

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, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.001

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, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.001

太阳活动低年电离层磁场 VLF 波的观测特性研究

路 立¹, 杨俊英², 曹晋滨², 张学民³, 陈化然⁴

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 100190

2 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

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 本文利用搭载在 DEMETER 卫星上的感应式磁力仪 (Instrument Magnetometer Search-Coil, IMSC) 探测数据分析了磁场甚低频 (Very Low Frequency, VLF) 波功率谱的空间分布. 在排除地磁扰动影响 ($Dst \leq -30$ nT, $Kp \geq 3$, $AE \geq 200$ nT) 的前提下, 我们给出 2007 年不同季节, 日侧和夜侧, 磁场 VLF 波功率谱的全球分布的背景场探测和对应的统计误差分布. 利用太阳活动低年的背景场探测统计分析了磁场 VLF 波功率谱的频谱特性和季节变化, 以及对来自空间的地磁活动的响应特征. 太阳同步高度卫星探测的磁场 VLF 波功率谱也可以观测到源于地球特定区域里的磁场异常所产生的频谱响应. 12.5~17.5 kHz 频段的磁场 VLF 波功率谱全球分布清楚地给出了南大西洋磁场异常区的分布轮廓. 夜间百慕大地磁异常影响了磁场 VLF 波功率谱的多个频段, 并显示出类似于高纬极区磁场的地磁活动响应的观测特征. 卫星磁场 VLF 波功率谱探测背景研究表明, 源于空间的地磁扰动和源于地球的局部地磁异常都会引起电离层磁场 VLF 波功率谱的变化. 特别是在 12.5~17.5 kHz 频段, 我们发现了沿板块边缘分布的电离层磁场 VLF 波功率谱增强带, 这将为我们的探寻由板块运动引起的地球突发事件的电离层响应增加探测依据, 为定量甄别此类事件的电离层异常信号积累实用的背景参照.

关键词 磁场 VLF 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.0001-5733.2011.06.001

中图分类号 P352

收稿日期 2010-04-26, 2011-03-28 收修定稿

Observational characteristics of ionospheric magnetic VLF wave in the solar minimum year

LU Li¹, YANG Jun-Ying², CAO Jin-Bin², ZHANG Xue-Min³, CHEN Hua-Ran⁴

1 State Key Laboratory of Space Weather, Centre for Space Science and Applied Research of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

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

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

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

Abstract Ionospheric VLF wave recorded by the Instrument Magnetometer Search-Coil (IMSC) onboard the DEMETER spacecraft during 2007, the solar minimum year, were investigated statistically. By excluding the influence of geomagnetic activity with geomagnetic active indexes $Dst \leq -30$ nT, $Kp \geq 3$ and $AE \geq 200$ nT, the quiet global distributions of power intensity spectrum of VLF wave, and the corresponding statistical error, were displayed for different seasons in both the dayside and the nightside. By using the power spectral global distribution

background, the spectrum characteristics, seasonal variations and geomagnetic active responses of the VLF wave were analyzed statistically. The magnetic VLF wave observation in the solar synchronous orbit can also be sensitive to the magnetic anomalies produced from the Earth. At the frequency channel of 15 kHz and 17.5 kHz, the south Atlantic magnetic anomaly contour was presented clearly with the power spectral enhancement under the global background. The Bermuda geomagnetic anomalies caused VLF wave power spectral increase in almost all spectral bands at the nighttime, and showed about similar geomagnetic active responses as observed at higher latitude. Especially in the frequency band 12.5~17.5 kHz, we found that the power spectral increase along the edge of geographical plates, which will enhance our search for ionospheric seismo-response caused by the plate motion, and accumulate experiential background references for such anomalous signal identification quantitatively.

Keywords Magnetic VLF wave, Power intensity spectrum, Ionospheric seismo-response, Geomagnetic anomaly, Geomagnetic active

1 引言

在太阳同步轨道高度卫星既可以探测到来自空间的电磁波动(包括:电磁离子回旋波、哨声波、嘶声、合声、地磁脉动等)信号,也可以探测到来自地面电磁扰动(如:人工 VLF 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^[1]. 早在 19 世纪末期,英国地震学家 Milne 发现源于地球内部的地震活动也会产生局部近地空间的电磁扰动. 随着地震电磁扰动探测事例的增加^[2~8],人们开始关注空间对地观测,并期望这种地震前就开始产生的电磁异常扰动可以应用于地震的短临预报.

在太阳同步卫星轨道上监测电离层粒子和电磁波背景场的地震响应是近年来针对地震现象开发的新的研究项目,法国 2004 年发射的 DEMETER 卫星^[9](600~700 km 高度的圆轨道极轨卫星)是执行上述使命,并迄今仍在巡游太空的专业卫星. 通过国际合作,我们下载了 DEMETER 卫星的连续探测数据,用于建立太阳活动低年电离层电磁探测背景场.

一般来说,来自空间的电磁波动具有大尺度的全球分布特性,并随着地磁活动增强而增强;来自地面的电磁扰动的时空尺度相对较小,具有一定的地理分布特征. 为了从来源众多的磁场 VLF 波中识别地震异常信号,我们需要首先建立地磁宁静条件下的磁场 VLF 波背景场,并研究来源不同的磁场 VLF 波的扰动特性.

利用搭载在 DEMETER 上的磁场搜索线圈^[10](Instrument Magnetometer Search-Coil, IMSC)连续探测数据分析了磁场 VLF 波功率谱的空间分布.

在排除地磁扰动影响($Dst \leq -30$ nT, $Kp \geq 3$, $AE \geq 200$ nT)的前提下,我们给出 2007 年(太阳活动极小年),春、夏、秋、冬四个不同季节,对应的日侧和夜侧磁场 VLF 波功率谱背景场和统计误差分布. 本文考虑了 3 种不同的地磁活动指数: Dst 指数是对磁暴环电流强度的量度,太阳活动低年发生率不高; Kp 指数代表除日变化和暴时变化长期分量外其他现象引起的扰动变化; AE 指数是对亚暴极光电急流强度的量度,其发生率很高几乎每天都会出现. 同时考虑 3 种不同的地磁活动指数以期排除所有地磁扰动影响. 在采样过程中 3 种不同的制约会有重叠,但不同的制约基本反映了各自的地磁活动特性. 磁场 VLF 波功率谱全球分布的经度变化主要是磁倾角引起的,卫星轨道覆盖区在地磁坐标系里的纬度覆盖范围是从 $-65^\circ \sim +65^\circ$. 我们还讨论了磁场 VLF 波功率谱空间分布的频谱特性和季节变化,以及磁场 VLF 波功率谱在地球磁场异常区域(如:百慕大三角区、南大西洋异常区)的分布特性.

2 地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱的全球分布

DEMETER 是一颗圆轨道极轨卫星^[9],运行高度 670 km,升交点位于地方时 10:00~10:30,环绕地球的轨道周期约为 100 min. 由于地球自转,相邻轨道的经度相差约 25° (在 670 km 高度处, $1^\circ \sim 123$ km). DEMETER 卫星轨道覆盖的重访周期为 16 天,每个季节卫星轨道全球覆盖次数约为 5.6 次. 我们把 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

表 1 采样情况统计表
Table 1 Statistical table of the sampling status

采样数与采样区	春季		夏季		秋季		冬季		
	日侧	夜侧	日侧	夜侧	日侧	夜侧	日侧	夜侧	
Quiet	451496	448915	468331	461706	255806	250964	439147	430388	
$AE > 200$ nT	122494	118878	123767	124969	55654	53947	107523	106098	
$Dst < -30$ nT	18584	20136	19731	18735	4198	3473	22134	22898	
$Kp > 3$	98618	93318	86622	84207	45460	44650	119413	118691	
H (km)	Max	690.141	691.450	690.242	690.418	690.144	690.217	690.161	690.200
	Min	663.861	664.110	663.864	664.081	663.776	663.983	663.786	664.001
	Mean	672.688	672.790	672.702	672.789	672.140	672.390	672.632	672.773
LT (h)	Max	12.674	25.998	12.100	24.110	12.112	24.068	13.080	24.042
	Min	8.314	19.911	8.283	20.210	8.243	19.979	8.212	18.820
	Mean	10.245	22.245	10.222	22.221	10.196	22.196	10.156	22.153

节,分日侧和夜侧,对应不同地磁活动指数进行统计采样,采样结果由表 1 给出.日侧和夜侧地磁活动与宁静的采样数比率大致相同:亚暴($AE \geq 200$ nT)~0.25,磁暴($Dst \leq -30$ nT)~0.05,太阳风高速流引起的高纬度极区的地磁扰动($Kp \geq 3$)~0.23,其中,地磁活动采样数比率在秋季偏低,冬季偏高.这样亚暴期间($AE \geq 200$ nT)的采样时段的总和约有 1.12 个卫星轨道重访周期.考虑到亚暴时段分布的不均匀性,很难得到一幅完整的全球覆盖分布图像.高纬磁扰动($Kp \geq 3$)与亚暴的情况差不多,约为 1.03 个卫星轨道重访周期;而磁暴($Dst \leq -30$ nT)的采样时段总和只有~0.22 个卫星轨道重访周期.采样高度约为 672 ± 10 km.采样的地方时(每轨的地方时在赤道附近白天是 10:30,夜间是 22:30)时区日侧接近正午($\sim 10.2 \pm 2$ h),夜侧接近午夜($\sim 22.2 \pm 2$ h).

我们把全球面分成 90×90 均匀网格,每个网格均为 4° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度),在 $\pm 65^\circ$ 纬度范围的有效统计网格内,每个网格的平均统计样本数:地磁宁静条件下约为 75 个,地磁活动条件下约为 16 个.其中,秋季的平均统计样本数只有上述采样数目的一半.

2.1 磁场 VLF 波功率谱的地理分布

我们把磁场 VLF 波(0.02~20 kHz)的功率谱均分成 8 个频率宽度为 2.5 kHz 的频段,取每个频段功率谱的平均值代表该频段的频谱特性.来自空间的离子回旋波、哨声波、嘶声和合声,以及地磁脉动等,频率通常小于 2.5 kHz,均包含在磁场 VLF 波的第一频段.以第一频段(0.02~2.5 kHz)为例,

我们给出了 2007 年地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱密度(图 1)及相对误差(图 2)的统计全球分布.为了表现磁场 VLF 波功率谱的地域分布特性,这里均采用地理坐标系描述电离层磁场 VLF 波功率谱的分布.

