 MHz,绿色为0.83~1.25 MHz,蓝色为1.25~1.66 MHz.每组曲线图左边为纬度变化,右边为经度变化;从上到下分别表示春、夏、秋、冬四个季节。

Fig. 3 The spectrum features of the dayside power spectrum intensity of the HF electric field during the quiet in the year of 2007

The four spectrum bands are shown as follows: black; from 0.003 to 0.42 MHz; red; from 0.42 to 0.83 MHz; green; from 0.83 to 1.25 MHz; blue; from 1.25 to 1.66 MHz. The left panel represents the results of the latitude and the right shows that of the longitude. Spring, summer, autumn and winter are given from top to bottom.

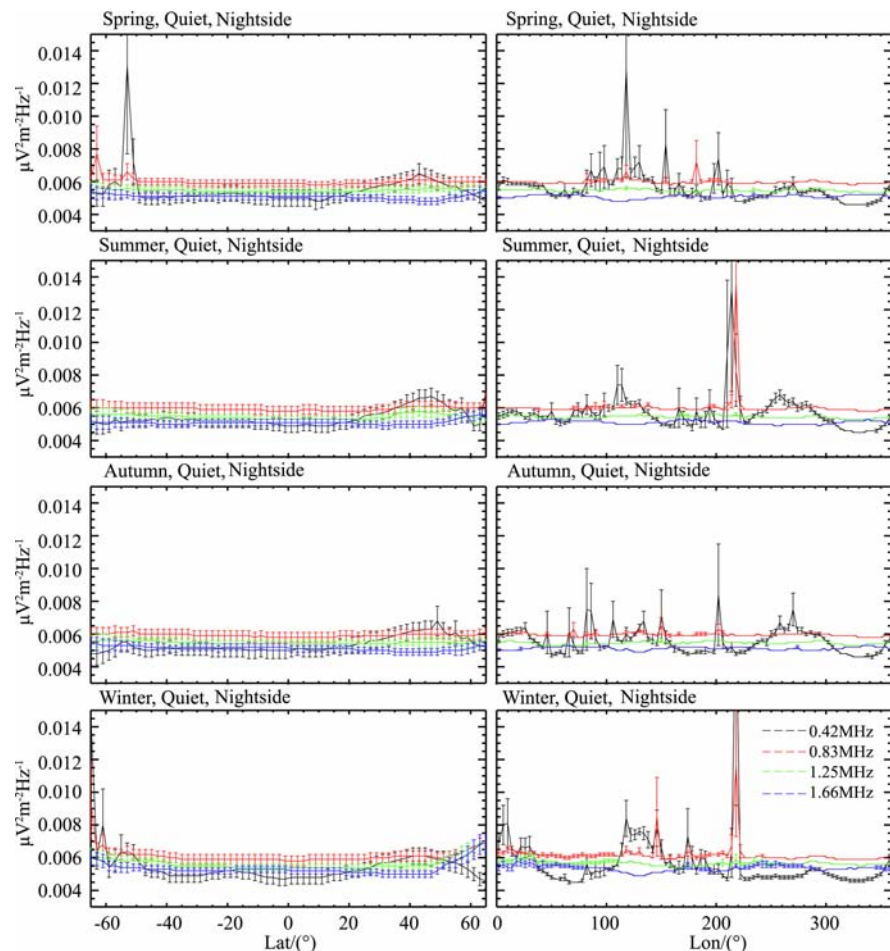


图4 同图3,但为2007年地磁宁静期间背阳面电场HF波功率谱的频谱特性  
 Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the spectrum features of the nightside power spectrum intensity of the HF electric field during the quiet in the year of 2007

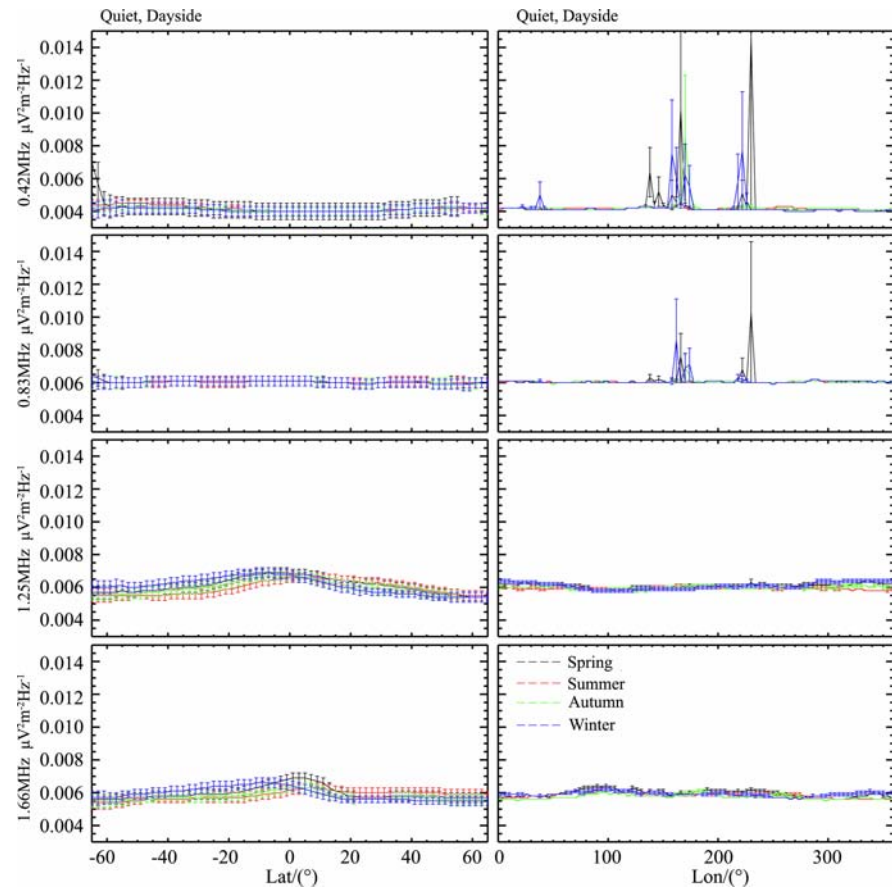


图 5 2007 年地磁宁静期间电场向阳面时 HF 波功率谱的季节变化曲线  
 黑色为春季, 红色为夏季, 绿色为秋季, 蓝色为冬季。每组曲线图左边为纬度变化, 右边为经度变化; 从上到下给出了四个谱带, 它们依次为: 0.003~0.42 MHz、0.42~0.83 MHz、0.83~1.25 MHz 和 1.25~1.66 MHz

Fig. 5 The season features of the dayside power spectrum intensity of the HF electric field during the quiet in the year of 2007

The four seasons are shown as follows: black: Spring; red: Summer; green: Autumn; blue: Winter. The left panel represents the results of the latitude and the right shows that of the longitude. There are four spectrum bands from top to bottom and they successively are: from 0.003 to 0.42 MHz; from 0.42 to 0.83 MHz; from 0.83 to 1.25 MHz; from 1.25 to 1.66 MHz.