磁场 VLF 波功率谱的空间分布特性随磁纬度升高而增强.在百慕大三角附近区域,夜侧出现磁场 VLF 波功率谱增强,其中,以秋季(图 1 右侧第三幅)最为显著.

地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱的相对统计误差分布形态与图 1 相似(图 2),功率谱密度大的区域相对误差也比较大(约为 30%).大部分中低纬区域(除去少数磁场 VLF 波辐射异常区)的磁场 VLF 波功率谱相对误差在 10% 以下,甚至更低.

地磁宁静期间磁场 VLF 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磁场 VLF 波辐射异常的背景参照.为了进一步分析磁场 VLF 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磁场 VLF 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)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.

2.2 磁场 VLF 波的频谱特性和季节变化

在太阳同步卫星高度(670 km)地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱密度随频率升高而降低,但在 10.0 kHz 和 20.0 kHz 附近有反常变化.电离层离

子回旋波的频率 ($\Omega_i = eB/m_i \propto B$) 约为几百赫兹, 包括波粒相互作用产生的哨声、嘶声和合声均包含在 0.02~2.5 kHz 的频段(图 3A0 和 B0 中的黑色曲线)。由于上述波动与磁场相关, 随着纬度升高磁场增强, 对应的磁场 VLF 波功率谱密度增加。磁场 VLF 波功率谱密度增强的区域在纬度 $\pm 40^\circ$ 以上的高纬度区, 日侧增强幅度较大, 夜侧相对弱一些。

在电离层高度, 当低混杂波的频率 ($\omega = \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$) 与离子的等离子体频率 ($\omega_p = e\sqrt{N/(m\epsilon_0)} \propto \sqrt{N}$) 相近时 (~ 10 kHz) 得到共振加强, 如图 3A0 和 B0 中的蓝色曲线和图 3A1 和 B1 中的黑色曲线, 比邻近频段的功率谱密度略高, 这就是我们看到磁场 VLF 波功率谱密度在 10.0 kHz 附近反变的原因。由于 17.5~20.0 kHz 频段功率谱包含有 20.0 kHz 以上频段 VLF 波的映射, 第二次功率谱反变的原因比较复杂。

磁场 VLF 波功率谱密度的经度分布(每组图右侧的曲线)常和地球表面的磁场结构有关。图 3A1 和 B1 的 12.5~15.0 kHz 和 15.0~17.5 kHz 频段, 在经度: $-90^\circ \sim +30^\circ$, 纬度: $-20^\circ \sim -60^\circ$ 区域里, 磁场 VLF 波功率谱密度曲线(图 3A1 红色和绿色)有一个隆起对应着南大西洋磁场异常区(将在 2.3 节讨论)。图 3B0 和图 3B1 中夏秋两季多个频段在经度 290° 附近有个峰值对应着图 1 的百慕大磁场异常区。

子午面里地磁轴的方向是随着季节变化的(这里季节是按北半球的情况来规定的, 南半球则正好相反), 在地理坐标系里的中高纬度区域我们看到夏季北半球磁场 VLF 波功率谱密度增加大于南半球。而冬季则相反, 南半球磁场 VLF 波功率谱密度增加大于北半球, 因为北半球的冬季是南半球的夏季。在低纬度赤道区各个频段的功率谱季节变化不大, 只有 10.0~12.5 kHz 频段(图 3A1 上和图 3B1 上)的低混杂波冬季的功率谱(黑色曲线)明显降低, 而夏季则略有升高。一般来说, 磁场 VLF 波功率谱密度经度分布的季节变化不大, 只有百慕大附近(经度 $240^\circ \sim 310^\circ$)夜侧的夏(图 3B0 和 B1 中第 2 行)秋(图 3B0 和 B1 中第 3 行)两季多个频段的磁场 VLF 波功率谱密度增长明显。

2.3 磁场 VLF 波在特定异常区的地源性特征

磁场 VLF 波功率谱密度的经度分布(图 3 中每组图右侧的曲线)变化常和地球表面的某些特殊磁场结构有关。图 3A1 和 B1 右侧(12.5~15.0 kHz, 红色和 15.0~17.5 kHz, 绿色), 在经度: $270^\circ \sim 360^\circ$

和 $0^\circ \sim 30^\circ$, 纬度: $-20^\circ \sim -60^\circ$ 区域里, 磁场 VLF 波功率谱密度曲线有一个隆起, 对应着图 4 中看到的南大西洋磁场异常区。在南大西洋异常区, 同一高度处的磁场比邻近区域弱, 使磁漂移壳产生畸变形成了一个“磁漏斗”。这样, 在此区域被捕获粒子总量增加, 成为低轨道卫星粒子(主要是质子)辐射损伤的重灾区^[11]。由磁场 VLF 波功率谱的频谱特性(2.2 节), 我们知道 670 km 高度全球平均功率谱增强的频率在 10 kHz 附近, 而 DEMETER 卫星在南大西洋异常区探测到的磁场 VLF 波功率谱增强频率移到 15 kHz 附近, 据此判断南大西洋异常区的离子数密度至少是周围环境的 1.2 倍。

另一个地球磁场异常减弱的区域就是百慕大三角区。夜侧(图 3B0 和图 3B1)秋、夏两季多个频段的磁场 VLF 波功率谱密度经度分布在百慕大磁场异常区(经度 290°)附近有一个峰值, 对应的功率谱密度极大区向东延伸覆盖了墨西哥湾的大片区域。图 4 中, 图组右侧的中间两幅在该区域的功率谱增强也十分明显。由于该区域磁场 VLF 波功率谱密度增强的频段很多, 且季节特征明显, 我们判断功率谱增强和多种成分离子的声波相关, 并受到了气象因素的影响。

除上述两个地磁异常区外, 在图 4A 和 B 的夜侧(右边)陆地与海洋的边缘附近我们还看到一些分布斑驳的磁场 VLF 波功率谱密度增强带(浅蓝色亮点形成的带状分布)环绕亚洲板块和部分南亚到澳洲的区域。根据以往的经验, 地震结构产生的电磁扰动在电离层同步高度的响应位置与地面相比总有一定程度的偏差^[12]。从分布形态判断, 这也许和板块边缘的地磁结构变化有关, 有待进一步考证。

3 磁场 VLF 波的地磁活动全球响应

图 5 给出太阳活动低年(2007 年), 8 个不同频段(图组的第一个标号: A~H), 日侧(图组的第二个标号为 0)和夜侧(图组的第二个标号为 1), 不同季节的磁场 VLF 波功率谱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。磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动增加幅度与地磁活动指数类型有关: 磁暴 ($Dst \leq -30$ nT) 期间, 统计采样约占总采样的 4%, 磁场 VLF 波功率谱密度(图 5 中的绿色曲线)的地磁活动平均增幅最高; 亚暴 ($AE \geq 200$ nT, 统计采样约占到总采样的 20%), 和一般性磁扰动 ($Kp \geq 3$, 统计采样约占到总采样的

18%)期间,磁场 VLF 波功率谱密度(图 5 中用红色和蓝色曲线表示)的地磁活动平均增幅明显小于磁暴期间的平均增幅,其中,高纬磁扰动平均增幅略高于亚暴平均增幅. 磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动平均增幅越大,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图表示.

在代表离子回旋波、嘶声、合声和哨声的低频段(0.02~2.5 kHz,图 5 A0 和 A1),磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动响应幅度最大. 磁暴期间功率谱的最大增幅达 8 倍左右. 亚暴和高纬磁扰动期间,功率谱的最大增幅也有 3~4 倍. 随着频率升高磁场 VLF 波功率谱的地磁活动响应幅度趋于平缓,在磁场 VLF 波功率谱的频谱末端(17.5~20.0 kHz,图 5H0 和 H1),除去夜侧墨西哥湾附近的百慕大磁场异常区,功率谱密度纬度分布的地磁活动响应最大增幅下降到地磁宁静期间功率谱密度的 10%以内.

磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动响应区域,我们分日侧和夜侧分别进行讨论. 在日侧,磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动响应主要表现在高纬度区域. 随着频率的升高地磁活动响应区域的低纬边界向高纬方向移动,从约 25°(图 5A0)移到约 45°(图 5H0). 夏季北半球的磁场 VLF 波功率谱地磁活动响应幅度大于南半球;而冬季则相反,北半球的磁场 VLF 波功率谱地磁活动响应幅度小于南半球. 在夜侧,总的功率谱地磁活动响应分布变化趋势与日侧相同. 夜侧高纬度区域的功率谱地磁活动响应幅度比日侧低,但响应范围向低纬方向有所延伸.

图 5 中,组图右侧的功率谱地磁活动响应经度分布曲线上的大部分锯齿形起伏是采样时段的大尺度(天量级)不连续性造成的. 对于 2.3 节提到的两个地球磁场异常区,情况就不同了. 在 12.5~15.0 kHz 和 15.0~17.5 kHz 频段看到的南大西洋磁场异常的区域里,图 5F0 和 5G0 中看不出特殊的功率谱地磁活动响应增强. 对于夜侧(图 5F1 和图 5G1),尤其是在秋、夏两季,多个频段都能看到的百慕大地磁异常区,功率谱表现出明显的地磁活动响应增强(如图 5 中组图第二个标号为 1 的,秋季的功率谱纬度分布在北纬 20°附近有一个地磁活动响应的隆起;夏、秋两季的功率谱经度分布在 290°附近也有一个对应的地磁活动响应隆起),并显示出与高纬极区相同的地磁活动响应观测特性;其中,以磁暴响应曲线(绿色)最为突出.

总之,地磁活动引起的磁场 VLF 波功率谱扰动增强主要表现在磁场 VLF 波的低频段;扰动响应区

域出现在高纬度区,并具有明显的全球响应特征. 在低纬赤道区附近(纬度:~±40°之间),地磁活动的日侧响应很小,但夜侧等离子体片方向磁场 VLF 波功率谱表现出明显的磁暴增强.

4 结 论

在 670 km 高度,电离层磁场 VLF 波的频谱大致分两个频段,即离子回旋波的频段和低混杂波频段. 电离层离子与不同波模相互作用产生磁声波及合声使得磁场 VLF 波的功率谱得到不同程度的加强. 我们选取太阳活动低年(2007 年)的磁场 VLF 波功率谱卫星探测数据建立了地磁宁静条件下的磁场 VLF 波背景场.

地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱密度随频率升高而降低,随着纬度升高而增强. 磁场 VLF 波功率谱密度最大的频段主要出现在离子回旋波频段(0.02~2.5 kHz). 磁场 VLF 波功率谱增强的区域在纬度±40°以上的高纬度区,其中,日侧功率谱增强幅度大于夜侧. 随着频率升高磁场 VLF 波功率谱的经纬度变化趋于平缓,但功率谱密度在 10.0 kHz 附近(对应低混杂波频率)有一次小幅增强.

在地理坐标系里的中高纬度区,夏季北半球磁场 VLF 波功率谱密度增加大于南半球. 而冬季则相反,南半球磁场 VLF 波功率谱密度增加大于北半球. 在低纬度赤道区各个频段的功率谱季节变化不大. 在 10.0~12.5 kHz 频段,冬季的功率谱明显降低,而夏季则略有升高.

地磁活动引起磁场 VLF 波功率谱密度增高. 在 0.02~2.5 kHz 频段,磁暴($Dst \leq -30$ nT)期间功率谱的最大增幅达 8 倍左右;亚暴($AE \geq 200$ nT)和高纬磁扰动($Kp \geq 3$)期间,功率谱的最大增幅也有 3~4 倍. 随着频率升高磁场 VLF 波功率谱的地磁活动响应幅度趋于平缓. 在日侧,磁场 VLF 波功率谱密度的地磁活动响应主要表现在高纬度区域. 随着频率的升高地磁活动响应区域向高纬方向移动. 在夜侧,总的功率谱地磁活动响应分布变化趋势与日侧相同. 夜侧高纬度区域功率谱地磁活动响应的增强幅度比日侧低,但响应范围向低纬方向有所延伸.

在 12.5~15.0 kHz 和 15.0~17.5 kHz 频段,磁场 VLF 波功率谱增强的全球分布清楚地给出了南大西洋磁场异常区的分布轮廓. 百慕大地磁异常造成磁场 VLF 波多个频段在该区域夜侧的功率谱增强,这个磁场 VLF 波功率谱增强区域还表现出与

高纬区相同的地磁活动响应特征.

卫星磁场 VLF 波功率谱探测背景研究表明,源于空间的地磁扰动和源于地球的局部地磁异常都会引起电离层磁场 VLF 波功率谱的变化. 特别是在 12.5~17.5 kHz 频段,我们发现了沿板块边缘附近分布的电离层磁场 VLF 波功率谱增强带,这将为我们探寻由板块运动引起的地球突发事件的电离层响应增加探测依据,为定量甄别此类事件的电离层异常信号积累实用的背景参照.

致 谢 感谢法国 DEMETER 数据中心在网上提供的卫星探测数据.

参考文献(References)

- [1] 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
- [2] Leonard R S, Barmes R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**(5): 1250~1253
- [3] Weaver P F, Yuen P C, Prolss G W, et al. Acoustic coupling into the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11 1969. *Nature*, 1971, **226**: 1239~1241
- [4] Gokhberg M B, Morgunov V A, Ypshino T, et al. Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquake in Japan. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**: 7824
- [5] Blanc M. Observations in upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources, A summary. *Annales Geophysicae*, 1985, **3**: 673~688
- [6] Pulinets S A, Legen'ka A D. Spatial-temporal characteristics of large scale distributions of electron density observed in the ionospheric F-region before strong earthquakes. *Cosmic Research*, 2003, **41**(3): 221~229
- [7] Zakharenkova A E, Krankowski A, Shagimuratov I I. Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2006, **6**: 817~823
- [8] Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, et al. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, **31**: 486~495
- [9] Lagoutte D, Brochot J Y, de Carvalho D, et al. The Demeter Scientific Mission Center. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 428~440
- [10] Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, et al. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER; Scientific objectives, description and first results. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 441~455
- [11] 焦维新,濮祖荫,方晓华等. 南大西洋地磁异常区的辐射环境与低轨道卫星粒子辐射通量计算. 地球物理学报, 1999, **42**(2): 163~167
Jiao W X, Pu Z Y, Fang X H, et al. The radiation environment within the South Atlantic anomaly region and the calculating trapped particles fluxes for low orbit satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(2): 163~167
- [12] Pulinets S A, Boyarchuk K A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004

(本文编辑 何燕)

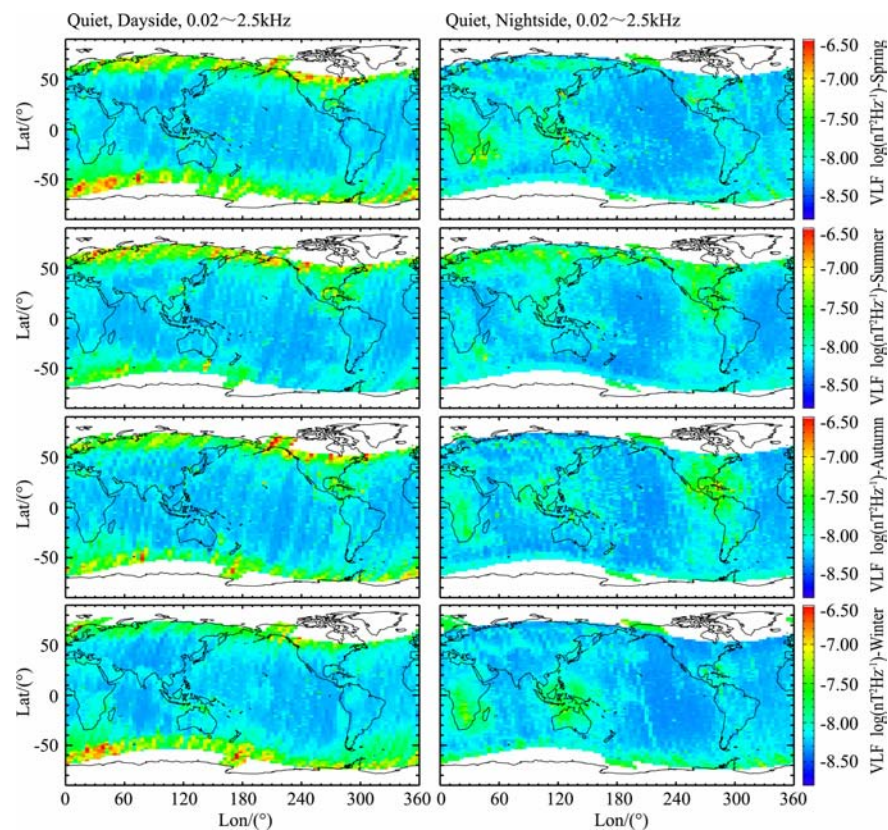


图1 2007年地磁宁静期间磁场VLF波功率谱的全球平均分布
图组左边为日侧,右边为夜侧;从上到下分别表示春、夏、秋、冬四个季节.

Fig. 1 Global distributions of magnetic VLF power spectrum for geomagnetic quiet status during 2007

The panels at the left are shown for the daytime, the right the nighttime, where those panels from top to bottom are shown separately for spring, summer, autumn and winter.