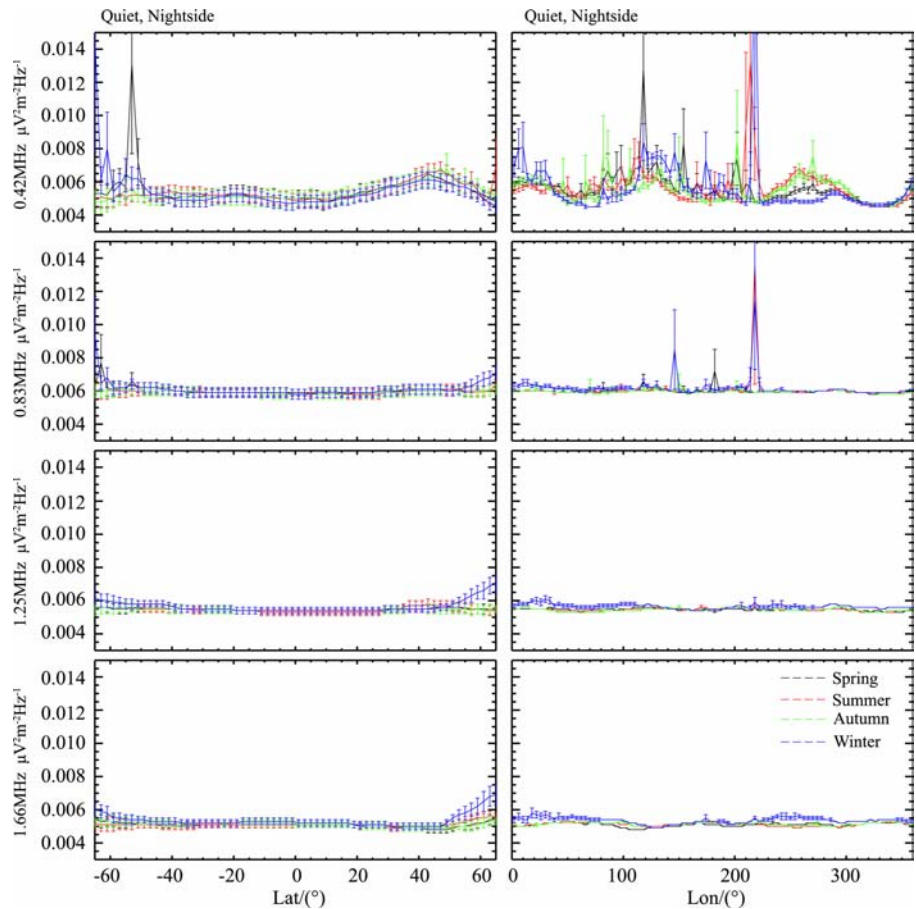


图 6 同图 5, 但为 2007 年地磁宁静期间电场背阳面时 HF 波功率谱的季节变化曲线  
 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the season features of the nightside power spectrum intensity of the HF electric field during the quiet in the year of 2007