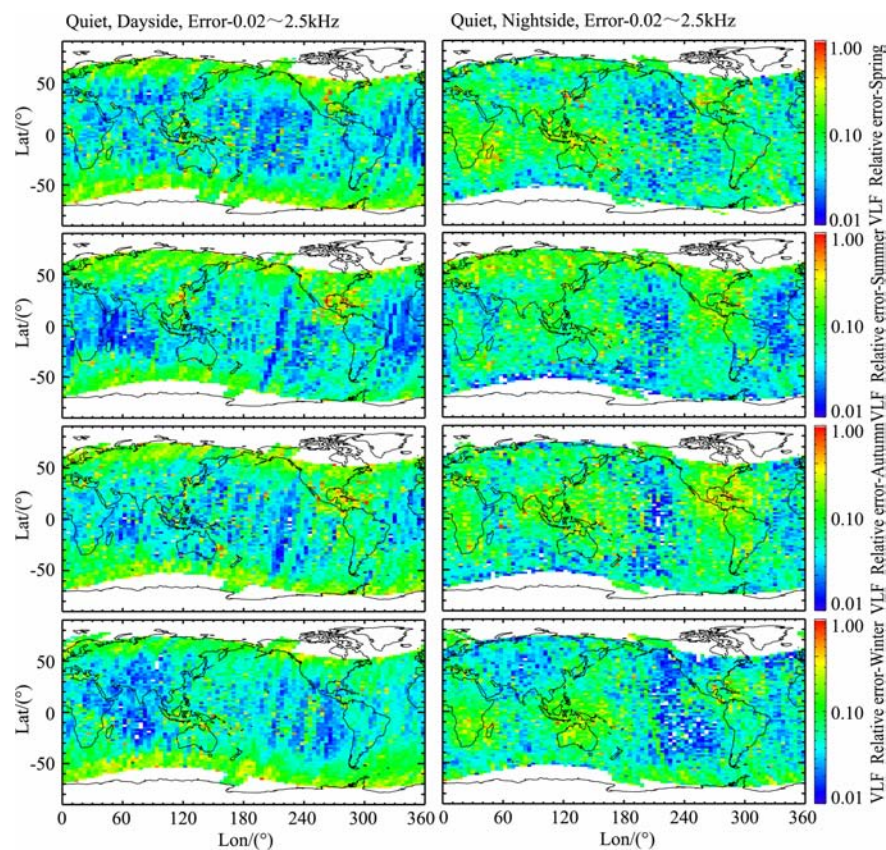
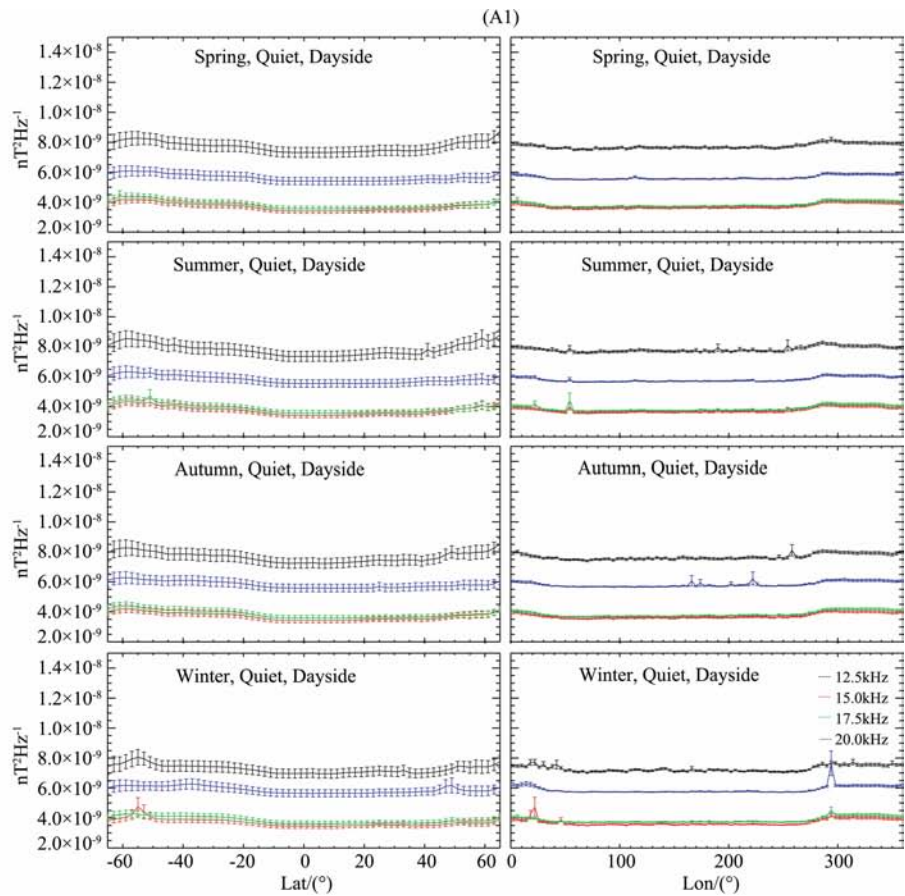
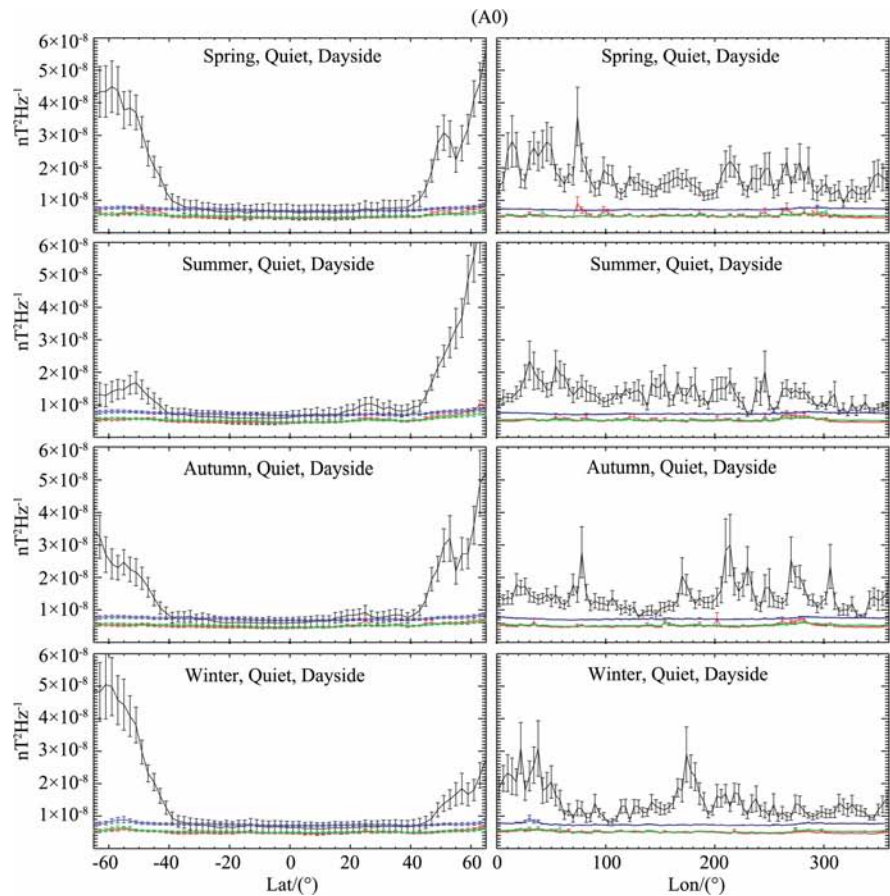


图2 2007年地磁宁静期间磁场VLF波功率谱相对统计误差的全球分布
图组排列方式与图1相同.

Fig. 2 Global relative error distributions of magnetic VLF power spectrum for geomagnetic quiet status during 2007

Those panels are arranged by using the same fashion employed in Fig. 1.



(续)

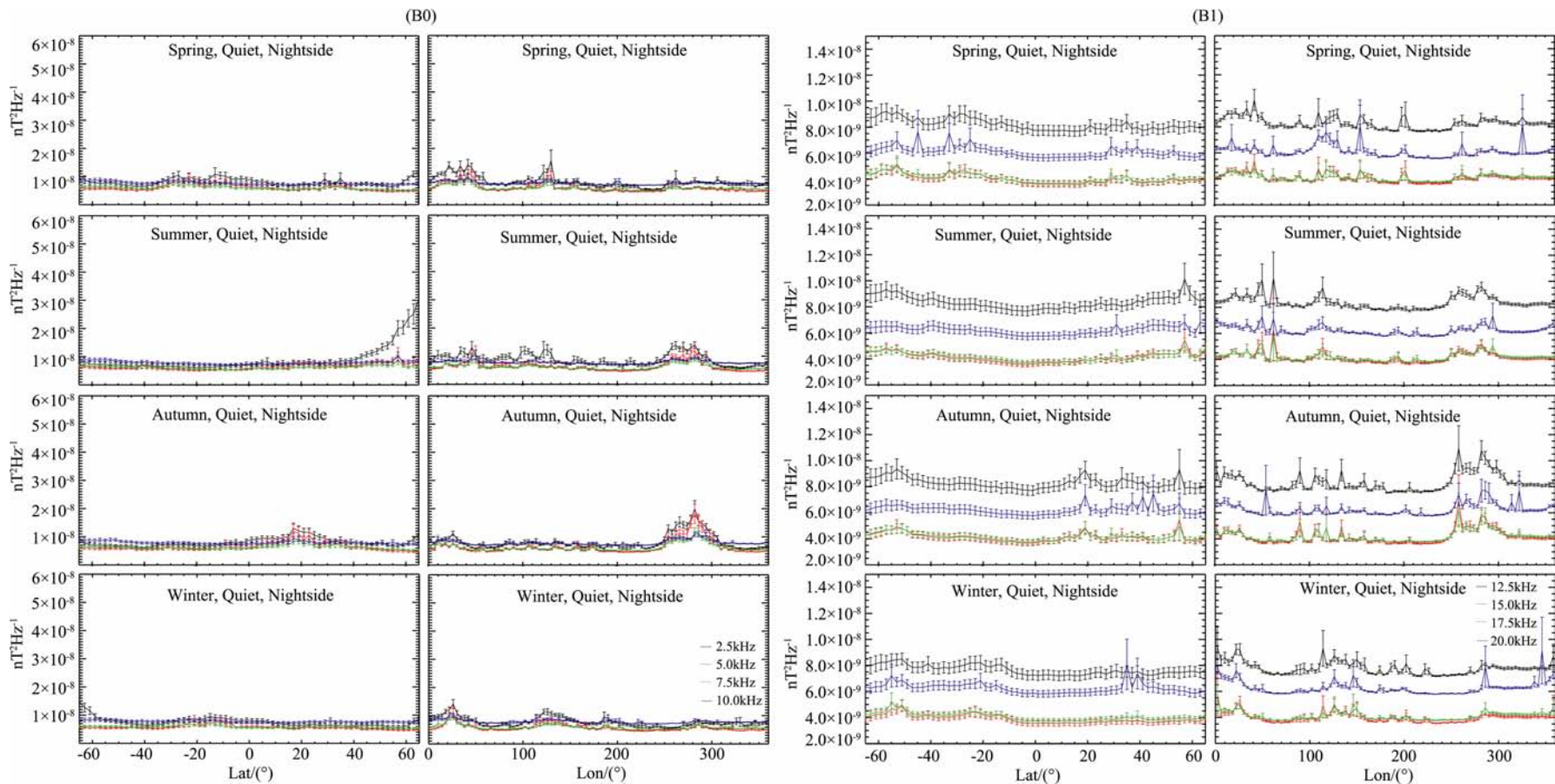


图 3 2007 年地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱的频谱特性

组图的第一个标号 A 为日侧, B 为夜侧。左边图组(第二个标号 0)表示磁场 VLF 波功率谱低频端 4 条谱线: 黑色为 0.02~2.5 kHz, 红色为 2.5~5.0 kHz, 绿色为 5.0~7.5 kHz, 蓝色为 7.5~10.0 kHz。右边图组(第二个标号 1)表示磁场 VLF 波功率谱高频端 4 条谱线: 黑色为 10.0~12.5 kHz, 红色为 12.5~15.0 kHz, 绿色为 15.0~17.5 kHz, 蓝色为 17.5~20.0 kHz。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 Four set of spectral characteristic graphs of magnetic VLF power spectrum for geomagnetic quiet status during 2007 are named A0, A1, B0 and B1. The first tab "A" means daytime, "B" nighttime; the second tab "0" stand for 4 low band of magnetic VLF power spectrum with frequency of 0.02~2.5 kHz (black), 2.5~5.0 kHz (red), 5.0~7.5 kHz (green), 7.5~10 kHz (blue); and "1" 4 high band with frequency of 10.0~12.5 kHz (black), 12.5~15.0 kHz (red), 15.0~17.5 kHz (green), 17.5~20 kHz (blue). In each graph series the left panels display latitude variations, the right panels longitude variations; the panels from top to bottom are shown separately for spring, summer, autumn and winter.