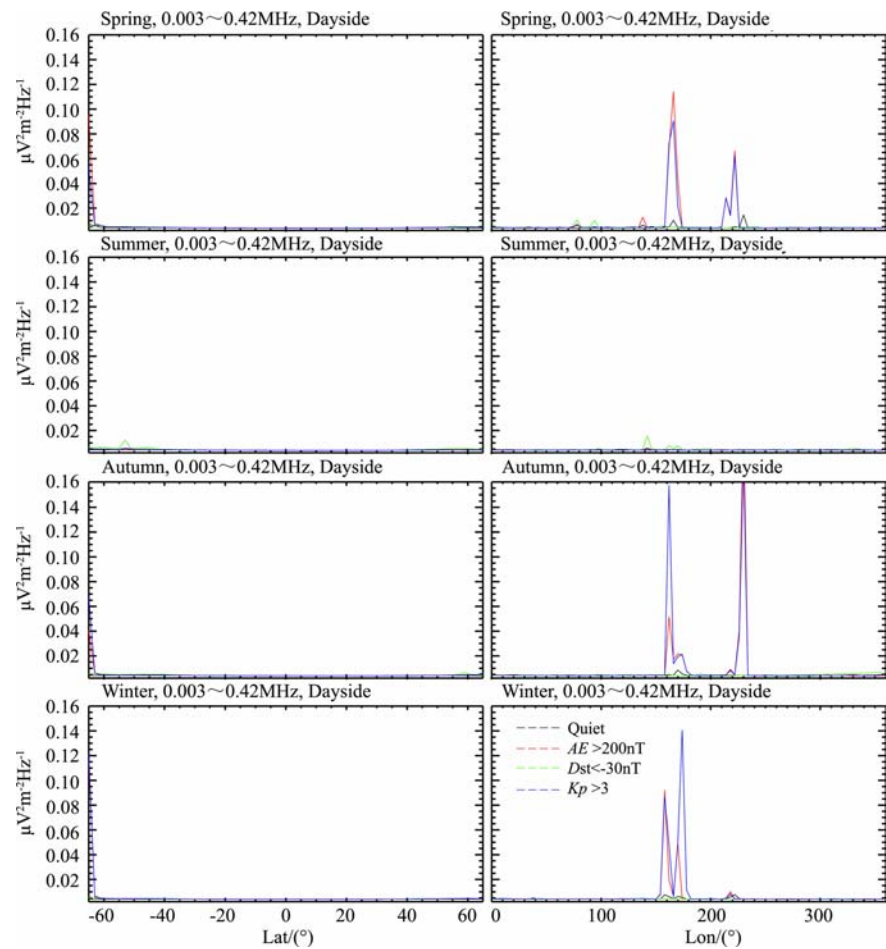


图 7 2007 年向阳面时, 0.003~0.42 MHz 频段, 电场 HF 波功率谱的地磁活动响应曲线  
 黑色为地磁宁静, 红色表示  $AE > 200$  nT, 绿色表示  $Dst < -30$  nT, 蓝色表示  $Kp > 3$ .  
 左边为纬度变化, 右边为经度变化; 从上到下分别表示春、夏、秋、冬四个季节。

Fig. 7 The geomagnetic response of the dayside power spectrum intensity of the HF from 0.003 to 0.42 MHz in the year of 2007

The four conditions are shown as follows: black: quiet; red:  $AE > 200$  nT; green:  $Dst < -30$  nT; blue:  $Kp > 3$ . The left panel represents the results of the latitude and the right shows that of the longitude. Spring, summer, autumn and winter are given from top to bottom.

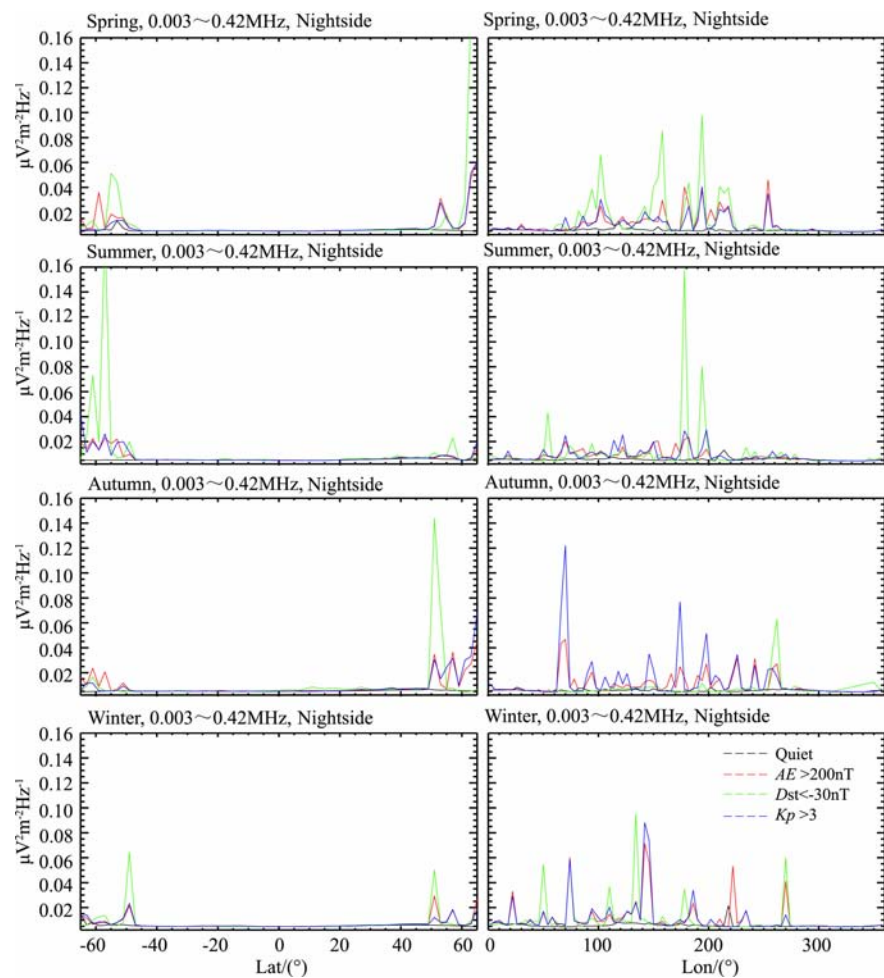


图 8 同图 7, 但为 2007 年背阳面时, 0.003~0.42 MHz 频段, 电场 HF 波功率谱的地磁活动响应曲线

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the geomagnetic response of the nightside power spectrum intensity of the HF from 0.003 to 0.42 MHz in the year of 2007