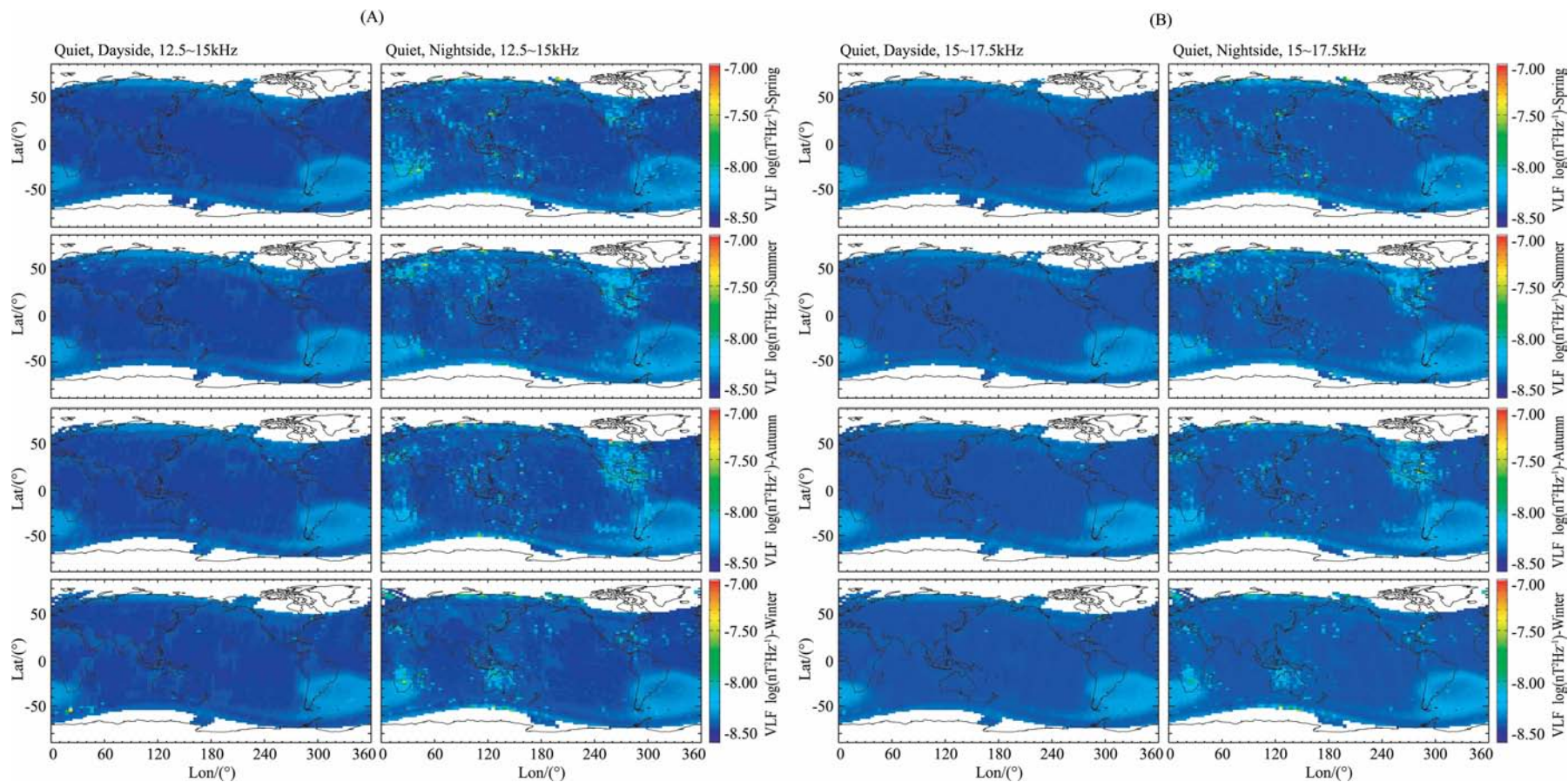


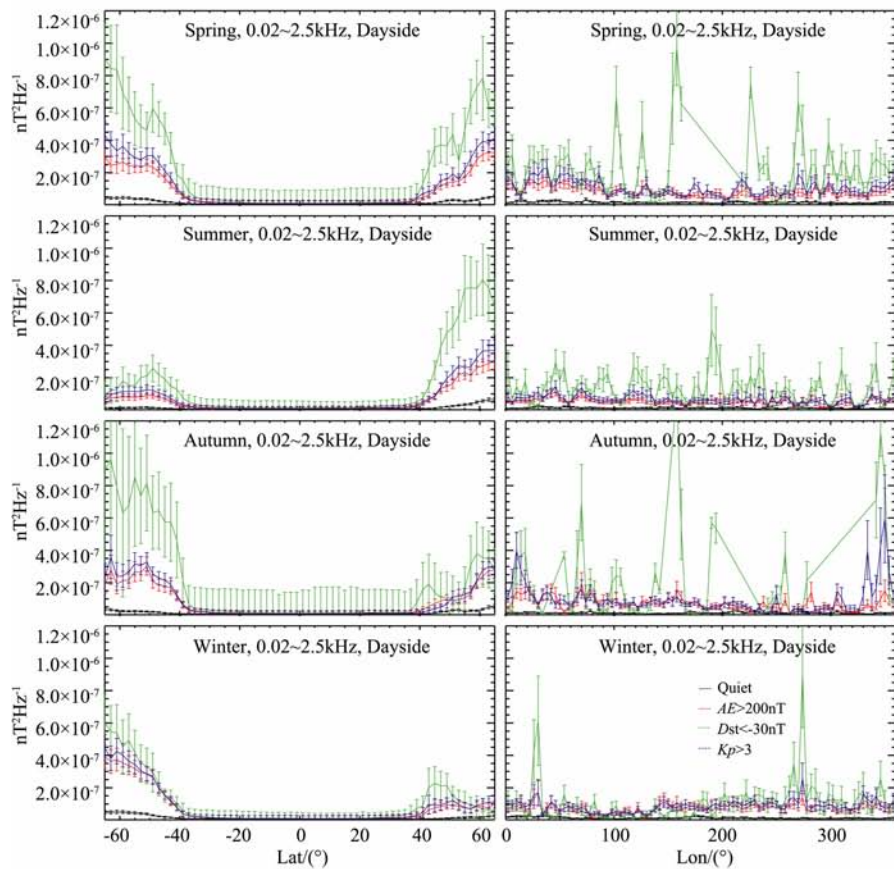
图 4 12.5~15.0 kHz 频段 (A) 和 15.0~17.5 kHz 频段 (B), 2007 年地磁宁静期间磁场 VLF 波功率谱的全球平均分布图组

每组图的排列方式都与图 1 相同。

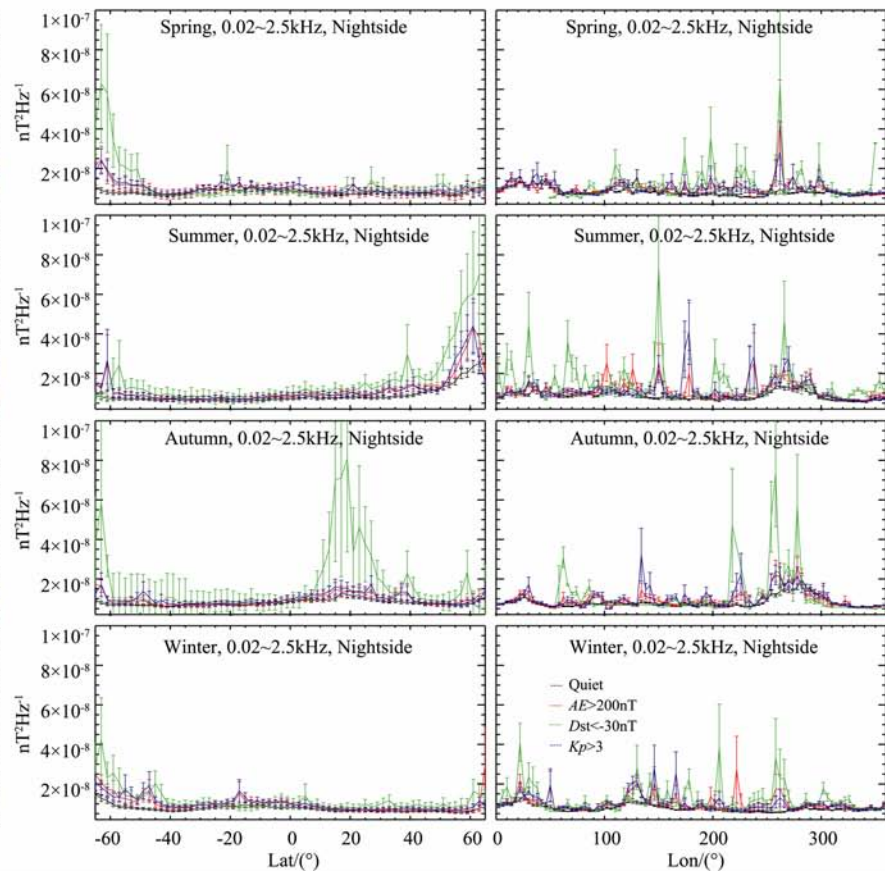
Fig. 4 Global distributions of magnetic VLF power spectrum with frequency band 12.5~15.0 kHz (A) and 15.0~17.5 kHz (B) for geomagnetic quiet status during 2007

In each graph series the panels are arranged by using the same fashion employed in Fig. 1.

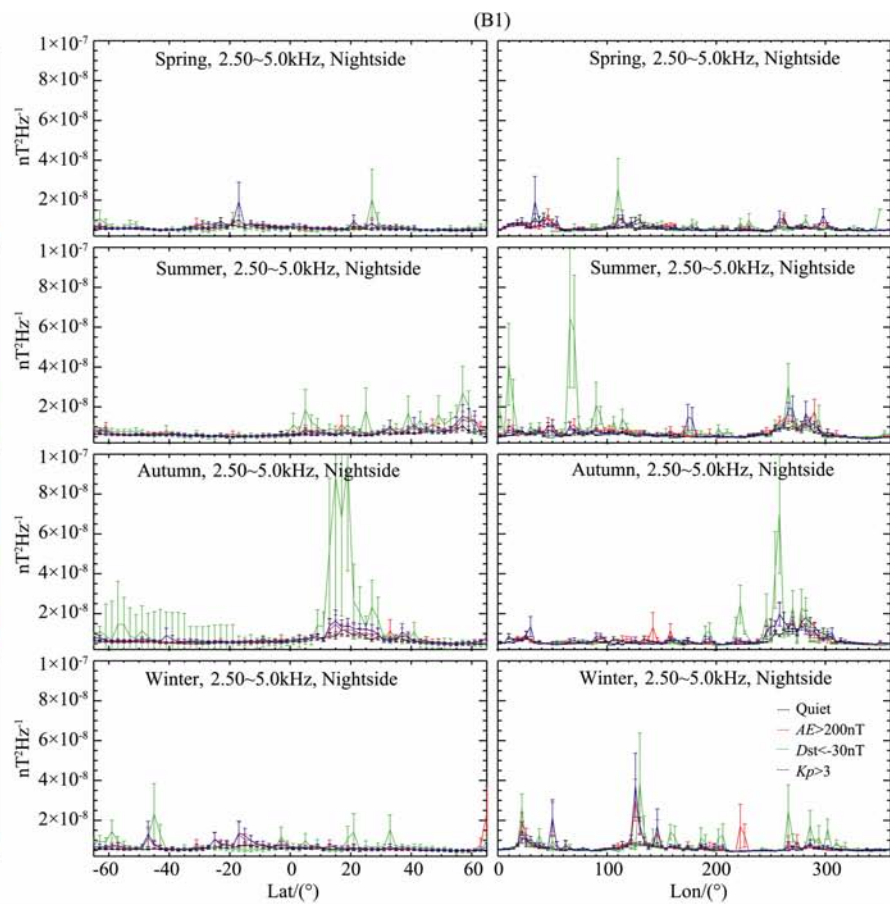
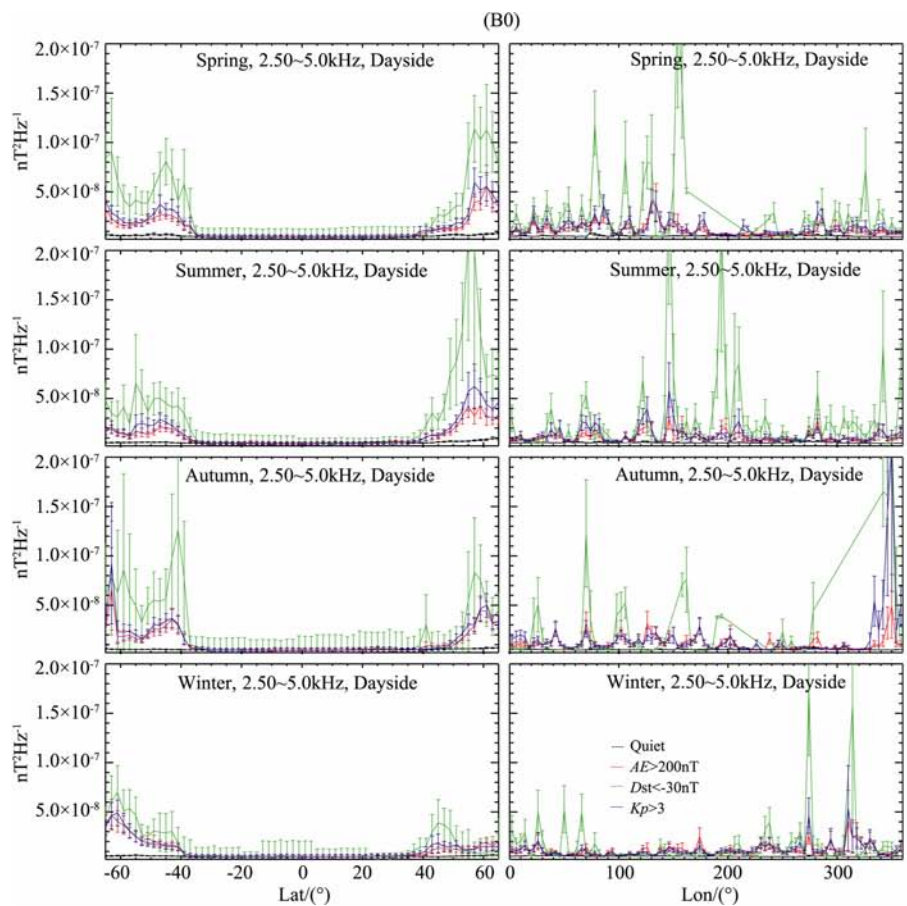
(A0)



(A1)

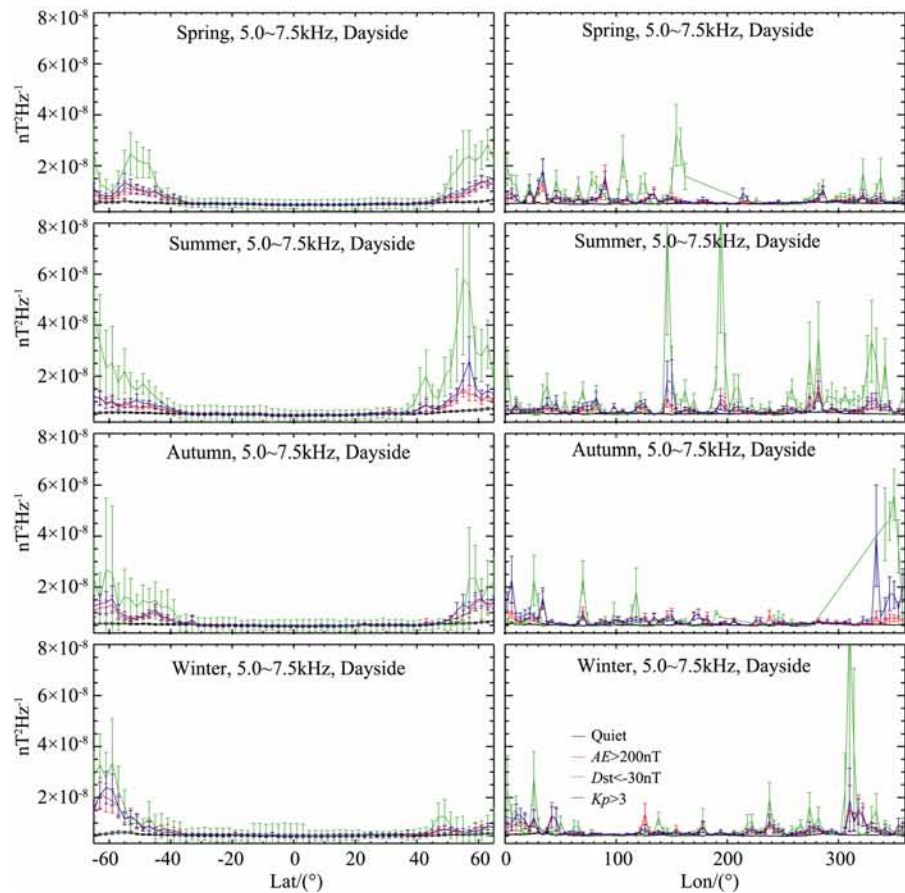


(续)

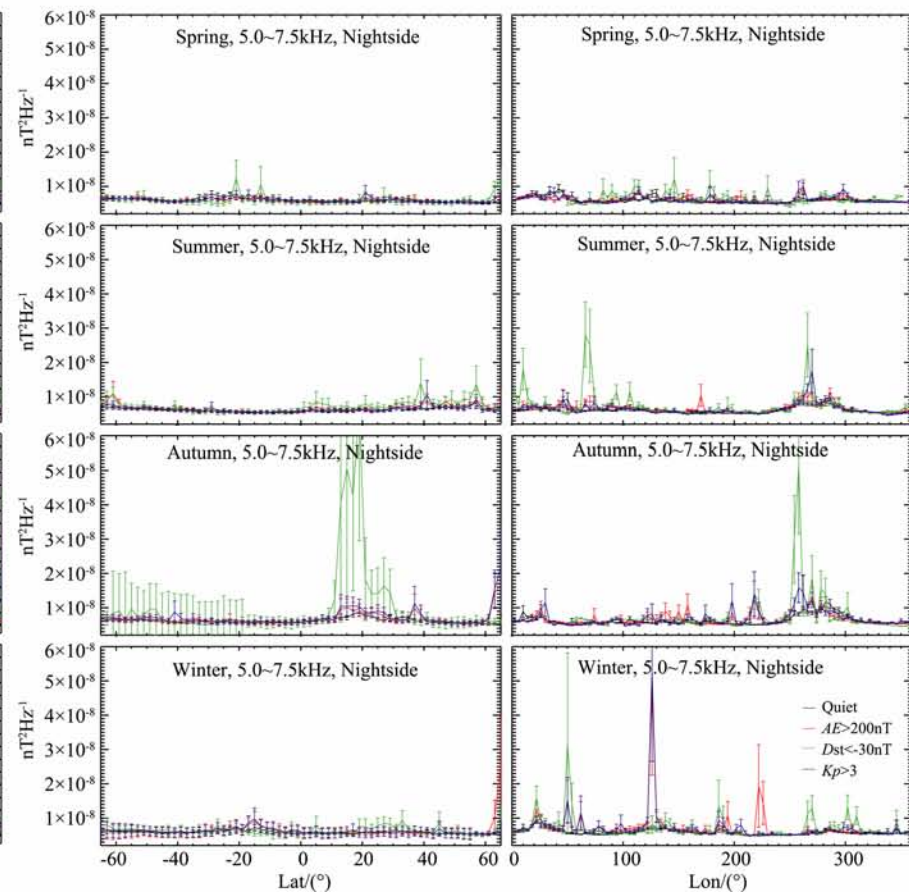


(续)

(C0)

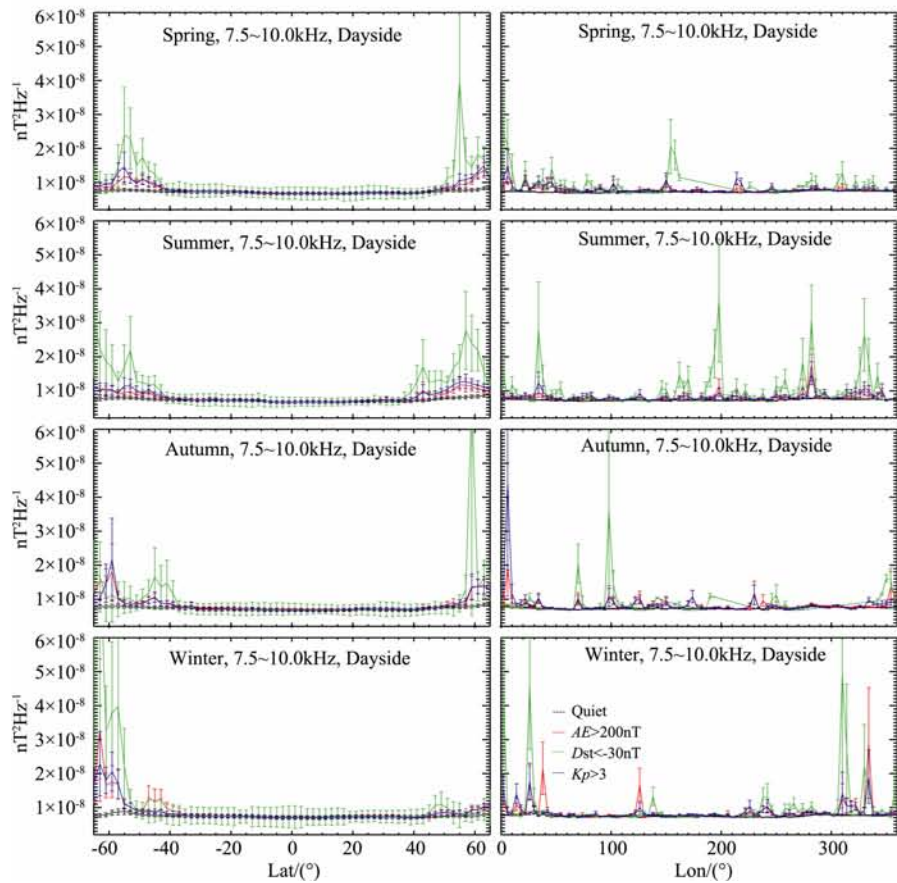


(C1)

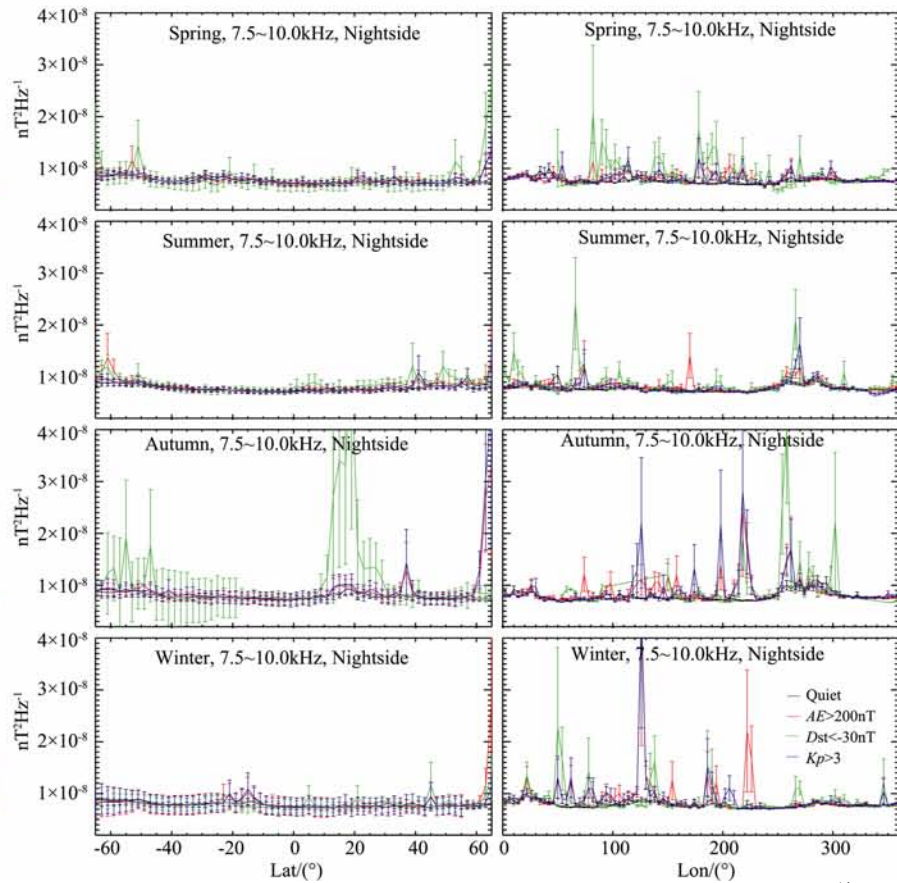


(续)

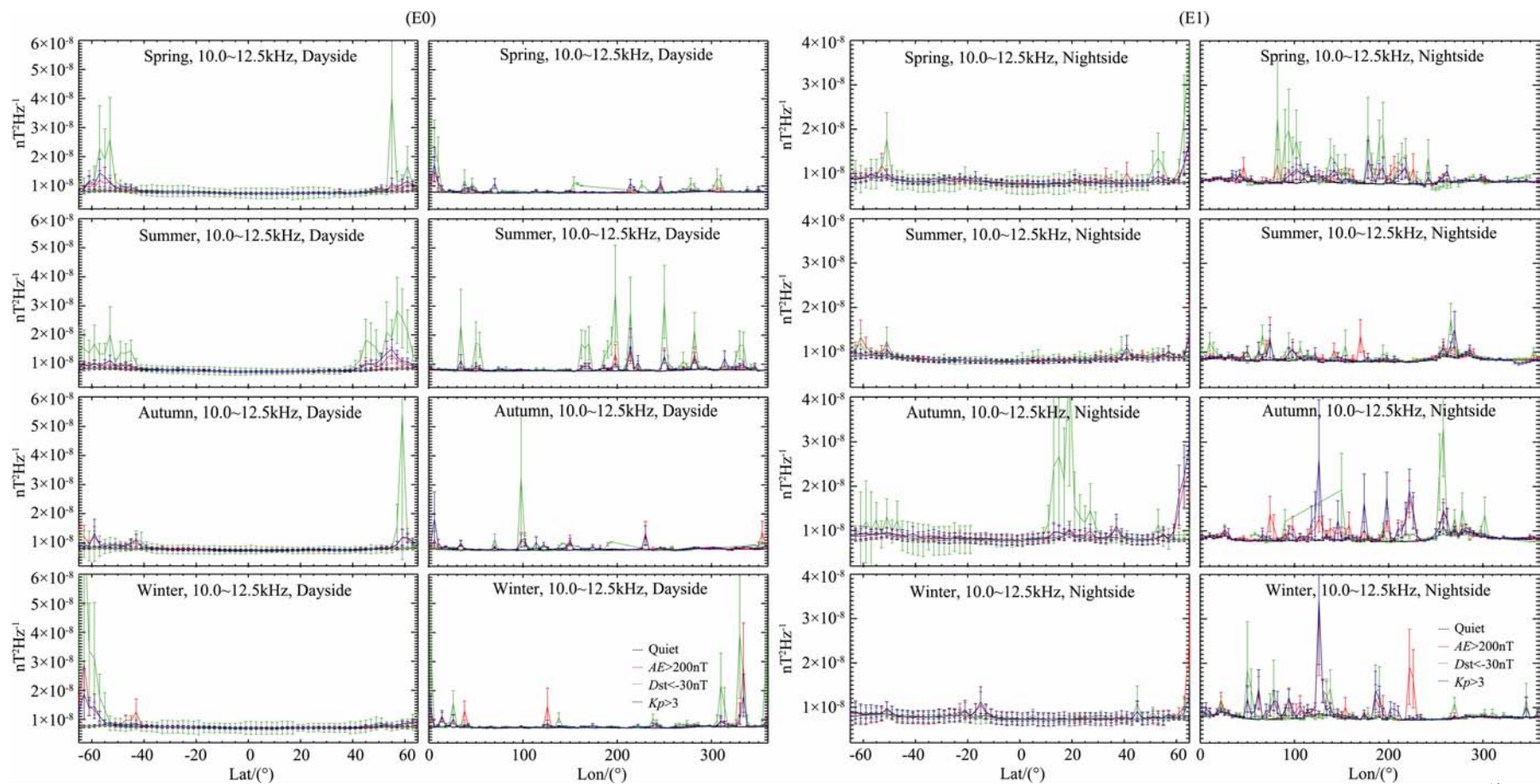
(D0)



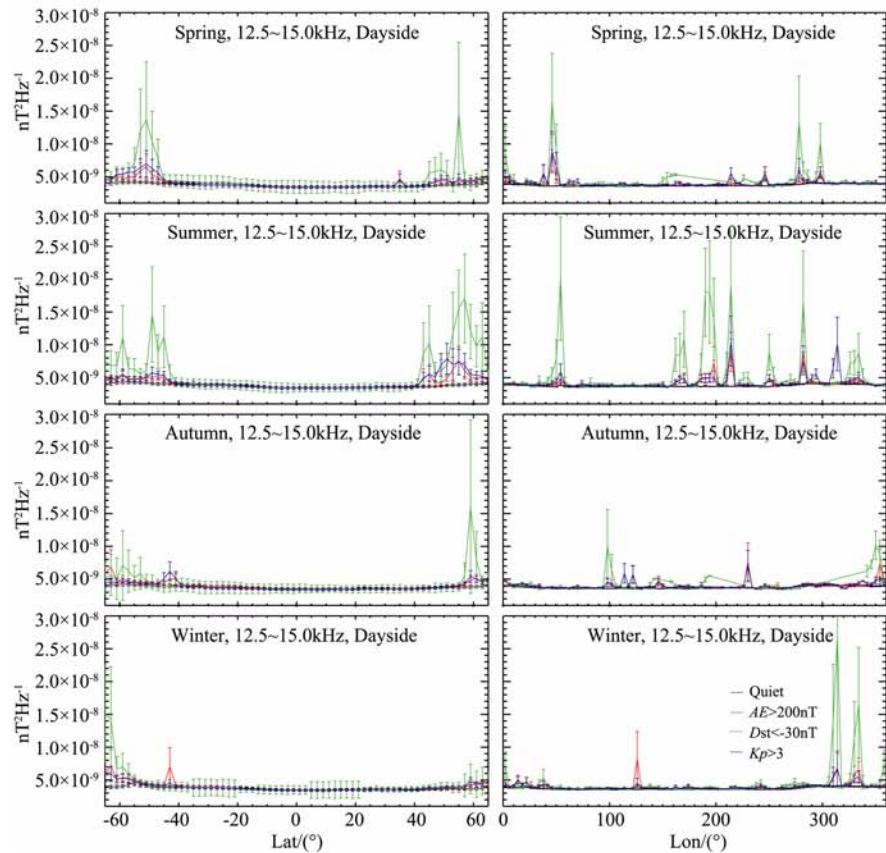
(D1)



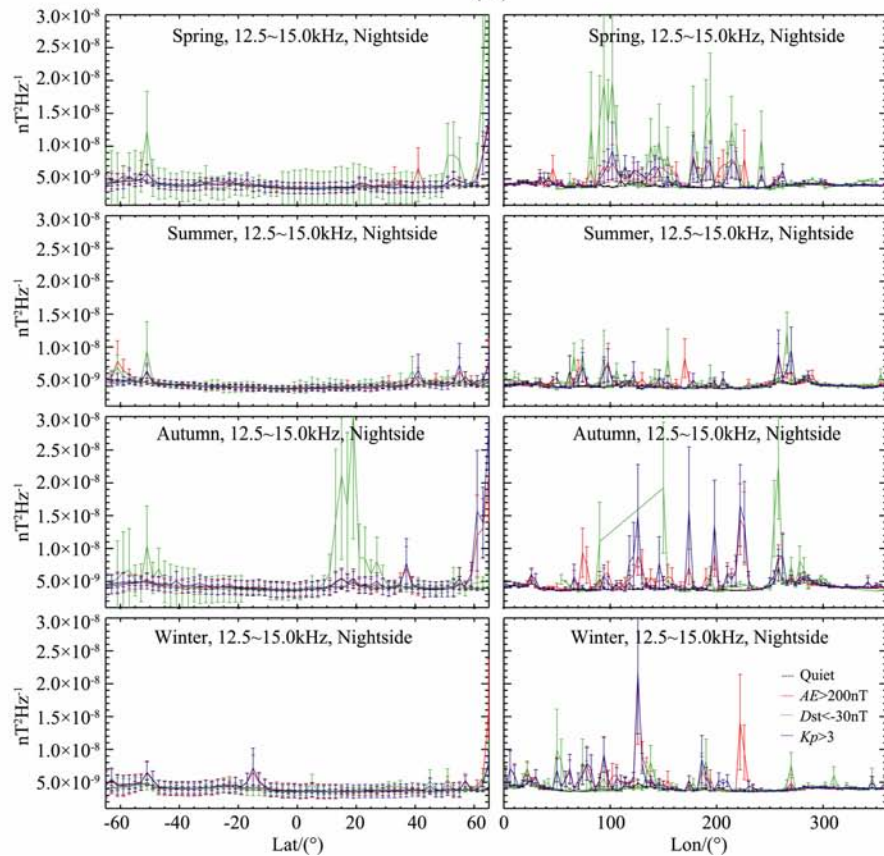
(续)



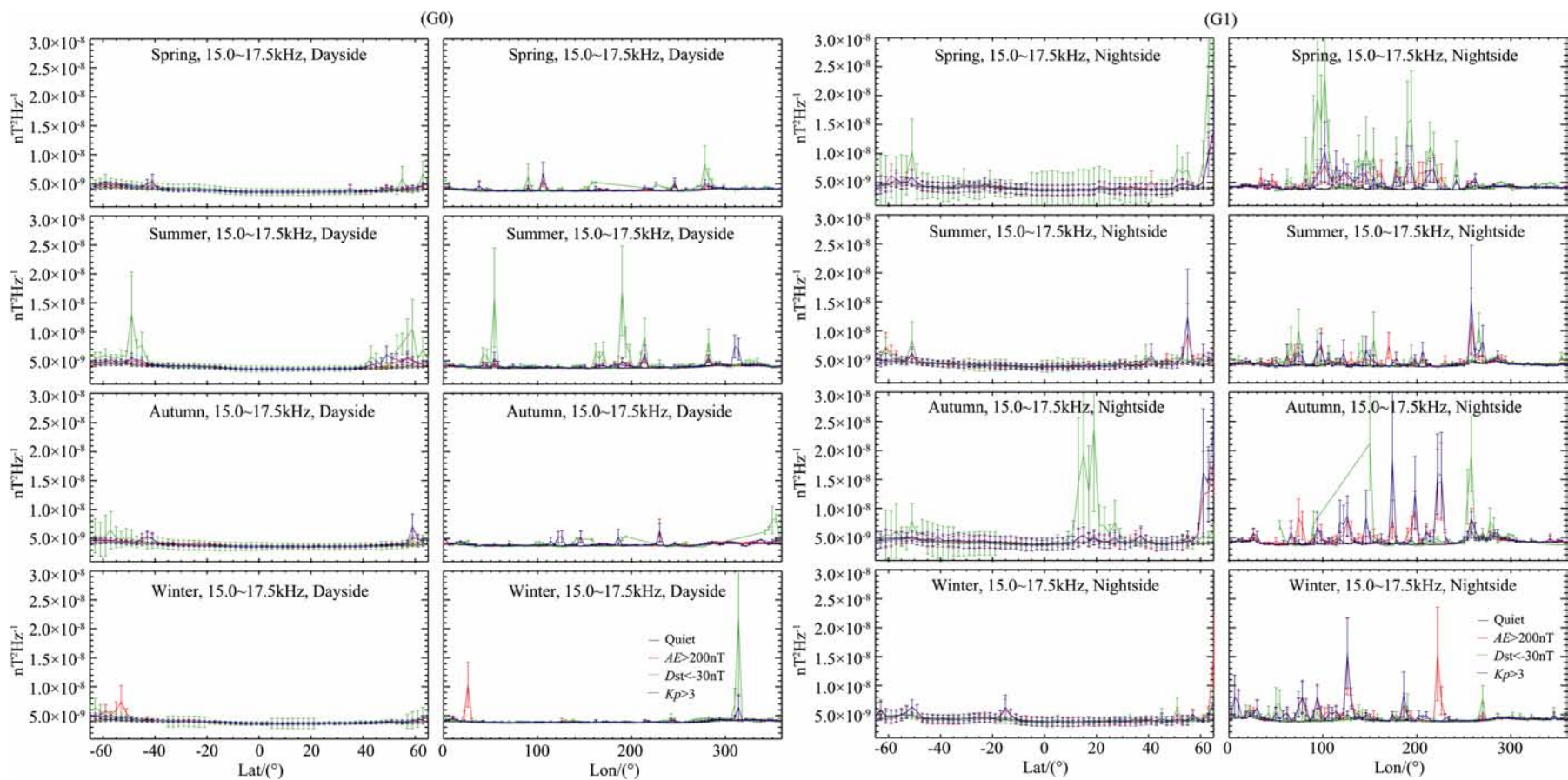
(F0)



(F1)



(续)



(续)

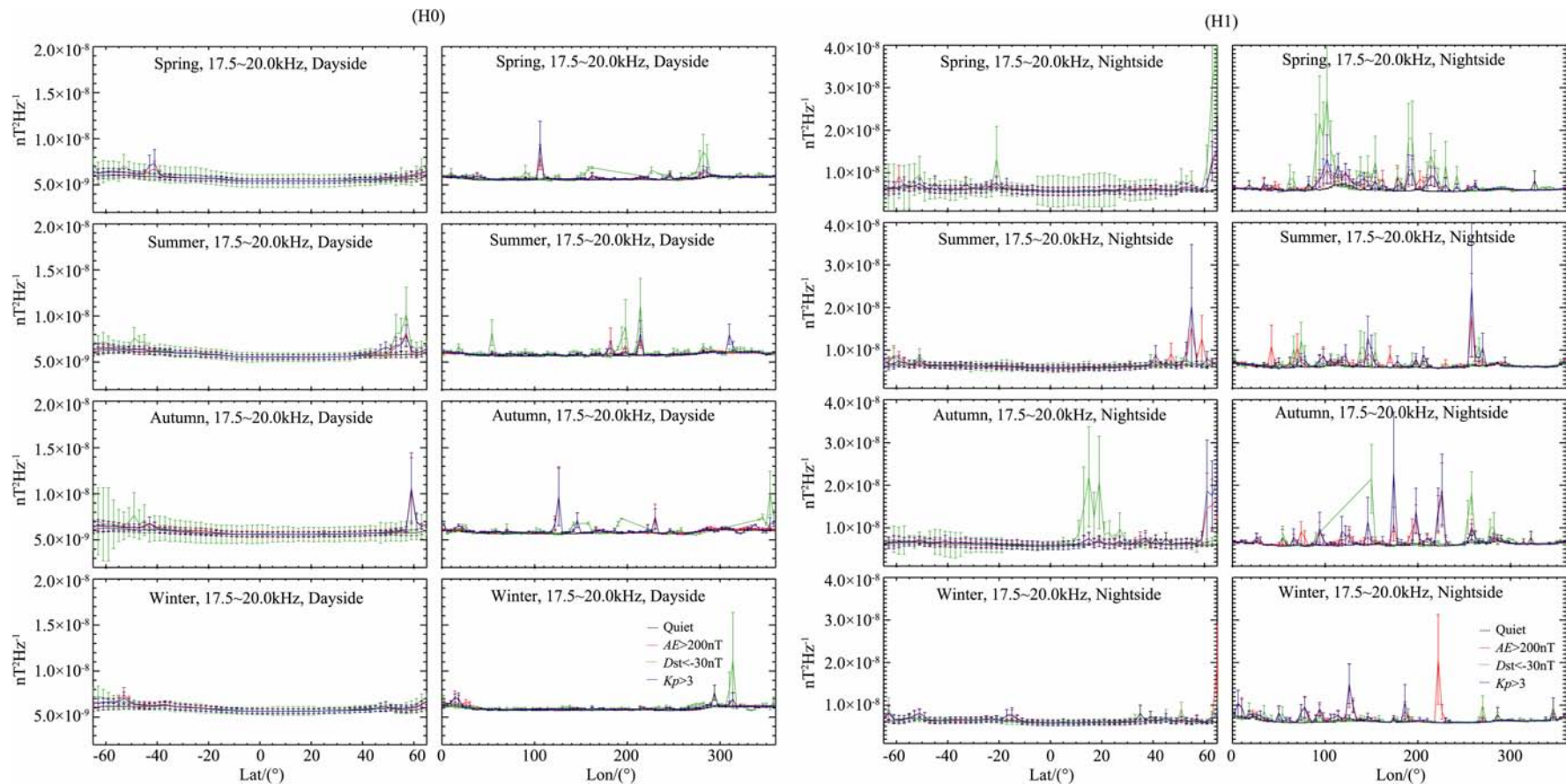


图5 2007年磁场 VLF 波功率谱的地磁活动响应曲线

组图的第一个标号, A~H, 8 组曲线图依次表示从低到高 8 个频段(A: 0.02~2.5 kHz, B: 2.5~5.0 kHz, C: 5.0~7.5 kHz, D: 7.5~10.0 kHz, E: 10.0~12.5 kHz,

F: 12.5~15.0 kHz, G: 15.0~17.5 kHz, H: 17.5~20.0 kHz)。左边图组(第二个标号 0)表示日侧, 右边图组(第二个标号 1)表示夜侧。

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. 5 16 set of geomagnetic activity response curve graphs of magnetic VLF power spectrum for geomagnetic quiet status during 2007 are named A0, A1, to H0 and H1 successively

The first tab "A" means 0.02~2.5 kHz frequency band, B: 2.5~5.0 kHz, C: 5.0~7.5 kHz, D: 7.5~10.0 kHz, E: 10.0~12.5 kHz, F: 12.5~15.0 kHz, G: 15.0~17.5 kHz, H: 17.5~20.0 kHz; "B"; the second tab "0" stand for daytime, and "1" nighttime. In each graph series the left panels display latitude variations, the right panels longitude variations; the panels from top to bottom are shown separately for spring, summer, autumn and winter.